



Berichte über Landwirtschaft

Zeitschrift für Agrarpolitik und Landwirtschaft

BAND 104 / Ausgabe 03

Agrarwissenschaft
Forschung

Praxis

Bewertung kartenbasierter teilflächenspezifischer Stickstoffdüngung:

Eine deskriptive Analyse von COM-B-Faktoren, Adoptionsbarrieren und Zahlungsbereitschaft

Marius Michels, Oliver Mußhoff

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung	2
2 Material und Methoden	5
2.1 Konzeptioneller Rahmen	5
2.2 Fragebogen	6
2.3 Stichprobenverfahren	8
2.4 Datenauswertung	9
3 Ergebnisse und Diskussion	10
3.1 Stichprobe	10
3.1.1 Merkmale der Betriebsleitenden	10
3.1.2 Betriebscharakteristika	11
3.1.3 Vergleich mit dem deutschen Durchschnitt	12
3.2 Deskriptive Ergebnisse des COM-B-Modells und der Intention zur Nutzung von Technologien zur teilflächenspezifischen Stickstoffdüngung	13
3.3 Implikationen der COM-B-Ergebnisse	16
3.3.1 Bewertung der Items	17
3.3.1.1 Psychologische Fähigkeit	17
3.3.1.2 Physische Fähigkeit	17
3.3.1.3 Physische Möglichkeit	17
3.3.1.4 Soziale Möglichkeit	18
3.3.1.5 Reflektierte Motivation	18
3.3.1.6 Automatische Motivation	18
3.3.1.7 Intention	19
3.3.2 Diskrepanz zwischen Verständnis, Begeisterung und Handlungsbereitschaft	19
3.3.3 Bedeutung der physischen Möglichkeiten	19
3.3.4 Komplexität der Motivationskomponente	20
3.3.5 Interaktion zwischen den COM-B-Komponenten	20

3.4 Ergebnisse der qualitativen Analyse	20
3.5 Handlungsempfehlungen	21
3.6 Deskriptiven Ergebnisse zur Zahlungsbereitschaft für die Erstellung satellitengestützter Stickstoffdünger-Applikationskarten	22
3.6.1 Verteilung der Zahlungsbereitschaft	22
3.6.2 Implikationen der Ergebnisse zur Zahlungsbereitschaft	23
4 Fazit	23
Zusammenfassung	25
Summary	25
Literaturverzeichnis	26

1 Einleitung

Die landwirtschaftliche Produktion basiert auf dem Einsatz von Stickstoff als zentrales Element der Pflanzenernährung (Erismann et al., 2008). Der Einsatz von Stickstoff in der Landwirtschaft ist in den letzten Jahren gewachsen, um die Nahrungsmittelproduktion entsprechend der wachsenden Weltbevölkerung anzupassen (Gu et al., 2021). Gleichzeitig hat der verstärkte Einsatz von Stickstoff zur Belastung der Umwelt (z. B. erhöhte Nitratkonzentrationen im Grundwasser) beigetragen (Steffen et al., 2015; Schulte-Uebbing et al., 2021). Dementsprechend hat sich auch die Europäische Union im Rahmen der Nitratrichtlinie (91/676/EWG) zum Ziel gesetzt, die Gewässer vor Stickstoffverunreinigungen infolge von übermäßigem Gebrauch von Stickstoff in der Landwirtschaft zu schützen (Musacchio et al., 2019).

In Deutschland erfolgt seit 2017 die Ausweisung von mit Nitrat belasteten und eutrophierten Gebieten mit strengeren Bewirtschaftungsauflagen für die darin liegenden landwirtschaftlich genutzten Flächen. So gilt in sog. Roten Gebieten eine Reduktion der Düngemenge um 20 % des Bedarfs der Kultur¹. Diese und weitere Maßnahmen sollen zum Schutz der Gewässer beitragen (Umweltbundesamt, 2024). Neben regulatorischen Maßnahmen können auch Technologien der Präzisionslandwirtschaft dazu beitragen, Überschüsse durch präzise Applikation der Düngermenge zu reduzieren bzw. den Stickstoff entsprechend des pflanzlichen Bedarfs auszubringen. Die sog. variable oder teilflächenspezifische Stickstoffdüngung kann somit nicht nur einen ökonomischen (z. B. Einsparung von Düngemitteln), sondern auch einen ökologischen (z. B. bedarfsgerechte Ausbringung und damit Vermeidung von Überschüssen) Nachhaltigkeitsbeitrag leisten (Basso et al., 2016; Balafoutis et al., 2017).

Trotz dieser nachgewiesenen ökologischen und ökonomischen Vorteile bleibt die Adoptionsrate von Präzisionslandwirtschaftstechnologien inkl. teilflächenspezifischer Stickstoffdüngung in Europa und speziell in Deutschland überraschend niedrig. Dies erscheint insbesondere vor dem Hintergrund paradox, dass automatische Lenksysteme – eine technologische Voraussetzung für

¹ Zum Zeitpunkt der Erstellung des Beitrags sind die Regelungen der Roten Gebiete ausgesetzt und die Fortführung noch Unsicher (Awater-Esper, 2026).

teilflächenspezifische Anwendungen – inzwischen in vielen mechanisierten Ackerbaubetrieben zum Standard gehören (Lowenberg-DeBoer & Erickson, 2019; Barnes et al., 2019; Nowak et al., 2021)². Die Bundesregierung hat zwar mit der "Bauern-Milliarde", einem 2024 aufgelegten Investitionsförderprogramm für die Landwirtschaft, Mittel für die Modernisierung landwirtschaftlicher Betriebe im Sinne des Klima-, Natur- und Umweltschutzes bereitgestellt (BMEL, 2024). Fraglich bleibt jedoch, ob finanzielle Fördermaßnahmen alleine ausreichen, um die Adoption von Präzisionslandwirtschaftstechnologien substanziell zu erhöhen, da die Fachliteratur neben den hohen Investitionskosten auf weitere Barrieren (z. B. fehlendes Fachwissen, Zugang zur Technologie, mangelnde Internetgeschwindigkeiten) hinweist (z. B. Drewry et al., 2019; Michels et al., 2020; Hundal et al., 2023).

Während soziodemografische und betriebliche Faktoren als Barrieren und Treiber für die Adoption von Präzisionslandwirtschaftstechnologien und weitere landwirtschaftliche Innovationen (z. B. Drohnen) in Deutschland bereits umfassend untersucht wurden (z. B. Paustian & Theuvsen, 2017; Michels et al., 2020; Sonntag et al., 2022), fehlt es an einem tieferen psychologischen Verständnis der Entscheidungsprozesse von deutschen Landwirtinnen und Landwirten bzgl. teilflächenspezifischer Stickstoffdüngung. Eine Ausnahme stellt die Untersuchung von Pfaff & Maurmann (2025) dar, die den Entscheidungs- und Implementierungsprozess für teilflächenspezifische Stickstoffdüngungstechnologien explorativ untersucht haben. Ihre Ergebnisse zeigen, dass die Technologie grundsätzlich positiv aufgenommen wird, jedoch die technische Einarbeitung als schwierig empfunden wird und es an fachkundigen Ansprechpartnern mangelt. Allerdings beschränkt sich die Studie auf Landwirtinnen und Landwirte aus Baden-Württemberg und basiert auf nur sechs qualitativen Tiefeninterviews, was die Generalisierbarkeit der Ergebnisse auf nationaler Ebene limitiert und eine quantitative Untersuchung mit Fokus auf die teilflächenspezifische Stickstoffdüngung erforderlich macht.

Die Zahlungsbereitschaft für eine Technologie oder Innovation kann als ökonomischer Indikator für die Adoptionsbereitschaft landwirtschaftlicher Innovationen dienen (Olu et al., 2020). Dabei lag der Fokus in der Literatur bisher nicht auf der satellitengestützten Stickstoffdünger-Applikationskartenerstellung als erstem Teilschritt in der Implementierungskette der teilflächenspezifischen kartenbasierten Stickstoffdüngung³. Dies ist darin begründet, dass die Akzeptanz und Finanzierbarkeit dieser Informationsgrundlage eine notwendige Voraussetzung für den gesamten Prozess darstellt – selbst wenn finanzielle Anreize zum Kauf einer entsprechenden Technologie bereitgestellt werden (BMEL, 2024). Während Späti et al. (2022) in ihrer Untersuchung den gesamten Prozess der

² Es ist anzumerken, dass Malone et al. (2026) in ihrer Studie für den US-amerikanischen Sektor feststellten, dass die erwartete und tatsächlich beobachtbare Übernahme variabler Düngungstechnologien sehr ähnlich sind.

³ Der Fokus des Beitrags liegt somit auf dem offline-basierten System variabler Stickstoffdüngung auf Basis von Applikationskarten. Die Karten werden ex ante auf Basis von z. B. Ertragsdaten oder Fernerkundungsinformationen erstellt. Demgegenüber stehen online-basierte Systeme, die die Applikationsmengen über Sensoren am Schlepper oder Ausbringungsgerät in Echtzeit anpassen (Inou 2020; Ess et al., 2001).

teilflächenspezifischen Stickstoffdüngung und dessen Zahlungsbereitschaft analysierten, ohne zwischen einzelnen Implementierungsschritten zu differenzieren, erlaubt unsere Fokussierung auf den ersten Teilschritt eine differenziertere Betrachtung möglicher Adoptionsbarrieren. Dies ist besonders vor dem Hintergrund aktueller Forschungsergebnisse relevant, die zeigen, dass die ökonomischen Vorteile relativ hochauflösender Sensortechnologien wie Satelliten- oder Drohnenaufnahmen oft begrenzt sind (Späti et al., 2021). Jedoch fehlt es insbesondere auch für den deutschsprachigen Raum an quantitativen, belastbaren Ergebnissen zur Zahlungsbereitschaft der Landwirtinnen und Landwirte für die Erstellung von satellitenbasierten Stickstoffdünger-Applikationskarten.

Vor diesem Hintergrund verfolgt der Beitrag drei zentrale Forschungsziele:

1. Systematische Analyse der Wahrnehmung und Entscheidungsprozesse von deutschen Landwirtinnen und Landwirten bzgl. teilflächenspezifischer Stickstoffdüngung
2. Ermittlung der konkreten Zahlungsbereitschaft für satellitengestützte Stickstoffdünger-Applikationskarten als grundlegenden ersten Schritt in der Implementierungskette.
3. Identifizierung spezifischer Adoptionsbarrieren und -treiber, um daraus differenzierte, zielgruppengerechte Handlungsempfehlungen für Beratung, Politik, Forschung und Technologieanbieter abzuleiten.

Der vorliegende Beitrag widmet sich den aufgezeigten Forschungslücken und damit verbundenen Forschungszielen durch einen Multimethoden-Ansatz. Wir wenden das Capability (Fähigkeit), Opportunity (Möglichkeit), Motivation (Motivation) – Behaviour (Verhalten) (COM-B) Modell nach Michie et al. (2011, 2014) an, um die Wahrnehmung von teilflächenspezifischer kartenbasierter Stickstoffdüngung systematisch zu analysieren. Dieser Ansatz integriert psychologische, ökonomische und strukturelle Faktoren, die die Entscheidungsprozesse von Landwirtinnen und Landwirten prägen können (Adrian et al., 2005; Pierpaoli et al., 2013; Mills et al., 2017; Pathak et al., 2019). Das COM-B-Modell wurde in jüngerer Zeit auch im landwirtschaftlichen Kontext für die Untersuchung des Verhaltens bzgl. Agrarumweltmaßnahmen (Baaken et al., 2023) sowie des Einsatzes von Biostimulanzien (Tensi et al., 2022) verwendet – jedoch noch nicht im Rahmen der Entscheidungsfindung für Präzisionslandwirtschaftstechnologien im Allgemeinen und teilflächenspezifischer Stickstoffdüngung im Speziellen. Ergänzend wird die Zahlungsbereitschaft für satellitengestützte Stickstoffdünger-Applikationskarten untersucht, um konkrete Preisvorstellungen zu erfassen. Außerdem werden mittels offener Fragestellung zu Gründen, die gegen den Einsatz teilflächenspezifischer Stickstoffdüngung sprechen, potenzielle weitere Dimensionen erfasst, die über das COM-B-Modell und die Zahlungsbereitschaft für die Erstellung der Applikationskarten hinausgehen.

Der Mehrwert unserer Studie liegt somit in der integrativen Betrachtung psychologischer, ökonomischer und struktureller Einflussfaktoren, die eine differenzierte Ableitung praxisrelevanter Handlungsempfehlungen für unterschiedliche Akteure im Bereich der nachhaltigen Landwirtschaft ermöglicht. Diese Untersuchung richtet sich an vier zentrale Adressatengruppen: (1) die

agrarökonomische Forschungsgemeinschaft durch ein vertieftes theoriegeleitetes Verständnis der multidimensionalen Einflussfaktoren bei der Technologieadoption; (2) die landwirtschaftliche Beratung und Bildungseinrichtungen durch evidenzbasierte Erkenntnisse für zielgerichtete Beratungs- und Schulungskonzepte; (3) Technologieanbieter und Dienstleister durch Informationen über konkrete Zahlungsbereitschaften und spezifische Adoptionsbarrieren; sowie (4) politische Entscheidungsträger durch eine empirische Grundlage für die Gestaltung effektiver Fördermaßnahmen jenseits rein finanzieller Anreize.

Der Rest des Beitrags gliedert sich wie folgt. In Abschnitt 2 werden der konzeptionelle Rahmen, der Fragebogen sowie die Stichprobenziehung und Datenauswertung erläutert. Die Ergebnisse werden in Abschnitt 3 präsentiert und diskutiert. Der Beitrag schließt mit einem Fazit in Abschnitt 4.

2 Material und Methoden

2.1 Konzeptioneller Rahmen

Wir verwenden das von Michie et al. (2011; 2014) entwickelte Behaviour Change Wheel (BCW) als übergeordneten Rahmen zum Verständnis der Adoption teilflächenspezifischer Stickstoffdüngung durch Landwirtinnen und Landwirte. Im Mittelpunkt des BCW als umfassendes Modell zur Analyse von Verhalten bzw. Hebeln zur Verhaltensänderung steht das COM-B-Modell (Michie et al., 2011; 2014). Dieses Rahmenkonzept geht davon aus, dass für eine Verhaltensänderung (z. B. Einsatz teilflächenspezifischer Stickstoffdüngung) Personen die Fähigkeit zur Durchführung, die Gelegenheit zur Beteiligung und die Motivation zur Umsetzung besitzen müssen. Das COM-B-Modell identifiziert die Verhaltensquellen und dient als Grundlage für eine "Verhaltensdiagnose", die die Entwicklung gezielter Interventionen unterstützen kann (West et al., 2020).

Für diese Studie haben wir das COM-B-Rahmenkonzept angepasst, um die Adoption der teilflächenspezifischen Stickstoffdüngungstechnologie durch Landwirtinnen und Landwirte zu untersuchen. Das Rahmenkonzept wird durch sechs Teilkomponenten operationalisiert. Die Fähigkeit (Capability) wird unterteilt in psychologische Fähigkeit (Wissen und Verständnis der Prinzipien teilflächenspezifischer Stickstoffdüngung) und physische Fähigkeit (Fertigkeiten zur Bedienung der erforderlichen Geräte). Die Möglichkeit (Opportunity) umfasst die physische Gelegenheit (Zugang zu Ressourcen und zur Technologie) und die soziale Gelegenheit (Einfluss durch Berufskollegen und fachliche Unterstützung). Die Motivation beinhaltet automatische Motivation (Vertrauen und Zuversicht in die Technologie) und reflektierte Motivation (Überzeugungen bzgl. Effizienz, Umweltvorteilen und wirtschaftlicher Rentabilität).

Ergänzend zum COM-B-Modell wird die Zahlungsbereitschaft für satellitengestützte Stickstoffdünger-Applikationskarten untersucht. Sie dient als ökonomischer Indikator dafür, inwieweit Landwirte und Landwirtinnen bereit sind, für die notwendige Informationsgrundlage der kartenbasierten teilflächenspezifischen Stickstoffdüngung finanzielle Mittel aufzuwenden. Damit ergänzt die Analyse

die psychologischen und strukturellen Dimensionen des COM-B-Modells um eine ökonomische Perspektive.

2.2 Fragebogen

Bevor die Teilnehmenden befragt wurden, wurden sie über Ziel und Inhalt der Studie bzw. des Fragebogens aufgeklärt. Ebenso wurden die Teilnehmenden informiert, dass Sie jederzeit ohne Konsequenzen die Befragung abbrechen konnten. Der Fragebogen gliederte sich in vier Teile: Der erste Teil, erfasste den aktuellen Implementierungsstand digitaler Technologien im Ackerbau. Der zweite und dritte Teil wurde in randomisierter Reihenfolge präsentiert. Teil zwei fokussierte auf Einstellungen und Verhaltensabsichten bzgl. teilflächenspezifischer Stickstoffdüngung. Vorab erhielten die Teilnehmenden eine kurze Erläuterung:

„Variable Stickstoffdüngung bedeutet, dass die Düngermenge innerhalb eines Feldes automatisch angepasst wird. Dafür werden Daten über den Pflanzenbedarf gesammelt, zum Beispiel durch Satelliten, Drohnen oder Sensoren. Anhand dieser Daten wird dann die bedarfsgerechte Düngermenge für jeden Bereich des Feldes berechnet und eine Applikationskarte erstellt. Die Daten werden auf den Bordcomputer übertragen und Düngerstreuer oder Feldspritzen werden eingesetzt, die ihre Ausbringungsmenge automatisch an die Vorgaben der Applikationskarte anpassen können. So können zum Beispiel verschiedene Bereiche eines Feldes unterschiedliche Mengen Dünger erhalten - etwa 80 kg Stickstoff pro Hektar in einem Bereich und 60 kg Stickstoff pro Hektar in einem anderen.“

Die Teilnehmenden wurden dann gebeten, die randomisierten COM-B-Items (Tabelle 1) auf einer 7-Punkte-Likert-Skala (1 = stimme überhaupt nicht zu; 2 = stimme nicht zu; 3 = stimme eher nicht zu; 4 = teils/teils; 5 = stimme eher zu; 6 = stimme zu; 7 = stimme voll und ganz zu) zu bewerten. Zusätzlich wurde die Intention zur Nutzung der Technologie ebenfalls auf einer 7-Punkte-Skala anhand von zwei zusätzlichen Items abgefragt (Tabelle 2). Abschließend wurden den Teilnehmenden die offene Frage gestellt, welche Gründe aus ihrer Sicht gegen die Verwendung der Technologie sprechen.

Tab. 1:

COM-B-Rahmenwerk mit den entsprechenden Teilkomponenten und zugehörigen Items für die Komponenten Fähigkeit, Möglichkeit und Motivation.

Teilkomponenten	ID	Item ^a
Psychologische Fähigkeiten	Cap_Psy_Know_1	Ich denke, ich verstehe die Grundprinzipien der variablen Stickstoffdüngung.
	Cap_Psy_Know_2	Ich glaube, ich kann Applikationskarten interpretieren und anwenden.
	Cap_Psy_Know_3	Ich denke, ich weiß, wie ich Daten aus Fernerkundung oder Sensoren nutzen kann.
Physische Fähigkeiten	Cap_Phy_Skill_1	Ich nehme an, ich bin in der Lage, die Geräte für variable Stickstoffdüngung zu bedienen.
	Cap_Phy_Skill_2	Ich bin der Meinung, ich kann die Software zur Erstellung von Applikationskarten nutzen.
	Cap_Phy_Skill_3	Ich kann einen Düngerstreuer oder eine Feldspritze gemäß Applikationskarten einstellen.
Physische Möglichkeit	Opp_Phy_Res_1	Ich habe Zugang zu den Technologien für die variable Stickstoffdüngung.
	Opp_Phy_Res_2	Ich glaube, meine Felder sind für den Einsatz variabler Stickstoffdüngung geeignet.
	Opp_Phy_Res_3	Mir stehen finanzielle Mittel für Investitionen in die Technologie zur Verfügung.
Soziale Möglichkeit	Opp_Soc_Sup_1	Andere Landwirtinnen und Landwirte in meinem Umfeld nutzen diese Technik bereits.
	Opp_Soc_Sup_2	Es gibt Experten, die mich bei der Implementierung unterstützen können.
	Opp_Soc_Sup_3	Die landwirtschaftliche Gemeinschaft sieht variable Stickstoffdüngung positiv.
Automatische Motivation	Mot_Aut_Goal_1	Ich vertraue darauf, dass variable Stickstoffdüngung effizienter ist als konventionelle Methoden.
	Mot_Aut_Goal_2	Die Möglichkeit, Stickstoff präzise auszubringen, begeistert mich.
	Mot_Aut_Goal_3	Ich fühle mich sicher im Umgang mit den Technologien.
Reflektierte Motivation	Mot_Ref_Bel_1	Ich bin überzeugt, dass diese Methode meine Düngung effizienter macht.
	Mot_Ref_Bel_2	Ich glaube, dass variable Stickstoffdüngung umweltfreundlicher ist.
	Mot_Ref_Bel_3	Ich denke, dass diese Technik profitabel ist.

^a Items wurden randomisiert abgefragt. Bewertung auf einer 7-Punkte-Likert-Skala.

Tab. 2:

Items zur Intention der Nutzung von Technologien zur teilflächenspezifischen Stickstoffdüngung.

Komponente	ID	Item ^a
INTENTION	Intention_1	Ich beabsichtige, in naher Zukunft variable Stickstoffdüngung (ggf. weiter) in meinem Betrieb einzusetzen.
	Intention_2	Ich plane, Technologien für die variable Stickstoffdüngung zu nutzen.

^a Items wurden randomisiert abgefragt. Bewertung auf einer 7-Punkte Likert Skala.

Der dritte Teil untersuchte die Zahlungsbereitschaft für die Erstellung satellitengestützter Stickstoffdünger-Applikationskarten. Die Zahlungsbereitschaft wurde als hypothetisch geäußerte Zahlungsbereitschaft im Rahmen eines Stated-Preference-Ansatzes erhoben. Hierzu wurde den Befragten zunächst ein konkretes hypothetisches Nutzungsszenario beschrieben und anschließend

ihre maximale Zahlungsbereitschaft anhand eines kategorisierten, an das Payment-Card-Format angelehnten Antwortformats erfasst:

„Stellen Sie sich vor, dass Sie einen modernen Düngerstreuer oder eine Feldspritze sowie einen entsprechenden Bordcomputer besitzen, der in der Lage ist, Düngemittel präzise und variabel entsprechend den spezifischen Bedürfnissen Ihrer Felder anhand von Applikationskarten auszubringen.

Ein Dienstleister bietet Ihnen Folgendes an: Satelliten machen regelmäßig Bilder bzw. Karten von Ihren Feldern. Diese Karten geben genaue Empfehlungen, welche Bereiche Ihres Feldes mehr oder weniger Stickstoffdünger benötigen. Diese digitalen Karten können Sie in Ihren Bordcomputer laden. Ihr Düngerstreuer oder Ihre Feldspritze bringt dann automatisch die bedarfsgerechte Düngermenge an jeder Stelle aus.

Angenommen, Sie könnten die beschriebene Dienstleistung in Anspruch nehmen. Wie viel wären Sie maximal bereit, pro Hektar und Jahr für diesen Service zu bezahlen? Die Karten stehen Ihnen ein Jahr zur Verfügung. Bitte wählen Sie den Wert auf der Skala aus, der Ihrer maximalen Zahlungsbereitschaft entspricht. Sie können auch 0 €/ha und Jahr angeben, wenn Sie die Technologie doch nicht nutzen wollen.“

Die Teilnehmenden konnten aus sieben Kategorien wählen: '0 €/ha und Jahr', '0,01 – 3 €/ha und Jahr', '3,01 – 6 €/ha und Jahr', '6,01 – 9 €/ha und Jahr', '9,01 – 12 €/ha und Jahr', '12,01 – 15 €/ha und Jahr' und 'Mehr als 15 €/ha und Jahr'. Vor der Auswahl der Zahlungsbereitschaft wurden die Teilnehmenden gebeten, möglichst ehrlich zu antworten, also so, als ob sie die entsprechende Dienstleistung tatsächlich in Anspruch nehmen wollen würden.

Der vierte Teil erfasste soziodemografische und betriebliche Charakteristika der Teilnehmenden.

2.3 Stichprobenverfahren

Die Datengewinnung erfolgte durch eine strukturierte telefonische Befragung mit computergestützter Durchführung (CATI - Computer Assisted Telephone Interview). Die Feldphase erstreckte sich über den Zeitraum von Dezember 2024 bis Januar 2025. Befragt wurden ausschließlich aktiv tätige landwirtschaftliche Betriebsleitende innerhalb Deutschlands.

Die Grundlage für die Stichprobengewinnung bildete ein umfassender Datenbestand der *AgriDirect Deutschland GmbH*, der Informationen zu mehr als 300.000 landwirtschaftlichen Betrieben (inkl. Forstbetrieben, Sonderkulturbetriebe, landwirtschaftlicher Lohnunternehmer) enthält und somit einen erheblichen Teil des deutschen Primärsektors abdeckt. Für diese Untersuchung wurde zunächst eine Vorselektion durchgeführt, bei der über 15.000 Betriebsleitende aus der Datenbank nach spezifischen Kriterien ausgewählt wurden. Der Fokus lag dabei auf Ackerbaubetrieben sowie

Mischbetrieben mit Ackerbau und Viehhaltung, während reine Lohnunternehmen bewusst ausgeschlossen wurden.

Die Kontaktierung der potenziellen Teilnehmenden aus dieser vorselektierten Gruppe erfolgte anschließend nach dem Zufallsprinzip. Durch die telefonische Befragung konnten 366 ausgefüllte Fragebögen gesammelt werden. Nach der Datenbereinigung, bei der unvollständige Datensätze eliminiert wurden, verblieben 342 vollständige Datensätze für die weitere Analyse.

Das angewandte Verfahren kann als zweistufiges Stichprobenverfahren charakterisiert werden:

- Die erste Stufe umfasste die kriterienbasierte Vorauswahl aus dem Gesamtdatenbestand
- Die zweite Stufe beinhaltete die zufällige Kontaktaufnahme innerhalb dieser vorselektierten Gruppe

Die randomisierte Auswahl während der telefonischen Kontaktphase entspricht grundsätzlich einer probabilistischen Stichprobenziehung, wobei zu beachten ist, dass die tatsächliche Teilnahmewahrscheinlichkeit durch Faktoren wie Erreichbarkeit und individuelle Teilnahmebereitschaft der Betriebsleitenden beeinflusst wurde. In der methodischen Klassifikation entspricht dieses Vorgehen einer geschichteten Zufallsstichprobe (engl. stratified random sampling) mit vorgeschaltetem Screening-Prozess (Lohr, 2021). Die Generalisierbarkeit der Ergebnisse muss entsprechend im Kontext der angewandten Vorselektionskriterien und der Selbstselektion durch unterschiedliche Teilnahmebereitschaft interpretiert werden.

2.4 Datenauswertung

Die statistische Auswertung und Visualisierung der erhobenen Daten erfolgten mit der Software *R* (Version 4.3.3). Nach der Datenbereinigung wurden deskriptive Statistiken (Mittelwerte, Standardabweichungen, Schiefe und Kurtosis) für alle Items berechnet. Für die aggregierten COM-B-Komponenten (Fähigkeit, Möglichkeit, Motivation) und die Intention wurden Mittelwerte aus den jeweiligen Items gebildet. Die Korrelationen zwischen den aggregierten COM-B-Komponenten und der Intention wurden ebenfalls mit *R* berechnet. Die Zahlungsbereitschaft wurde deskriptiv anhand der absoluten und relativen Häufigkeiten der sieben vorgegebenen Preiskategorien ausgewertet. Dabei wurden auch Antworten von 0 €/ha und Jahr als Ausdruck fehlender Zahlungsbereitschaft berücksichtigt. Da die Zahlungsbereitschaft in Intervallen erhoben wurde und die höchste Kategorie nach oben offen war, wurde auf die Berechnung eines arithmetischen Mittelwerts verzichtet. Stattdessen wurde die Verteilung über die einzelnen Preiskategorien dargestellt, um die Heterogenität der Zahlungsbereitschaft und die von unterschiedlichen Anteilen der Befragten akzeptierten Preisspannen abzubilden.

Für die Auswertung der offenen Fragen zu den Gründen, die gegen die Verwendung teilflächenspezifischer Stickstoffdüngung sprechen, wurde ein induktives Kategorisierungssystem entwickelt, das auf einer explorativen Durchsicht der Antworten basierte. Hierbei wurden zunächst

Schlüsselwörter und zentrale Konzepte identifiziert, die in den Antworten wiederholt auftraten. Diese wurden anschließend zu thematisch kohärenten Hauptkategorien zusammengefasst, um ein strukturiertes Kodierungsschema zu erstellen. Die eigentliche Kodierung der Antworten erfolgte computergestützt mittels eines Algorithmus, der auf einer Schlüsselwortanalyse basierte. Für jede identifizierte Hauptkategorie wurde ein spezifisches Vokabular definiert, das semantisch verwandte Begriffe und typische Formulierungen umfasste. So wurden beispielsweise für die Kategorie „Kosten und finanzielle Bedenken“ Begriffe wie „teuer“, „Preis“, „finanziell“, „Investition“, „Geld“ und „Anschaffung“ berücksichtigt. Dieses Vorgehen ermöglichte eine konsistente und objektive Zuordnung der individuellen Antworten zu den jeweiligen Kategorien. Zur Unterstützung des Kategorisierungsprozesses und der systematischen Textanalyse wurde das Large Language Model Claude 3.7 (Anthropic, 2025) eingesetzt. Bei Antworten, die mehrere potenzielle Kategorien adressierten, wurde die inhaltlich dominierende Barriere als primäre Kategorie erfasst. Antworten, die keiner der spezifischen Hauptkategorien eindeutig zugeordnet werden konnten, wurden in einer Sammelkategorie "Sonstiges" zusammengefasst und anschließend qualitativ auf wiederkehrende Themen untersucht. Die finale Überprüfung und interpretative Bewertung der Kategorisierungsergebnisse erfolgten durch die Autoren.

3 Ergebnisse und Diskussion

3.1 Stichprobe

Die Analyse basiert auf Daten von 342 landwirtschaftlichen Betrieben. Die erhobenen Informationen umfassen sowohl Merkmale der Betriebsleitenden als auch strukturelle Eigenschaften der untersuchten Höfe.

3.1.1 Merkmale der Betriebsleitenden

Die deskriptiven Merkmale der befragten Betriebsleitenden sind in Tabelle 3 dargestellt. Die Betriebsleitenden weisen ein Durchschnittsalter von 52 Jahren auf, wobei die jüngste Person 21 und die älteste 77 Jahre alt ist. Die Altersverteilung zeigt, dass knapp die Hälfte (49 %) über 55 Jahre alt ist. Etwa ein Viertel (26 %) fällt in die Altersgruppe von 45 bis 55 Jahren. Jüngere Betriebsleitende sind weniger stark repräsentiert: 14 % sind zwischen 35 und 45 Jahre alt, während nur 10 % 35 Jahre oder jünger sind. Der Anteil männlicher Betriebsleitender beträgt 91 %. Bei 55 % der Betriebe ist die Nachfolgefrage bereits geklärt und es lässt sich eine hohe Smartphone-Nutzungsrate von 95 % feststellen. Im Bildungsbereich verfügen 21 % über einen Hochschulabschluss. Die Risikobereitschaft der Landwirtinnen und Landwirte wurde auf einer 11-Punkte-Skala gemäß der Formulierung nach Michels et al. (2024) basierend auf Dohmen et al. (2011) gemessen, wobei 0 für keine Risikobereitschaft und 10 für sehr hohe Risikobereitschaft steht. Der Durchschnittswert von 5,44 deutet auf eine im Mittel neutrale Risikoeinstellung hin.

Tab. 3:
Deskriptive Statistiken der Landwirtinnen und Landwirte. (N = 342)

Variable	Beschreibung	μ	SD	Min	Max	Deutscher Durchschnitt
alter	Alter des Landwirts in Jahren	51,92	11,99	21	77	53 ^a
	≤ 35 Jahre	0,10	-	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
geschlecht	1, wenn der Landwirt männlich ist; sonst 0	0,91	-	0	1	0,89 ^a
nach	1, wenn die Hofnachfolge bereits geklärt ist; sonst 0	0,55	-	0	1	na
risiko	Selbsteinschätzung Risikoeinstellung ^b	5,44	2,08	0	10	na
smartphone	1, wenn der Landwirt ein Smartphone nutzt; sonst 0	0,95	-	0	1	na
uni	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; μ = Mittelwert

3.1.2 Betriebscharakteristika

Die Betriebscharakteristika sind in Tabelle 4 dargestellt. Die erfassten Betriebe bewirtschaften durchschnittlich 138 Hektar Ackerland, mit einer erheblichen Größenvariation von 7 bis 1.800 Hektar. Die Größenverteilung zeigt, dass mittelgroße bis große Betriebe dominieren: 41 % bewirtschaften 50 bis unter 100 Hektar, 34 % fallen in die Kategorie von 100 bis unter 200 Hektar. Kleinere Betriebe mit weniger als 50 Hektar machen nur 8 % der Stichprobe aus, während 14 % zwischen 200 und 500 Hektar bewirtschaften und 3 % mehr als 500 Hektar umfassen. Mehr als die Hälfte (56 %) der Betriebe wirtschaftet ohne Viehhaltung. Der durchschnittliche Pachtanteil beträgt 51 %. Die große Mehrheit (87 %) wird im Haupterwerb geführt, während nur 13 % als Nebenerwerbsbetriebe klassifiziert sind. Die durchschnittliche Bodenqualität liegt bei 45 Bodenwertzahlpunkten. Fast die Hälfte der Betriebe (48 %) hat zumindest Teilflächen, die sich in sog. Roten Gebieten mit speziellen Umweltauflagen (§ 13a der Düngeverordnung) befinden. Hinsichtlich der Bewirtschaftungsform arbeiten 11 % nach ökologischen Prinzipien, während 89 % konventionell wirtschaften.

Tab. 4:
Deskriptive Statistiken der Betriebe. (N = 342)

Variable	Beschreibung	μ	SD	Min	Max	Deutscher Durchschnitt
acker	1, wenn der Betrieb viehlos ist; sonst 0	0,56	-	0	1	0,37 ^b
ackerland	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
bp	Durchschnittliche Bodenwertzahl	45,14	16,39	0	97	62
neben	1, wenn der Betrieb ein Nebenerwerbsbetrieb ist; sonst 0	0,13	-	0	1	0,55 ^b
pacht	Anteil gepachtetes Ackerland	0,51	0,25	0	100	0,55 ^a
region	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
rote	1, wenn ein Teil oder die gesamte Betriebsfläche in sog. Roten Gebieten liegt; sonst 0	0,48	-	0	1	na
öko	1, wenn der Betrieb ökologisch wirtschaftet; sonst 0	0,11	-	0	1	0,14 ^a

^a DESTATIS (2025)

^b Deutscher Bauernverband (2024)

^c Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (2026)

na = nicht verfügbar; SD = Standardabweichung; μ = Mittelwert

3.1.3 Vergleich mit dem deutschen Durchschnitt

Die Stichprobe weist im Vergleich zum bundesweiten Durchschnitt einige strukturelle Besonderheiten auf, die bei der Ergebnisinterpretation zu beachten sind. Mit einem Anteil von 87 % Haupteinwerbsbetrieben (gegenüber 45 % im Bundesdurchschnitt) und 56 % viehlosen Ackerbaubetrieben (gegenüber 37 %) liegt der Schwerpunkt deutlich auf spezialisierten, professionellen Betriebsstrukturen, die für die Anwendung der untersuchten Technologien besonders relevant sind. Die regionale Verteilung bildet die verschiedenen landwirtschaftlichen

Produktionsgebiete Deutschlands weitgehend proportional ab. Bei weiteren wichtigen Merkmalen wie Altersstruktur, Geschlechterverteilung, Pachtlandanteil und ökologischer Wirtschaftsweise stimmt die Stichprobe mit dem deutschen Durchschnitt weitgehend überein (Deutscher Bauernverband, 2024). Die Selbsteinschätzung der Landwirtinnen und Landwirte als im Durchschnitt risikoneutral deckt sich mit Erkenntnissen zu europäischen Landwirtinnen und Landwirten (Garcia et al., 2024), obwohl sie in der Literatur oft als risikoavers beschrieben werden (European Commission, 2017; Iyer et al., 2019).

Die geschichtete Zufallsstichprobe konzentriert sich bewusst auf Betriebe zwischen 50 und 500 Hektar – eine Gruppe, die zwar nur 28 % aller landwirtschaftlichen Betriebe in Deutschland ausmacht, jedoch 53 % der Agrarfläche bewirtschaftet (DESTATIS, 2025). Mit einer durchschnittlichen Größe von 138 Hektar liegen die erfassten Betriebe deutlich über dem nationalen Mittelwert von etwa 63 Hektar, was der gezielten Ausrichtung auf Betriebe über 50 Hektar entspricht. Da die Wachstumsschwelle bei ungefähr 100 Hektar landwirtschaftlicher Nutzfläche angesetzt wird (Deutscher Bauernverband, 2024), wird der durchschnittliche Betrieb der Stichprobe als wachstumsorientiert und potenzieller Innovationsträger betrachtet.

Die Kombination aus systematischem Zufallsstichprobenverfahren, geografischer Ausgewogenheit und Repräsentativität in zentralen betrieblichen und soziodemografischen Charakteristika macht diese Stichprobe besonders wertvoll für die Analyse von Digitalisierungsprozessen in der deutschen Landwirtschaft. Der Fokus auf zukunftsorientierte, professionelle Betriebsstrukturen ermöglicht Einblicke in jene Segmente des Agrarsektors, die für die künftige Entwicklung und Technologieadoption besondere Relevanz besitzen.

Für die folgende Analyse wurden 303 vollständig beantwortete Fragebögen verwendet. Der Anteil ökologischer Landwirtinnen und Landwirte im Datensatz wurde ausgeschlossen, da für diese Art der Bewirtschaftung eine teilflächenspezifische Stickstoffdüngung nicht bedeutsam ist.

3.2 Deskriptive Ergebnisse des COM-B-Modells und der Intention zur Nutzung von Technologien zur teilflächenspezifischen Stickstoffdüngung

Abbildung 1 und Tabelle 5 zeigen die deskriptiven Statistiken zu den COM-B-Komponenten und der Intention zur Nutzung teilflächenspezifischer Stickstoffdüngungstechnologie. Die Spannweite der Mittelwerte reicht von 3,05 (Intention_1) bis 5,97 (Cap_Psy_Know_1). Diese Variabilität zwischen den verschiedenen Komponenten verdeutlicht die unterschiedlichen Ausprägungen innerhalb des COM-B-Modells. Das Item mit der höchsten Zustimmung ist Cap_Psy_Know_1 ($\mu = 5,97$, $SD = 1,19$), das zur Komponente der psychologischen Fähigkeit gehört. Dieser hohe Mittelwert in Kombination mit der geringen Standardabweichung weist auf eine konsistent hohe Selbsteinschätzung der grundlegenden Kenntnisse hin. Die Items Opp_Soc_Sup_2 ($\mu = 5,17$, $SD = 1,75$), Cap_Phy_Skill_1 ($\mu = 5,16$, $SD = 1,75$) und Mot_Ref_Bel_2 ($\mu = 5,12$, $SD = 1,74$) folgen mit ähnlich hohen Mittelwerten und gehören jeweils zu unterschiedlichen COM-B-Komponenten (soziale Gelegenheit, physische Fähigkeit und reflektierte Motivation). Im mittleren Bereich liegen Items wie Cap_Psy_Know_2 ($\mu = 4,97$, $SD = 1,77$),

Mot_Ref_Bel_1 ($\mu = 4,89$, $SD = 1,67$) und Mot_Aut_Goal_1 ($\mu = 4,86$, $SD = 1,69$). Die relativ hohen Standardabweichungen dieser Items weisen auf eine größere Heterogenität in den Antworten hin. Am unteren Ende der Skala finden sich die Items zur Adoptionsintention (Intention_1: $\mu = 3,05$, $SD = 2,02$; Intention_2: $\mu = 3,11$, $SD = 2,09$) sowie bestimmte Items der physischen und sozialen Gelegenheit (Opp_Soc_Sup_1: $\mu = 3,05$, $SD = 1,03$; Opp_Phy_Res_1: $\mu = 3,40$, $SD = 2,24$; Opp_Phy_Res_3: $\mu = 3,44$, $SD = 2,01$).

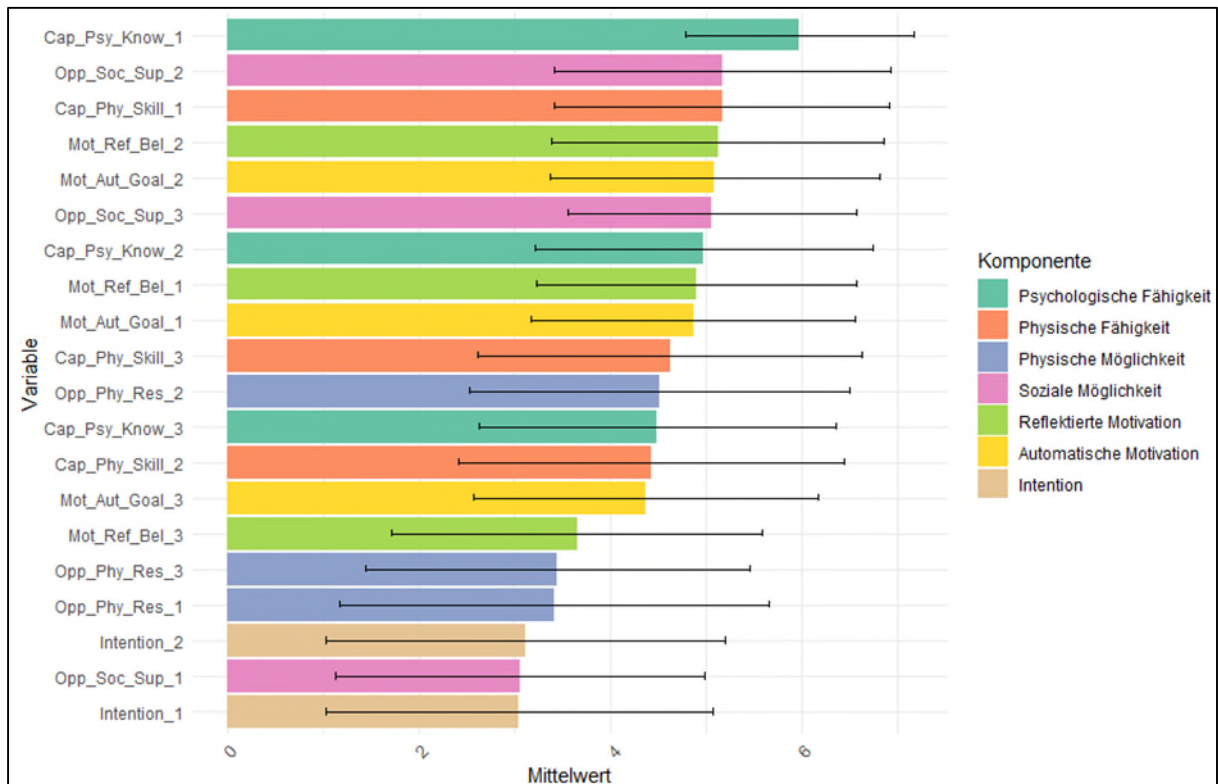


Abb. 1: Mittelwerte der COM-B-Items und Items zur Intention zur Nutzung von Technologien zur teilflächenspezifischen Stickstoffdüngung. Die Items sind nach dem Grad der höchsten durchschnittlichen Zustimmung geordnet. Die Bewertung erfolgte anhand einer 7-Punkte-Likert-Skala (1 = stimme überhaupt nicht zu; 7 = stimme voll und ganz zu). Die Fehlerbalken zeigen die Standardabweichung. (N = 303)

Tab. 5:

Deskriptive Statistiken der COM-B-Items und Intention der Nutzung von Technologien zur teilflächenspezifischen Stickstoffdüngung. (N = 303)

ID	μ^e	SD	Schiefe	Kurtosis	Min	Max
Cap_Psy_Know_1 ^a	5,97	1,19	-1,50	2,47	1	7
Cap_Psy_Know_2 ^a	4,97	1,77	-0,75	-0,40	1	7
Cap_Psy_Know_3 ^a	4,49	1,87	-0,37	-0,85	1	7
Cap_Phy_Skill_1 ^a	5,16	1,75	-0,99	0,15	1	7
Cap_Phy_Skill_2 ^a	4,42	2,01	-0,40	-1,09	1	7
Cap_Phy_Skill_3 ^a	4,62	2,01	-0,51	-0,97	1	7
Opp_Phy_Res_1 ^b	3,40	2,24	0,34	-1,39	1	7
Opp_Phy_Res_2 ^b	4,50	1,98	-0,33	-1,10	1	7
Opp_Phy_Res_3 ^b	3,44	2,01	0,30	-1,15	1	7
Opp_Soc_Sup_1 ^b	3,05	1,93	0,71	-0,57	1	7
Opp_Soc_Sup_2 ^b	5,17	1,75	-0,84	-0,24	1	7
Opp_Soc_Sup_3 ^b	5,05	1,51	-0,65	-0,05	1	7
Mot_Aut_Goal_1 ^c	4,86	1,69	-0,58	-0,45	1	7
Mot_Aut_Goal_2 ^c	5,08	1,72	-0,79	-0,20	1	7
Mot_Aut_Goal_3 ^c	4,36	1,79	-0,29	-0,83	1	7
Mot_Ref_Bel_1 ^c	4,89	1,67	-0,63	-0,35	1	7
Mot_Ref_Bel_2 ^c	5,12	1,74	-0,84	-0,02	1	7
Mot_Ref_Bel_3 ^c	3,65	1,93	0,10	-1,13	1	7
Intention_1 ^d	3,05	2,02	0,56	-0,96	1	7
Intention_2 ^d	3,11	2,09	0,58	-0,99	1	7

^a COM-B-Komponente Fähigkeit

^b COM-B-Komponente Möglichkeit

^c COM-B-Komponente Motivation

^d Komponente Intention

^e Die Bewertung erfolgte anhand einer 7-Punkte-Likert-Skala (1 = stimme überhaupt nicht zu; 7 = stimme voll und ganz zu)

μ = Mittelwert; SD = Standardabweichung

Abbildung 2 visualisiert die prozentuale Verteilung der Antworten für alle COM-B-Items sowie für die Intensionsitems auf einer 7-Punkte-Likert-Skala (1 = stimme überhaupt nicht zu; 7 = stimme voll und ganz zu). Es ist zu erkennen, dass die Items in ihren Antwortverteilungen deutliche Unterschiede aufweisen. Die höchsten Anteile für "stimme überhaupt nicht zu" finden sich bei Intention_1 (36,0 %), Intention_2 (35,0 %) und Opp_Phy_Res_1 (33,0 %). Die höchsten Anteile für "stimme voll und ganz zu" zeigen sich bei Cap_Psy_Know_1 (39,9 %), Opp_Soc_Sup_2 (28,1 %) und Mot_Ref_Bel_2 (27,7 %).

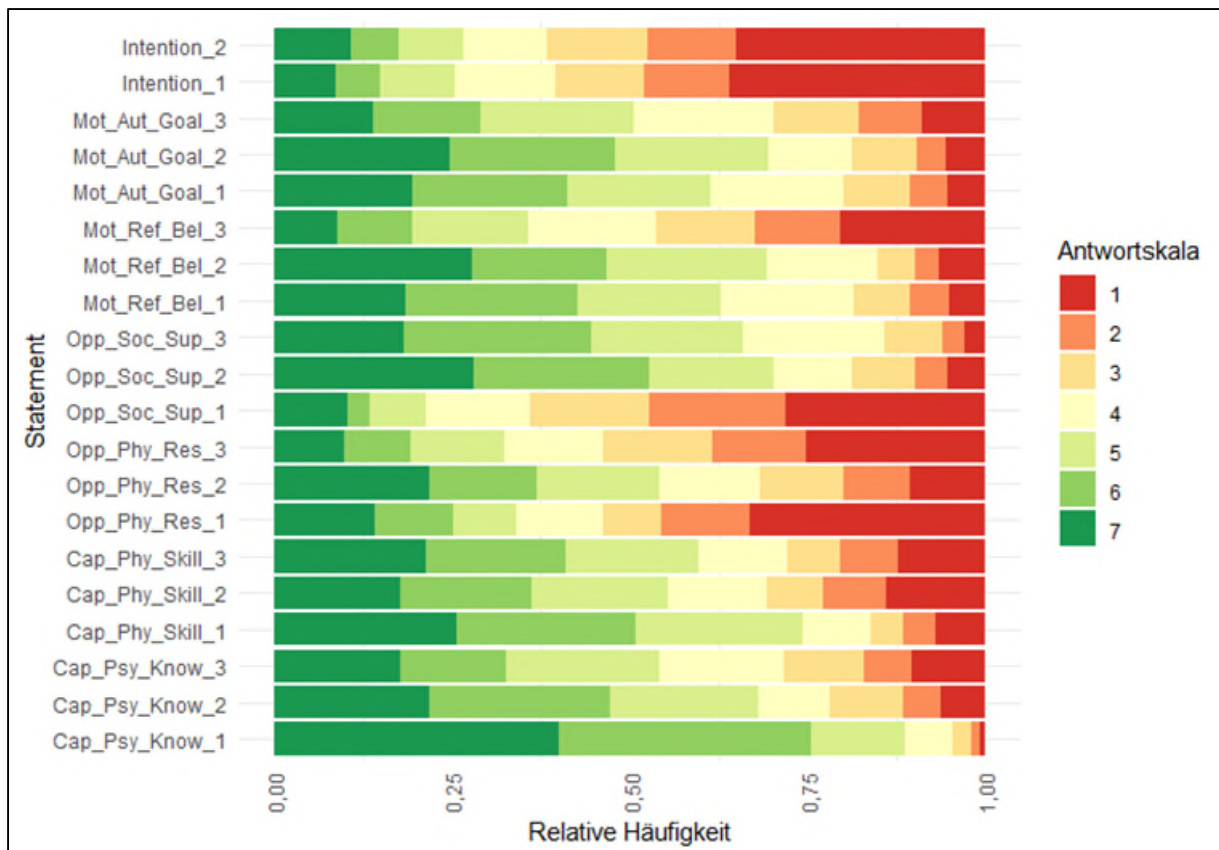


Abb. 2: Verteilung der Antworten bei der Bewertung der COM-B-Items und den Items zur Intention der Nutzung von Technologien zur teilflächenspezifischen Stickstoffdüngung.

Die Bewertung erfolgte anhand einer 7-Punkte-Likert-Skala (1 = stimme überhaupt nicht zu; 7 = stimme voll und ganz zu). (N = 303)

Die Analyse der Korrelationen zwischen den aggregierten COM-B-Komponenten und der Intention zur Nutzung teilflächenspezifischer Stickstoffdüngungstechnologie ergab durchweg positive Zusammenhänge, wie im Folgenden erläutert wird. Zwischen den verschiedenen Komponenten bestehen moderate bis starke positive Korrelationen mit Werten zwischen 0,52 und 0,63. Die stärkste Korrelation besteht zwischen Fähigkeit und Möglichkeit (0,63). Die Korrelationen zwischen Möglichkeit und Intention sowie zwischen Möglichkeit und Motivation betragen jeweils 0,60. Zwischen Motivation und Intention liegt die Korrelation bei 0,57, während zwischen Fähigkeit und Motivation (0,55) sowie zwischen Fähigkeit und Intention (0,52) etwas niedrigere, aber immer noch deutlich positive Zusammenhänge bestehen. Diese durchgehend positiven und moderaten bis starken Korrelationen deuten auf wechselseitige Abhängigkeiten zwischen allen Komponenten des COM-B-Modells und der Adoptionsintention hin.

3.3 Implikationen der COM-B-Ergebnisse

Die deskriptiven Ergebnisse des COM-B-Modells zur Adoption teilflächenspezifischer Stickstoffdüngungstechnologien offenbaren ein differenziertes Bild der Adoptionsbarrieren und -treiber bei landwirtschaftlichen Betrieben. Diese Erkenntnisse ermöglichen die Ableitung konkreter Implikationen für Praxis, Politik und Forschung.

3.3.1 Bewertung der Items

Die Analyse der Mittelwerte der einzelnen Items erlaubt differenzierte Einblicke in die verschiedenen Aspekte der COM-B-Komponenten und ihre Bedeutung für die Adoption teilflächenspezifischer Stickstoffdüngungstechnologien.

3.3.1.1 Psychologische Fähigkeit

Das Item Cap_Psy_Know_1 ("Ich denke, ich verstehe die Grundprinzipien der variablen Stickstoffdüngung") weist mit einem Mittelwert von 5,97 den höchsten Wert im gesamten Modell auf. Dies zeigt, dass die Landwirtinnen und Landwirte ein sehr hohes Vertrauen in ihr grundlegendes Verständnis der Grundprinzipien der teilflächenspezifischen Stickstoffdüngung haben. Bei Cap_Psy_Know_2 ("Ich glaube, ich kann Applikationskarten interpretieren und anwenden") mit einem Mittelwert von 4,97 ist die Zustimmung noch immer positiv, aber bereits deutlich geringer. Noch niedriger fällt die Zustimmung bei Cap_Psy_Know_3 ("Ich denke, ich weiß, wie ich Daten aus Fernerkundung oder Sensoren nutzen kann") mit einem Mittelwert von 4,49 aus. Diese Abstufung verdeutlicht, dass die Landwirtinnen und Landwirte zwar überzeugt sind, die grundlegenden Konzepte zu verstehen, aber weniger Vertrauen in ihre Fähigkeiten haben, wenn es um die konkrete Nutzung komplexerer Datenquellen und Anwendungen geht.

3.3.1.2 Physische Fähigkeit

Bei den Items zur physischen Fähigkeit zeigt Cap_Phy_Skill_1 ("Ich nehme an, ich bin in der Lage, die Geräte für variable Stickstoffdüngung zu bedienen") mit einem Mittelwert von 5,16 eine deutlich positive Selbsteinschätzung der grundlegenden Bedienungsfähigkeiten. Die Werte für Cap_Phy_Skill_2 ("Ich bin der Meinung, ich kann die Software zur Erstellung von Applikationskarten nutzen") mit einem Mittelwert von 4,42 und Cap_Phy_Skill_3 ("Ich kann einen Düngerstreuer oder eine Feldspritze gemäß Applikationskarten einstellen") mit einem Mittelwert von 4,62 fallen moderater aus. Bemerkenswert ist, dass die Landwirtinnen und Landwirte ihre Fähigkeit zur Gerätebedienung höher einschätzen als ihre Softwarekompetenz, was auf eine mögliche technologische Hürde im digitalen Bereich hindeutet.

3.3.1.3 Physische Möglichkeit

Die Items zur physischen Möglichkeit zeigen die deutlichsten Defizite. Opp_Phy_Res_1 ("Ich habe Zugang zu den Technologien für die variable Stickstoffdüngung") mit einem Mittelwert von 3,41 deutet auf erhebliche Zugangsprobleme zur notwendigen Technologie hin. Auch Opp_Phy_Res_3 ("Mir stehen finanzielle Mittel für Investitionen in die Technologie zur Verfügung") mit einem Mittelwert von 3,44 zeigt deutliche finanzielle Einschränkungen. Lediglich bei Opp_Phy_Res_2 ("Ich glaube, meine Felder sind für den Einsatz variabler Stickstoffdüngung geeignet") mit einem Mittelwert von 4,51 zeigt sich eine moderatere Zustimmung. Diese Werte verdeutlichen, dass trotz vorhandener Fähigkeiten

und grundsätzlicher Eignung der Felder die materiellen und finanziellen Voraussetzungen oft als unzureichend wahrgenommen werden.

3.3.1.4 Soziale Möglichkeit

Die Items zur sozialen Möglichkeit zeigen die größte Diskrepanz innerhalb einer Komponente. Opp_Soc_Sup_1 ("Andere Landwirtinnen und Landwirte in meinem Umfeld nutzen diese Technik bereits") weist mit einem Mittelwert von 3,06 den zweitniedrigsten Wert aller Items auf. Dies deutet auf eine geringe Verbreitung der Technologie im sozialen Umfeld hin, was die soziale Bestätigung und den Erfahrungsaustausch erschwert. Im Gegensatz dazu werden Opp_Soc_Sup_2 ("Es gibt Experten, die mich bei der Implementierung unterstützen können") mit einem Mittelwert von 5,17 und Opp_Soc_Sup_3 ("Die landwirtschaftliche Gemeinschaft sieht variable Stickstoffdüngung positiv") mit einem Mittelwert von 5,06 sehr positiv bewertet. Dies zeigt, dass zwar Expertenwissen und eine positive Grundhaltung in der landwirtschaftlichen Gemeinschaft vorhanden sind, aber die konkrete Anwendung durch Berufskollegen im direkten Umfeld noch nicht weit verbreitet ist.

3.3.1.5 Reflektierte Motivation

Bei der reflektierten Motivation zeigen Mot_Ref_Bel_1 ("Ich bin überzeugt, dass diese Methode meine Düngung effizienter macht") mit einem Mittelwert von 4,90 und Mot_Ref_Bel_2 ("Ich glaube, dass variable Stickstoffdüngung umweltfreundlicher ist") mit einem Mittelwert von 5,12 positive Überzeugungen hinsichtlich Effizienz und Umweltfreundlichkeit. Demgegenüber wird Mot_Ref_Bel_3 ("Ich denke, dass diese Technik profitabel ist") mit einem Mittelwert von 3,65 deutlich skeptischer bewertet. Diese Diskrepanz ist besonders aufschlussreich, da sie zeigt, dass die Landwirtinnen und Landwirte zwar von den technischen und ökologischen Vorteilen überzeugt sind, aber erhebliche Zweifel an der wirtschaftlichen Rentabilität haben.

3.3.1.6 Automatische Motivation

Die Items zur automatischen Motivation zeigen ein differenziertes Bild. Mot_Aut_Goal_1 ("Ich vertraue darauf, dass variable Stickstoffdüngung effizienter ist als konventionelle Methoden") mit $\mu = 4,86$ und besonders Mot_Aut_Goal_2 ("Die Möglichkeit, Stickstoff präzise auszubringen, begeistert mich") mit einem Mittelwert von 5,08 deuten auf ein grundsätzliches Vertrauen und sogar Begeisterung für die Technologie hin. Bei Mot_Aut_Goal_3 ("Ich fühle mich sicher im Umgang mit den Technologien") fällt der Mittelwert mit 4,37 etwas ab. Dies deutet darauf hin, dass ein grundsätzliches Interesse und eine positive emotionale Einstellung zur präzisen Stickstoffausbringung bestehen, aber noch Unsicherheiten im konkreten Technologieumgang vorliegen.

3.3.1.7 Intention

Die Intensionsitems weisen mit Mittelwerten von 3,05 (Intention_1) und 3,11 (Intention_2) die niedrigsten Werte im gesamten Modell auf. Diese liegen deutlich unter dem Skalenmittelpunkt und offenbaren eine generell geringe Adoptionsbereitschaft. Die hohen Standardabweichungen (SD = 2,02 und 2,09) deuten jedoch auf eine erhebliche Heterogenität in der Stichprobe hin.

3.3.2 Diskrepanz zwischen Verständnis, Begeisterung und Handlungsbereitschaft

Eine zentrale Erkenntnis aus dieser detaillierten Analyse ist die bemerkenswerte Diskrepanz zwischen dem sehr hohen selbsteingeschätzten Grundverständnis (Cap_Psy_Know_1: $\mu = 5,97$), der Begeisterung für präzise Stickstoffausbringung (Mot_Aut_Goal_2: $\mu = 5,08$) und der sehr niedrigen Adoptionsintention (Intention_1: $\mu = 3,05$; Intention_2: $\mu = 3,11$). Diese Kluft lässt sich nicht durch grundsätzlich mangelndes Wissen oder fehlendes Interesse erklären. Vielmehr deuten die Ergebnisse auf konkrete Barrieren hin, insbesondere:

- fehlende bzw. nicht ausreichende Fertigkeiten für die Datenakquise und -nutzung (Cap_Phy_Skill_3: $\mu = 4,62$)
- Zweifel an der Profitabilität (Mot_Ref_Bel_3: $\mu = 3,65$)
- mangelnde finanzielle Ressourcen für die notwendigen Investitionen (Opp_Phy_Res_3: $\mu = 3,44$)
- fehlender Zugang zu den erforderlichen Technologien (Opp_Phy_Res_1: $\mu = 3,41$) und
- geringe Verbreitung im direkten beruflichen Umfeld, was Erfahrungsaustausch limitiert (Opp_Soc_Sup_1: $\mu = 3,06$).

Diese Erkenntnisse für die teilflächenspezifische Stickstoffdüngung widersprechen bis zu einem gewissen Grad der häufig in der Praxis vertretenen Annahme, dass in diesem Fall vorrangig allgemeine Bildungs- und Schulungsmaßnahmen zur Förderung der Technologieadoption notwendig seien. Es fehlt an technischen Fähigkeiten für Teilprozesse (z. B. Erstellung von Applikationskarten; Cap_Psy_Know_3: $\mu = 4,49$; Cap_Phy_Skill_2: $\mu = 4,42$) und nicht an Wissen über teilflächenspezifische Düngung im Allgemeinen. Zudem deuten die Ergebnisse in diesem Fall darauf hin, dass andere Maßnahmen wie verbesserte Zugangsmöglichkeiten zu den Technologien, finanzielle Unterstützungsprogramme, stärkere Demonstration der Wirtschaftlichkeit und die Förderung des Erfahrungsaustauschs zwischen Landwirtinnen und Landwirten wirksam sein könnten.

3.3.3 Bedeutung der physischen Möglichkeiten

Die physischen Möglichkeiten (*opportunity_score*) weisen insgesamt den niedrigsten Mittelwert unter den drei COM-B-Komponenten auf (4,11). Insbesondere die Items Opp_Phy_Res_1 und Opp_Phy_Res_3 zeigen mit Mittelwerten von 3,41 bzw. 3,44 deutliche Defizite. Die stark linksschiefen Verteilungen dieser Items mit einem hohen Anteil an "stimme überhaupt nicht zu"-Antworten (33,0 % bzw. 25,1 %) unterstreichen die Problematik der strukturellen und physischen Rahmenbedingungen.

Dies impliziert, dass infrastrukturbezogene Maßnahmen und die Verbesserung der Ressourcenverfügbarkeit zentrale Ansatzpunkte zur Förderung der Technologieadoption sein könnten. Die moderate bis starke Korrelation (0,60) zwischen *opportunity_score* und *intention_score* unterstützt diese Schlussfolgerung.

3.3.4 Komplexität der Motivationskomponente

Die Analyse der Motivationskomponente zeigt ebenfalls ein vielschichtiges Bild. Während Mot_Ref_Bel_1, Mot_Ref_Bel_2, Mot_Aut_Goal_1 und Mot_Aut_Goal_2 relativ hohe Mittelwerte aufweisen (zwischen 4,86 und 5,12), fallen Mot_Ref_Bel_3 und Mot_Aut_Goal_3 mit deutlich niedrigeren Mittelwerten ab (3,65 bzw. 4,37). Dies deutet darauf hin, dass bestimmte Überzeugungsaspekte und Zielorientierungen bereits positiv ausgeprägt sind, während andere Schwächen aufweisen. Die moderate Korrelation zwischen *motivation_score* und *intention_score* (0,57) unterstreicht die Bedeutung motivationaler Faktoren für die Adoptionsbereitschaft. Interventionen zur Förderung der Motivation sollten daher gezielt auf die identifizierten Schwachpunkte ausgerichtet sein, während gleichzeitig auf bestehenden Stärken aufgebaut werden kann.

3.3.5 Interaktion zwischen den COM-B-Komponenten

Die durchweg positiven Korrelationen zwischen allen COM-B-Komponenten (0,55 bis 0,63) verdeutlichen deren wechselseitige Abhängigkeiten. Diese Interdependenz impliziert, dass isolierte Maßnahmen, die nur auf eine einzelne Komponente abzielen, möglicherweise weniger wirksam sein könnten als integrierte Ansätze, die mehrere Komponenten gleichzeitig adressieren. Besonders hervorzuheben ist die stärkste Korrelation zwischen Fähigkeit und Möglichkeit, die darauf hindeutet, dass Fähigkeiten und Möglichkeiten sich gegenseitig beeinflussen könnten. Dies könnte bedeuten, dass verbesserte physische und soziale Möglichkeiten nicht nur direkt die Adoption fördern, sondern auch indirekt über eine Stärkung der wahrgenommenen Fähigkeiten wirken.

3.4 Ergebnisse der qualitativen Analyse

Die systematische Analyse der offenen Antworten aus der Befragung zeigt ein klares Bild der Hindernisse, die Landwirtinnen und Landwirte bei der Implementierung teilflächenspezifischer Stickstoffdüngungstechniken wahrnehmen. An erster Stelle stehen mit deutlichem Abstand finanzielle Bedenken, die von den meisten der Befragten genannt wurden. Diese Kategorie umfasst verschiedene wirtschaftliche Aspekte: hohe Anschaffungskosten für die benötigte Technologie, ein unsicheres oder unvorteilhaftes Kosten-Nutzen-Verhältnis, mangelnde finanzielle Ressourcen für Investitionen sowie Bedenken hinsichtlich der Amortisationszeit. Viele Landwirtinnen und Landwirte äußerten explizit Zweifel, ob sich die Investition unter den aktuellen wirtschaftlichen Rahmenbedingungen rechnen würde.

Die Betriebsstruktur und Flächengröße bilden den zweithäufigsten Hinderungsgrund. Landwirtinnen und Landwirte mit kleinen oder stark parzellierten Flächen betrachten ihre Betriebsstruktur oft als ungeeignet für diese Technologie. Sie betonen, dass bei einer geringen Betriebsgröße oder kleinteiligen Flächenstrukturen der technische und finanzielle Aufwand in keinem angemessenen Verhältnis zum potenziellen Nutzen steht. Zudem wurden Bedenken geäußert, dass bei homogenen Bodenverhältnissen der Mehrwert teilflächenspezifischer Düngung begrenzt sein könnte.

Technische Hürden wurden ebenfalls von den Teilnehmenden als wesentliches Hindernis identifiziert. Hierzu zählen fehlende oder nicht kompatible Geräte, Bedenken bzgl. der Komplexität der Systeme sowie die Herausforderungen bei der Integration in bestehende Maschinenparks. Einige Landwirtinnen und Landwirte verwiesen auf die Notwendigkeit, ältere, aber noch funktionsfähige Geräte vorzeitig ersetzen zu müssen, was zusätzliche Kosten verursacht. Auch wurde die technische Handhabung als anspruchsvoll eingeschätzt, insbesondere die Erstellung und Verarbeitung von Applikationskarten.

Wissensbezogene Barrieren umfassen mangelnde Erfahrung mit der Technologie, fehlendes Fachwissen zur optimalen Nutzung sowie Unsicherheiten bzgl. der Beratungs- und Schulungsmöglichkeiten. Einige Befragte äußerten explizit Zweifel, ob die Technologie tatsächlich bessere Ergebnisse liefern könne als ihre langjährige Erfahrung und Feldkenntnis.

Alter und Nachfolgeproblematik spielen ebenfalls eine Rolle, insbesondere bei Betriebsleitenden, die kurz vor dem Ruhestand stehen und keinen gesicherten Hofnachfolger haben. Diese Landwirtinnen und Landwirte sehen oftmals keinen Anreiz mehr für größere Investitionen. Generationenbedingte Herausforderungen im Umgang mit neuen Technologien wurden ebenfalls thematisiert.

Weitere identifizierte Hindernisse umfassen Bedenken hinsichtlich der Zuverlässigkeit der Systeme, bürokratische und dokumentarische Mehrbelastungen sowie diverse individuelle Bedenken, die unter "Sonstiges" zusammengefasst wurden. Hierzu zählen etwa auch Zweifel am ökologischen Nutzen, die Witterungsabhängigkeit der Technologie (z. B. bei Bewölkung und Satellitenbildern) sowie potenzielle negative Auswirkungen auf den Ertrag.

3.5 Handlungsempfehlungen

Basierend auf den Ergebnissen zum COM-B-Modell und der offenen Frage lassen sich folgende Handlungsempfehlungen für unterschiedliche Akteure ableiten:

Für Berater und Bildungseinrichtungen:

- Fokussierung auf spezifische Wissenslücken bei der Interpretation von Applikationskarten und der Nutzung von Fernerkundungs- und Sensordaten statt allgemeiner Grundlagenbildung zur teilflächenspezifischen Stickstoffdüngung,
- Entwicklung anwendungsorientierter Schulungsformate zur Stärkung der Softwarekompetenz mit praktischen Übungen zur Gerätekonfiguration,

- Etablierung strukturierter Peer-Learning-Formate bei Feldtagen oder Messen, um die geringe Verbreitung im beruflichen Umfeld zu kompensieren und
- Konzeption von Demonstrationsnetzwerken mit Vorzeigebetrieben unterschiedlicher Größe und Ausrichtung zur Vermittlung erfolgreicher Praxisbeispiele und Demonstration der Wirtschaftlichkeit

Für Politik und Verbände:

- Entwicklung gezielter Fördermaßnahmen zur Überwindung struktureller Barrieren,
- Verbesserung der technischen Infrastruktur und
- Schaffung niedrigschwelliger Technologiezugänge durch Maschinenringe und Förderung regionaler Beratungsstrukturen mit fachkundigen Ansprechpartnern sowie

Für Technologieanbieter:

- Berücksichtigung der Heterogenität landwirtschaftlicher Betriebe bei der Produktbewerbung,
- Verbesserung des Kundenservice und der technischen Unterstützung nach dem Kauf (After-Sales-Support),
- Demonstration der Wirtschaftlichkeit unter verschiedenen (Betriebs-)Bedingungen und
- Konzeption benutzerfreundlicherer Software-Interfaces zur Reduzierung der Unsicherheit im Technologieumgang.

3.6 Deskriptiven Ergebnisse zur Zahlungsbereitschaft für die Erstellung satellitengestützter Stickstoffdünger-Applikationskarten

3.6.1 Verteilung der Zahlungsbereitschaft

Die Ergebnisse zur Zahlungsbereitschaft für die Bereitstellung satellitengestützter Stickstoffdünger-Applikationskarten sind in Tabelle 6 dargestellt. Die Verteilung zeigt unterschiedliche Präferenzen der befragten Landwirtinnen und Landwirte bzgl. ihrer Zahlungsbereitschaft.

Mit 23,1 % (70 Befragte) entfällt der größte Anteil der Stichprobe auf die mittlere Preiskategorie von 3,01 bis 6 €/ha und Jahr. Die angrenzenden Preiskategorien 6,01 bis 9 €/ha und Jahr mit 18,2 % (55 Befragte) sowie 9,01 bis 12 €/ha und Jahr mit 17,5 % (53 Befragte) sind ebenfalls relativ stark vertreten.

Ein nennenswerter Anteil von 15,2 % (46 Befragte) äußerte keine Zahlungsbereitschaft (0 €/ha und Jahr) für diesen Service. Die niedrigste positive Preiskategorie von 0,01 bis 3 €/ha und Jahr wurde von 13,2 % (40 Befragte) der Teilnehmenden gewählt. Die höheren Preissegmente sind deutlich schwächer besetzt, mit jeweils rund 6 % der Befragten in den Kategorien 12,01-15 €/ha und Jahr (6,27 %, 19 Befragte) und mehr als 15 €/ha und Jahr (6,6 %, 20 Befragte).

Tabelle 6:**Zahlungsbereitschaft für die Erstellung satellitengestützter Stickstoffdünger-Applikationskarten.**

Kategorie	Häufigkeit	Prozent
0 €/ha und Jahr	46	15,2
0,01 – 3 €/ha und Jahr	40	13,2
3,01 – 6 €/ha und Jahr	70	23,1
6,01 – 9 €/ha und Jahr	55	18,2
9,01 – 12 €/ha und Jahr	53	17,5
12,01 – 15 €/ha und Jahr	19	6,2
Mehr als 15 €/ha und Jahr	20	6,6

3.6.2 Implikationen der Ergebnisse zur Zahlungsbereitschaft

Die Zahlungsbereitschaftsanalyse liefert wichtige Erkenntnisse für verschiedene Akteure im Bereich der teilflächenspezifischen Stickstoffdüngung. Die moderate Zahlungsbereitschaft der Landwirtinnen und Landwirte mit einer Konzentration im unteren bis mittleren Preissegment korrespondiert mit den zuvor identifizierten Barrieren im COM-B-Modell, insbesondere den begrenzten finanziellen Ressourcen (Opp_Phy_Res_3) und den Zweifeln an der Profitabilität (Mot_Ref_Bel_3).

Für Anbieter satellitengestützter Applikationskarten bedeutet dies, dass ein Preispunkt zwischen 0 und 6 €/ha und Jahr für etwa die Hälfte der Landwirtinnen und Landwirte akzeptabel wäre. Ein Preis über 12 €/ha und Jahr würde hingegen nur von einer kleinen Minderheit der Betriebe (weniger als 13 %) akzeptiert werden. Die Vermittlung konkreter Anwendungsbeispiele mit nachgewiesenen Einsparungen bei gleichbleibenden oder verbesserten Erträgen durch Hersteller und Berater könnte die Zahlungsbereitschaft erhöhen und die wahrgenommene Wirtschaftlichkeitslücke schließen. Es ist jedoch zu betonen, dass die auf dem Markt bestehenden Angebote für Applikationskarten in dem Preissegment liegen, was von etwa 50 % der Landwirtinnen und Landwirte akzeptiert wird.

4 Fazit

Ziel der Studie war die Untersuchung der Faktoren, die die Adoption teilflächenspezifischer Stickstoffdüngungstechnologien in der landwirtschaftlichen Praxis beeinflussen. Dazu wurde eine telefonische Befragung von 343 landwirtschaftlichen Betriebsleitenden durchgeführt, wovon die Ergebnisse der 303 konventionell wirtschaftenden Betriebe berücksichtigt wurden, und auf das COM-B-Modell zurückgegriffen. Durch die differenzierte Analyse der Komponenten Fähigkeit, Möglichkeit und Motivation werden Adoptionsbarrieren identifiziert und gezielte Handlungsempfehlungen abgeleitet. Ergänzend wurde die Zahlungsbereitschaft für satellitengestützte Stickstoffdünger-Applikationskarten als wichtiger erster Schritt im Rahmen der teilflächenspezifischen Stickstoffdüngung erhoben, um konkrete Preisvorstellungen und ökonomische Umsetzungsmöglichkeiten zu erfassen. Zusätzlich wurde im Rahmen einer offenen Frage erhoben, welche Gründe gegen die Verwendung teilflächenspezifischer Stickstoffdüngung sprechen.

Die Ergebnisse des COM-B-Modells zeigen, dass sich die Einstellung zur teilflächenspezifischen Stickstoffdüngungstechnologie aus einem Zusammenspiel von Fähigkeit, Möglichkeit und Motivation zusammensetzt. Die deutlichen Unterschiede zwischen den einzelnen Komponenten und Items verdeutlichen, dass pauschale Fördermaßnahmen ohne Berücksichtigung der spezifischen Barrieren wenig zielführend sein dürften. Vielmehr bedarf es eines differenzierten Ansatzes, der die spezifischen Barrieren berücksichtigt und gezielt auf diese identifizierten Barrieren eingeht, darunter der wahrgenommene mangelnde Zugang zu den notwendigen Technologien. Besonders die Diskrepanz zwischen den relativ hohen Fähigkeitswerten und der niedrigen Adoptionsintention unterstreicht, dass allgemeine Bildungs- und Schulungsansätze allein nicht ausreichen werden, um die Technologieadoption in diesem Fall zu steigern – eher sollten diese Ansätze auf die technischen Fertigkeiten im Speziellen fokussieren. Zudem sollten strukturelle Rahmenbedingungen, die Verfügbarkeit und der Zugang zu technischen Ressourcen sowie der Nachweis der Wirtschaftlichkeit stärker in den Fokus rücken. Finanzielle Unterstützungsprogramme könnten dabei eine wichtige Rolle spielen, um die als wesentliche Barriere identifizierten begrenzten finanziellen Mittel zu adressieren. Ein integrierter Ansatz, der die Interdependenzen zwischen den COM-B-Komponenten berücksichtigt, verspricht die größten Erfolgsaussichten bei der Förderung der Adoption teilflächenspezifischer Stickstoffdüngungstechnologien in der landwirtschaftlichen Praxis.

Die Analyse der Zahlungsbereitschaft unterstreicht die ökonomischen Herausforderungen bei der Technologieadoption. Mit einer Konzentration der Zahlungsbereitschaft für die Erstellung von satellitenbasierten Stickstoff-Applikationskarten im Preissegment zwischen 0 und 6 €/ha und Jahr wird erneut deutlich, dass auch preisliche Faktoren eine entscheidende Rolle spielen, wobei zu betonen ist, dass die Zahlungsbereitschaft durchaus im Rahmen der am Markt angebotenen Dienstleistungen liegt.

Aus diesen Erkenntnissen lassen sich differenzierte Handlungsempfehlungen für verschiedene Akteure ableiten: Für Berater und Bildungseinrichtungen empfiehlt sich die Fokussierung auf spezifische Wissenslücken sowie die Etablierung von Peer-Learning-Formaten und Demonstrationsnetzwerken. Politik und Verbände sollten gezielte Fördermaßnahmen zur Überwindung struktureller Barrieren entwickeln und die technische Infrastruktur verbessern. Technologieanbieter sollten die Heterogenität landwirtschaftlicher Betriebe berücksichtigen, den After-Sales-Support verbessern und benutzerfreundlichere Softwarelösungen konzipieren.

Ein integrierter Ansatz, der die Interdependenzen zwischen den COM-B-Komponenten berücksichtigt, verspricht die größten Erfolgsaussichten bei der Förderung der Adoption teilflächenspezifischer Stickstoffdüngungstechnologien in der landwirtschaftlichen Praxis. Dies ist insbesondere vor dem Hintergrund aktueller umweltpolitischer Zielsetzungen zur Reduzierung von Stickstoffeinträgen in die Umwelt von hoher gesellschaftlicher Relevanz.

Die Studie erlaubt zudem einen Ausblick auf zukünftige Forschungsvorhaben: Das COM-B-Modell könnte in einer weiteren Analyse im Rahmen eines Strukturgleichungsmodells zur Quantifizierung des Einflusses der einzelnen Elemente auf die Intention weiter untersucht werden. Zudem wäre eine

detailliertere Analyse der Zahlungsbereitschaft in Abhängigkeit von betrieblichen Faktoren und regionalen Bedingungen wertvoll, um noch zielgenauere Handlungsempfehlungen ableiten zu können.

Zusammenfassung

Die vorliegende Studie untersucht Faktoren der Entscheidungsfindung zur teilflächenspezifischen Stickstoffdüngung mittels des COM-B-Modells (Capability, Opportunity, Motivation, Behaviour) sowie die Zahlungsbereitschaft für satellitengestützte Applikationskarten. Basierend auf einer telefonischen Befragung von 303 Leitenden konventionell wirtschaftender landwirtschaftlicher Betriebe, die von Dezember 2024 bis Januar 2025 in Deutschland stattfand, wurden Adoptionsbarrieren und -treiber identifiziert. Die Ergebnisse zeigen eine auffällige Diskrepanz zwischen dem hohen selbsteingeschätzten Grundverständnis der Technologie und der überraschend niedrigen Adoptionsintention. Als zentrale Barrieren wurden identifiziert: unzureichender Zugang zu Technologien, begrenzte finanzielle Ressourcen, geringe Verbreitung im beruflichen Umfeld sowie Zweifel an der Wirtschaftlichkeit. Die physischen Möglichkeiten erwiesen sich als schwächste COM-B-Komponente, während die Fähigkeiten am stärksten ausgeprägt waren. Die Zahlungsbereitschaftsanalyse für die Erstellung von satellitenbasierten Stickstoff-Applikationskarten ergab eine Konzentration im unteren Preissegment (weniger als 6 €/ha und Jahr), wobei nur etwa 50 % der Landwirtinnen und Landwirte bereit waren, bis zu 6 €/ha und Jahr zu zahlen. Diese Ergebnisse bestätigen die im COM-B-Modell identifizierten finanziellen Barrieren. Die Studie widerlegt in diesem speziellen Fall die Annahme, dass vorrangig allgemeine Bildungs- und Schulungsmaßnahmen zur Technologieadoption notwendig bzw. alleine ausreichend seien. Auf Basis der Ergebnisse lassen sich differenzierte Interventionen ableiten, die gezielt strukturelle und ökonomische Barrieren adressieren: verbesserte Technologiezugänge, Demonstrationsnetzwerke und Analyseinstrumente zur besseren Beurteilung wirtschaftlicher Effekte. Die Studie liefert wichtige Erkenntnisse, die für verschiedene Interessensgruppen von Bedeutung sind.

Summary

This study examines decision-making factors for variable nitrogen fertilization in agriculture using the COM-B model (Capability, Opportunity, Motivation, Behaviour) and analyses willingness to pay for satellite-based application maps. Based on telephone interviews with 303 conventional farm managers in Germany (December 2024 – January 2025), the results reveal a striking discrepancy: Despite high self-assessed understanding of the technology, adoption intention is surprisingly low. Key barriers identified include: insufficient technology access, limited financial resources, low prevalence in the professional environment, and doubts about economic profitability. Physical opportunities proved to be the weakest COM-B component, while capabilities were most pronounced. The willingness-to-pay analysis showed a concentration in the lower price range (below 6 €/ha per year), with only approximately 50 % of farmers willing to pay up to 6 €/ha per year, confirming the financial barriers identified in the COM-B model. In this specific case, the findings contradict the assumption that

primarily general educational measures are necessary for technology adoption. Instead, a combined approach is needed: teaching specific technological skills while simultaneously addressing structural and economic barriers through improved technology access, market-appropriate pricing models, and demonstration networks for better assessment of economic effects. The results are of interest to various stakeholders in the field of precision farming.

Literaturverzeichnis

Adrian, A. M., Norwood, S. H., & Mask, P. L. (2005). Producers' perceptions and attitudes toward precision agriculture technologies. *Computers and Electronics in Agriculture*, 48(3), 256-271.

<https://doi.org/10.1016/j.compag.2005.04.004>

Anthropic (2025). Claude. Online verfügbar unter www.claude.ai, zuletzt geprüft am 30.04.2025.

Awater-Esper, S. (2026). Kehren die Roten Gebiete mit scharfen Auflagen zurück?. Online verfügbar unter: <https://www.topagrar.com/management-und-politik/news/kehren-die-roten-gebiete-mit-scharfen-auflagen-zuruck-20026291.html>

Balafoutis, A., Beck, B., Fountas, S., Vangeyte, J., Van der Wal, T., Soto, I., ... & Eory, V. (2017). Precision agriculture technologies positively contributing to GHG emissions mitigation, farm productivity and economics. *Sustainability*, 9(8), 1339. <https://doi.org/10.3390/su9081339>

Barnes, A. P., Soto, I., Eory, V., Beck, B., Balafoutis, A., Sánchez, B., ... & Gómez-Barbero, M. (2019). Exploring the adoption of precision agricultural technologies: A cross regional study of EU farmers. *Land Use Policy*, 80, 163-174. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2018.10.004>

Basso, B., Dumont, B., Cammarano, D., Pezzuolo, A., Marinello, F., & Sartori, L. (2016). Environmental and economic benefits of variable rate nitrogen fertilization in a nitrate vulnerable zone. *Science of the Total Environment*, 545, 227-235. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.12.104>

Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (2026): Ertragspotential. Online verfügbar unter: https://www.deutsche-rohstoffagentur.de/DE/Themen/Boden/Nachhaltiges-Bodenmanagement/Bodenfunktionen-Bodenempfindlichkeiten/Ertragspotential/Ertragspotential_node.html

BMEL (2024). Das Investitionsprogramm Landwirtschaft. Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft. Online verfügbar unter: <https://www.bmel.de/DE/themen/landwirtschaft/klimaschutz/investitionsprogramm-landwirtschaft.html>

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/>

Dohmen, T., Falk, A., Huffman, D., Sunde, U., Schupp, J., & Wagner, G. G. (2011). Individual risk attitudes: Measurement, determinants, and behavioral consequences. *Journal of the European Economic association*, 9(3), 522-550. <https://doi.org/10.1111/j.1542-4774.2011.01015.x>

- Drewry, J. L., Shutske, J. M., Trechter, D., Luck, B. D., & Pitman, L. (2019). Assessment of digital technology adoption and access barriers among crop, dairy and livestock producers in Wisconsin. *Computers and Electronics in Agriculture*, 165, 104960.
<https://doi.org/10.1016/j.compag.2019.104960>
- Erisman, J. W., Sutton, M. A., Galloway, J., Klimont, Z., & Winiwarter, W. (2008). How a century of ammonia synthesis changed the world. *Nature Geoscience*, 1(10), 636-639.
<https://doi.org/10.1038/ngeo325>
- Ess, D. R., Morgan, M. T., & Parson, S. D. (2001). Implementing site-specific management: map-versus sensor-based variable rate application. *Publication Number SSM-2-W*. Purdue University.
- Garcia, V., McCallum, C., & Finger, R. (2024). Heterogeneity of European farmers' risk preferences: an individual participant data meta-analysis. *European Review of Agricultural Economics*, 51(3), 725-778.
<https://doi.org/10.1093/erae/jbae012>
- Gu, B., van Grinsven, H. J., Lam, S. K., Oenema, O., Sutton, M. A., Mosier, A., & Chen, D. (2021). A credit system to solve agricultural nitrogen pollution. *The Innovation*, 2(1).
<https://doi.org/10.1016/j.xinn.2021.100079>
- Hundal, G. S., Laux, C. M., Buckmaster, D., Sutton, M. J., & Langemeier, M. (2023). Exploring barriers to the adoption of internet of things-based precision agriculture practices. *Agriculture*, 13(1), 163.
<https://doi.org/10.3390/agriculture13010163>
- Inoue, Y. (2020) Satellite- and drone-based remote sensing of crops and soils for smart farming – a review. *Soil Science and Plant Nutrition* 66, 798–810.
<https://doi.org/10.1080/00380768.2020.1738899>
- Kehl, C., Meyer, R., Steiger, S. (2021). Digitalisierung der Landwirtschaft: gesellschaftliche Voraussetzungen, Rahmenbedingungen und Effekte. TAB-Arbeitsbericht Nr. 194.
- Lohr, S. L. (2021). *Sampling: design and analysis*. Chapman and Hall/CRC, New York.
<https://doi.org/10.1201/9780429298899>
- Malone, T., Fiechter, C., Meng, Z., Lowenberg-DeBoer, J., Erickson, B., & Akridge, J. (2026). Is Precision Agriculture Technology Adoption Persistently Overestimated?. *Agribusiness*.
<https://doi.org/10.1002/agr.70085>
- Michels, M., von Hobe, C. F., & Musshoff, O. (2020). A trans-theoretical model for the adoption of drones by large-scale German farmers. *Journal of Rural Studies*, 75, 80-88.
<https://doi.org/10.1016/j.jrurstud.2020.01.005>
- Michels, M., Rieling, J. A., & Musshoff, O. (2024). Risk attitude, innovativeness, and financial literacy—A cross-occupational comparison of German farmers and foresters. *Q Open*, 4(1), qoae007.
<https://doi.org/10.1093/qopen/qoae007>
- Michie, S., Van Stralen, M. M., & West, R. (2011). The behaviour change wheel: a new method for characterising and designing behaviour change interventions. *Implementation Science*, 6, 1-12.
<https://doi.org/10.1186/1748-5908-6-42>
- Michie, S., Atkins, L., & West, R. (2014). The behaviour change wheel: A guide to designing interventions. Silverback Publishing.

- Mills, J., Gaskell, P., Ingram, J., Dwyer, J., Reed, M., & Short, C. (2017). Engaging farmers in environmental management through a better understanding of behaviour. *Agriculture and Human Values*, 34, 283-299. <https://doi.org/10.1007/s10460-016-9705-4>
- Musacchio, A., Re, V., Mas-Pla, J., & Sacchi, E. (2020). EU Nitrates Directive, from theory to practice: Environmental effectiveness and influence of regional governance on its performance. *Ambio*, 49, 504-516. <https://doi.org/10.1007/s13280-019-01197-8>
- Nowak, B. (2021). Precision agriculture: Where do we stand? A review of the adoption of precision agriculture technologies on field crops farms in developed countries. *Agricultural Research*, 10(4), 515-522.
- Olum, S., Gellynck, X., Juvinal, J., Ongeng, D., & De Steur, H. (2020). Farmers' adoption of agricultural innovations: A systematic review on willingness to pay studies. *Outlook on Agriculture*, 49(3), 187-203. <https://doi.org/10.1177/0030727019879453>
- Pathak, H. S., Brown, P., & Best, T. (2019). A systematic literature review of the factors affecting the precision agriculture adoption process. *Precision Agriculture*, 20, 1292-1316. <https://doi.org/10.1007/s11119-019-09653-x>
- Pierpaoli, E., Carli, G., Pignatti, E., & Canavari, M. (2013). Drivers of precision agriculture technologies adoption: a literature review. *Procedia Technology*, 8, 61-69. <https://doi.org/10.1016/j.protcy.2013.11.010>
- Pfaff, S. A., & Maurmann, I. (2025). Einsatz teilflächenspezifischer Stickstoffdüngung: Erfahrungen von Landwirten aus Baden-Württemberg. *Agricultural Engineering. EU*, 80(2). <https://doi.org/10.1515/ae.2025.3333>
- Schulte-Uebbing, L. F., Beusen, A. H., Bouwman, A. F., & De Vries, W. (2022). From planetary to regional boundaries for agricultural nitrogen pollution. *Nature*, 610(7932), 507-512. <https://doi.org/10.1038/s41586-022-05158-2>
- Sonntag, W. I., Wienrich, N., Severin, M., & Schwering, D. S. (2022). Precision Farming–Nullnummer oder Nutzbringer? Eine empirische Studie unter Landwirten. *Berichte über Landwirtschaft-Zeitschrift für Agrarpolitik und Landwirtschaft*, 100(2). <https://doi.org/10.12767/buel.v100i2.411>
- Späti, K., Huber, R., & Finger, R. (2021). Benefits of increasing information accuracy in variable rate technologies. *Ecological Economics*, 185, 107047. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2021.107047>
- Späti, K., Huber, R., Logar, I., & Finger, R. (2022). Incentivizing the adoption of precision agricultural technologies in small-scaled farming systems: A choice experiment approach. *Journal of the Agricultural and Applied Economics Association*, 1(3), 236-253. <https://doi.org/10.1002/jaa2.22>
- Steffen, W., Richardson, K., Rockström, J., Cornell, S. E., Fetzer, I., Bennett, E. M., ... & Sörlin, S. (2015). Planetary boundaries: Guiding human development on a changing planet. *Science*, 347(6223), 1259855. <https://doi.org/10.1126/science.1259855>
- Tensi, A. F., Ang, F., & Van der Fels-Klerx, H. J. (2022). Behavioural drivers and barriers for adopting microbial applications in arable farms: Evidence from the Netherlands and Germany. *Technological Forecasting and Social Change*, 182, 121825. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2022.121825>
- Umweltbundesamt (2024). Ausweisung nitratbelasteter Gebiete. Online verfügbar unter: <https://www.umweltbundesamt.de/themen/wasser/grundwasser/ueberwachung-bewertung/ausweisung-nitratbelasteter-gebiete#hintergrund>

West, R., Michie, S., Rubin, G. J., & Amlôt, R. (2020). Applying principles of behaviour change to reduce SARS-CoV-2 transmission. *Nature Human Behaviour*, 4(5), 451-459.
<https://doi.org/10.1038/s41562-020-0887-9>

Anschrift der Autoren

Dr. Marius Michels
Arbeitsbereich Landwirtschaftliche Betriebslehre
Department für Agrarökonomie und Rurale Entwicklung
Georg-August-Universität Göttingen
37073 Göttingen
E-Mail: marius.michels@agr.uni-goettingen.de

Prof. Dr. Oliver Mußhoff
Fachgebiet Landwirtschaftliche Betriebslehre
Department für Agrarökonomie
Humboldt-Universität zu Berlin
10115 Berlin

Danksagungen

Wir danken der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) (Projektnummer 579775716) für die finanzielle Unterstützung.