

Einsatz teilflächenspezifischer Stickstoffdüngung: Erfahrungen von Landwirten aus Baden-Württemberg

Sara Anna Pfaff, Ines Maurmann

Die teilflächenspezifische Stickstoffdüngung bietet für die kleinstrukturierte Landwirtschaft eine Möglichkeit, um gesetzlichen Anforderungen sowie zukünftigen Herausforderungen, z. B. Ressourcenmangel, erhöhte Produktionskosten, Dokumentationsanforderungen, zu begegnen. Dennoch ist die Nutzung auf den landwirtschaftlichen Betrieben verhalten, hemmende Faktoren sind hierbei die Investitionskosten sowie die fehlende Kenntnis des tatsächlichen Mehrwertes für den Betriebsalltag. Daher betrachtet die Studie den Entscheidungs- und Implementierungsprozess sowie die Veränderungen im Betriebsalltag hinsichtlich der teilflächenspezifischen Stickstoffdüngung anhand von Interviews mit sechs Ackerbaubetrieben. Die Ergebnisse verdeutlichen, dass die befragten Landwirte entlastende Effekte wahrnehmen, aber die Einarbeitung aufgrund technischer Herausforderungen langwierig ist. Insgesamt mangelt es an fachkundigen Ansprechpersonen zur Unterstützung. Daher sind zukünftig spezifische Schulungen für Landwirte aber auch fachkundiges Personal höchst relevant. Die Ergebnisse dieser Untersuchung zeigen zudem, dass es wichtig ist, Netzwerke für den gezielten Erfahrungsaustausch zu etablieren.

Schlüsselwörter

Teilflächenspezifische Stickstoffdüngung, Precision Farming, Digitalisierung

Die Landwirtschaft der Zukunft muss zwangsläufig mit zahlreichen Herausforderungen im Hinblick auf die Nachhaltigkeit umgehen können. Darunter finden sich ökonomische (z. B. erhöhte Produktionskosten, Wettbewerbsdruck und Strukturwandel), ökologische (z. B. Klimawandel, Grundwasserverschmutzungen, Ressourcenmangel) und soziale Problemstellungen (z. B. Fachkräftemangel, körperlich anstrengende Arbeitsbedingungen) (BMEL 2023a, MISAAL et al. 2023, ROB und LORENZO 2019, WEBER et al. 2022): Der Einsatz digitaler Technologien wird dahingehend als Mehrwert und vielversprechendes Hilfsmittel für die klein- und großstrukturierte Landwirtschaft gesehen. Die digitale Technologie der teilflächenspezifischen Stickstoffdüngung (TFSD) beispielsweise weist ein erhöhtes (i) ökonomisches (z. B. Einsparung von Betriebsmitteln zur Düngung), (ii) ökologisches (z. B. Einsparung und gezielte, bedarfsorientierte Applikation von Düngemitteln, Einhalten der Düngeverordnung (DüV)) und (iii) soziales Potenzial (z. B. Flexibilisierung Arbeitsablauf und Entlastung durch automatische Dokumentation) auf (BLASCH et al. 2021, BONGIOVANNI und LOWENBERG-DEBOER 2004, GANDORFER und MEYER-AURICH 2017, RAKUN et al. 2022, RÖSCH et al. 2005).

Mit Blick in die Praxis zeigt sich allerdings, dass die aktive Nutzung in der EU z. T. zurückhaltend ist (GROHER et al. 2020, RAKUN et al. 2022). Insbesondere in kleineren Agrarstrukturen wie z. B. in Bayern und Baden-Württemberg in Deutschland (GABRIEL und GANDORFER 2022, Gabriel und GANDORFER

2023, PFAFF et al. 2023) bestätigt sich diese Beobachtung, obwohl diese aufgrund der Flächenheterogenität besonders von der Technik profitieren würden (MUNZ und SCHUELE 2022).

Unter Berücksichtigung des Diffusionsprozesses (ROGERS 2003) lässt sich feststellen, dass die TFSD aufgrund des Mangels einer ausreichenden kritischen Masse noch nicht weit verbreitet ist. Hemmende Faktoren können vor allem finanzieller Natur sein (GABRIEL et al. 2021, PIERPAOLI et al. 2013). Ferner können die fehlende Verfügbarkeit von Wissen und Know-how über den tatsächlichen Mehrwert negativ auf die Übernahmewahrscheinlichkeit wirken (CISTERNAS et al. 2020, KOLADY et al. 2021), da bei der TFSD ein ökonomischer Mehrwert noch nicht umfassend nachgewiesen wurde und die ökologischen Effekte je nach Methode variieren können (EBERTSEDER et al. 2003, GANDORFER 2006, GANDORFER und MEYER-AURICH 2017, LANGENBERG et al. 2017, LAMBERT und LOWENBERG-DEBOER 2000, RÖSCH et al. 2005, WAGNER 2010). Aktuell mangelt es an unparteiischen Ansprechpartnern und Formaten, welche umfassende, technologiespezifische Informationen dazu anbieten und somit die Landwirte in ihrer Entscheidungsfindung unterstützen können (CISTERNAS et al. 2020, SHANG et al. 2021). Es ist nur begrenzt vorwegzunehmen, wie sich der landwirtschaftliche Arbeitsalltag (= Betriebsalltag) nach der Investition in eine digitale Technologie (z.B. TFSD) verändern wird und welche Herausforderungen daraus resultieren.

Es ist bekannt, dass der Einsatz digitaler Technologien im Allgemeinen zu einer Veränderung der Arbeit als Landwirt und somit des Betriebsalltages führen kann (REITH et al. 2023). Ausgehend vom bisherigen Forschungsstand liegen Annahmen vor, in welchen Bereichen des Betriebsalltages auf einem landwirtschaftlichen Betrieb mit Veränderungen durch den Einsatz von Digitalisierung gerechnet werden kann. Da für die teilflächenspezifische Stickstoffdüngung in diesem Umfang gegenwärtig keine vergleichbaren Studien zu den verschiedenen Bereichen im Betriebsalltag existieren, werden hier die generellen Wirkungsbereiche digitaler Technologien dargelegt. Eine Auswahl ist in Tabelle 1 dargestellt.

Tabelle 1: Mögliche Wirkungsbereiche digitaler Technologien im Betriebsalltag landwirtschaftlicher Betriebe (Auswahl enthalten, keine vollständige Auflistung)

Mögliche Bereiche	Exemplarische Quellen
Arbeitsablauf und -organisation, Arbeitsbedarf und -präzision	KNIERIM et al. (2019), KEHL et al. (2021), PRAUSE (2021), ROLANDI et al. (2021), ZSCHEISCHLER et al. (2022), REITH et al. (2023)
Neue (digitale) Arbeitsformen	HANSEN et al. (2020), GOLLER et al. (2021), KEHL et al. (2021), REITH et al. (2023)
(Flexibilität der) Arbeitstagggestaltung Arbeitsmotivation	SCHEWE und STUART (2015), BARRETT und ROSE (2020), GOLLER et al. (2021), KEHL et al. (2021), SPARROW und HOWARD (2021)
Familie/Freizeit und Work-Life-Balance	SCHEWE und STUART (2015), BARRETT und ROSE (2020), GOLLER et al. (2021), KEHL et al. (2021), SPARROW und HOWARD (2021)
Wissen/Kompetenzen/Know-how	REICHARDT und JÜRGENS (2009), FREY und OSBORNE (2013), CAROLAN (2017), PFAFF et al. (2023), REITH et al. (2023)
Gesundheitliches Wohlbefinden (Stresswahrnehmung)	REISSIG (2021)

Ferner unterscheiden METTA et al. (2022) die Wirkungen digitaler Technologien in vier Kategorien, welche in der vorliegenden Untersuchung ex post in der qualitativen Inhaltsanalyse (siehe Materi-

al und Methoden sowie Anhang II) angewandt wurden, um die erlebten Veränderungen der befragten Landwirte zu kategorisieren:

- (i) verstärkende Wirkungen (Effizienzverbesserung bestehender Aktivitäten),
- (ii) hemmende Wirkungen (Effizienzverschlechterung bestehender Aktivitäten),
- (iii) befähigende Wirkungen (Schaffung neuer Möglichkeiten) und
- (iv) schwächende Wirkungen (Abbau bestehender Möglichkeiten).

Studien in der Innovationsforschung deuten darauf hin, dass negative Wirkungen und Erfahrungen im Implementierungsprozess von Innovationen hemmend auf die (weitere) Übernahme digitaler Technologien wirken (ROGERS 2003). Dies kann dazu führen, dass Landwirte wieder zu traditionellen Arbeitsweisen und Techniken zurückkehren (DRIESSEN und HEUTINCK 2015, LUNDSTRÖM und LINDBLOM 2021). Auch eine Diskrepanz zwischen den erwarteten Vorteilen digitaler Technologien nach ihrer Implementierung (BARRETT und ROSE 2020, DUNCAN et al. 2021) und ihrem tatsächlichen Mehrwert im Vergleich zu herkömmlichen Arbeitsweisen (KLERKX und ROSE 2020, REGAN 2019) kann bewirken, dass die Verbreitung aufgrund der Unklarheit über den Mehrwert im Betriebsalltag gehemmt wird (CISTERNAS et al. 2020, KOLADY et al. 2021). Es ist daher notwendig, den technologiespezifischen (Entscheidungs- und) Implementierungsprozess und die damit verbundenen, erlebten Wirkungen besser zu verstehen. Dadurch kann Transparenz für Landwirte dahingehend geschaffen werden, ob und inwiefern sich der erwartete technologiespezifische Mehrwert gegenüber der ursprünglichen Arbeitsweise einstellen kann. Ferner kann dies dazu beitragen, weitere Schlüsse für bedarfsgerechtere Unterstützung durch Information, Bildung und Beratung zu ziehen.

Im Rahmen der vorliegenden Studie beschreibt der Terminus „Betriebsalltag“ auf dem landwirtschaftlichen Betrieb anfallende Tätigkeiten im Pflanzenbau in Bezug auf den Düngungsvorgang mit Stickstoff. Die vorliegende Studie befasst sich mit der TFSD auf der Ebene des Betriebsalltages, da Veränderungen in diesem Bereich relevant für den (täglichen) Arbeitsablauf und den betrieblichen Erfolg der Tätigkeiten sind. Mit Bezug zum Innovations-Entscheidungsprozess nach ROGERS (2003) liegt der Fokus auf der Phase der Implementierung von Innovationen (hier TFSD) und der einzelbetrieblichen Anwendung im Betriebsalltag. Rein ökonomische Effekte sind zwar vor allem auch für die Entscheidungsfindung relevant, nach dem Erwerb digitaler Technologien spielen diese im aktiven Arbeitseinsatz im Betrieb aber keine alleinige Rolle für den wahrgenommenen Implementierungserfolg (MUNZ 2024, PFAFF et al. 2023). Ausgehend von der zuvor erläuterten Problemstellung und Forschungslücke ergeben sich die folgenden Forschungsfragen, welche mithilfe der Studie über die TFSD qualitativ und deskriptiv beantwortet werden sollen:

- (i) Wie stellt sich der Verlauf des Entscheidungs- und Implementierungsprozesses auf den befragten landwirtschaftlichen Betrieben dar? und
- (ii) Welche Veränderungen für den Betriebsalltag nehmen die befragten Betriebe aufgrund der Nutzung der TFSD wahr?

Grundlagen der teilflächenspezifischen Stickstoffdüngung (TFSD)

Die teilflächenspezifische Bewirtschaftung, eine der ersten Anwendungen des Precision Farming in den frühen 1990er-Jahren, basiert auf der Aufteilung von Flächen in Zonen gleicher Eigenschaften (Teilflächen) und der entsprechenden Anpassung der Bewirtschaftungsstrategie. Von der Bodenbearbeitung bis zum Pflanzenschutz können alle Arbeitsschritte teilflächenspezifisch durchgeführt werden (BALAFOUTIS et al. 2017, GANDORFER und MEYER-AURICH 2017).

Es existieren grundsätzlich zwei Strategien der TFSD: Die erste Strategie sieht vor, dass an Stellen hoher Ertragsfähigkeit mehr gedüngt wird. Das Ziel dieser Strategie ist es, Kosten sowie Umweltverluste auf unproduktiven Teilflächen mit einer schlechteren Düngerverwertung zu verringern und Teilflächen mit hoher Ertragsfähigkeit zu fördern, um Erträge und Qualität zu steigern. Die variable Ausbringungsmenge zielt somit darauf ab, die Pflanzen optimal zu versorgen, indem Hohertragszonen mit einer höheren Düngermenge gefördert und Niedrigertragszonen reduziert gedüngt werden (Differenzierungsstrategie). Die zweite Strategie zielt darauf ab, ertragsschwache Teilflächen mit mehr Dünger zu versorgen und ertragsstarke entsprechend weniger zu düngen, um einen homogenen Bestand und eine gleichmäßige Abreife zu erreichen. Dies soll höhere Erträge bei gleicher Gesamtmenge an Stickstoff (N) oder ein gleiches Ertragsniveau mit reduziertem Stickstoffeinsatz ermöglichen. Weitere Vorteile der TFSD sind weniger Lagergetreide, gleichmäßige und bessere Produktqualitäten wie Proteingehalt sowie eine geringere Umweltbelastung (Heege 2013). Abbildung 1 zeigt verschiedene Möglichkeiten, TFSD anzuwenden: der Kartenansatz, der Sensoransatz und die Kartenüberlagerung (HEEGE 2013).

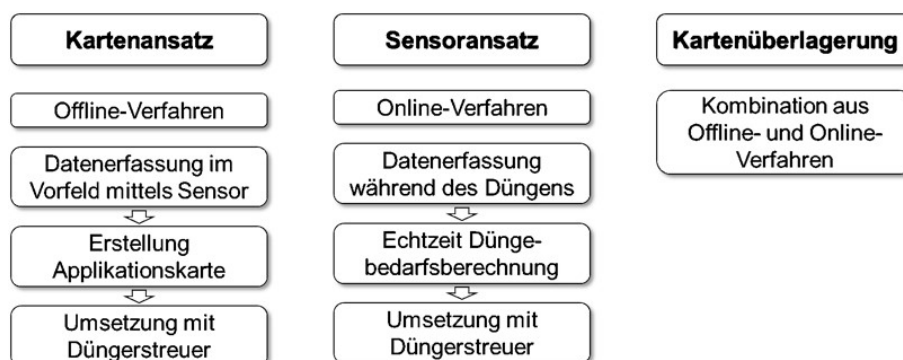


Abbildung 1: Anwendungsmöglichkeiten der teilflächenspezifischen Stickstoffdüngung

In der Praxis wird der Kartenansatz auch als Offline-Verfahren bezeichnet. Dabei erfolgt die Datenaufnahme im Vorfeld mithilfe eines Sensors wodurch Fernerkundungsdaten, Drohnenbildern und Ertragskarten erfasst werden, um den Stickstoffbedarf des Bestands anhand der aufgewachsenen Biomasse oder Grünfärbung der Pflanzen abzuleiten. Ferner können Bodenkarten genutzt werden, um Streumengen abzuleiten. Eine entsprechende Streumengenkarte (Applikationskarte) wird erstellt und mit dem Düngerstreuer umgesetzt.

Alternativ können Applikationskarten auch durch den Einsatz von Sensoren generiert werden, die Echtzeitdaten liefern (sogenanntes Online-Verfahren), beispielsweise bei der sensorbasierten Stickstoffdüngung. Im Sensoransatz wird die Entwicklung und Grünfärbung des Bestands während des Düngens mithilfe eines Stickstoffsensors (N-Sensor) direkt erfasst, um daraus auf den Düngedarf zu schließen. Bei einigen Sensorsystemen wird eine ausreichende Pflanzenentwicklung vorausgesetzt, weshalb die erste Düngegabe ohne Sensor durchgeführt werden muss.

Des Weiteren besteht die Möglichkeit, beide Verfahren zu kombinieren, indem ein sensorbasierter Ansatz mit der Überlagerung von Karten zum Ertragspotential verwendet wird. Diese Kombination ermöglicht eine präzisere und effizientere Bewirtschaftung der Teilflächen in der Landwirtschaft. Die Nutzung von Applikationskarten und Sensoren spielt somit eine entscheidende Rolle bei der Umset-

zung von teilflächenspezifischen Bewirtschaftungsstrategien und trägt zur Optimierung des Ressourceneinsatzes sowie zur Steigerung der Quantität und Qualität der Erträge bei. Der Düngungsvorgang selbst wird dementsprechend dokumentiert und kann in eine Ackerschlagkartei oder in ein Farm Management Information System (FMIS) übertragen werden.

Um TFSD umfänglich nutzen zu können, werden bestimmte technische Komponenten benötigt. Zunächst sollten ISOBUS-Funktionalitäten für den Düngestreuer verfügbar sein und freigeschaltet werden. Die Zugmaschine benötigt einen Jobrechner, ISOBUS-Ausstattung und einen GPS-Empfänger. Bei der Anwendung des Online-Verfahrens ist der N-Sensor unerlässlich. Zur Erstellung der Applikationskarten beim Offline-Verfahren wird eine entsprechende Software benötigt. Die zusätzliche Ausstattung der Zugmaschine mit einem Lenksystem/Lenkassistenten kann die Arbeitspräzision weiterhin unterstützen.

Material und Methoden

Um die Erfahrungen der Landwirte mit der TFSD zu untersuchen, wurden qualitative Interviews durchgeführt. Dabei wurde gezielt die subjektive Wahrnehmung der einzelnen Betriebsleiter betrachtet, da sie die Anwender der Technologie sind und sich mit den jeweiligen Auswirkungen auseinandersetzen müssen. Insgesamt wurden sechs konventionelle landwirtschaftliche Betriebe in Baden-Württemberg befragt, welche aufgrund eines zielgerichteten Samplings akquiriert und ausgewählt wurden. Baden-Württemberg ist durch eine kleinstrukturierte Landwirtschaft geprägt (STATISTISCHES LANDESAMT BADEN-WÜRTEMBERG 2021), weshalb dieser Betrachtungsrahmen für die Untersuchung der TFSD im Hinblick auf die möglichen Potenziale in solchen Regionen geeignet ist. Maßgeblich war, dass Betriebe ausgewählt wurden, die aktiv TFSD anwenden und in der kleinstrukturierten Landwirtschaft Baden-Württembergs verortet sind. In der nachfolgenden Tabelle 2 werden die betrieblichen sowie die persönlichen Merkmale der befragten Betriebsleiter (B1–B6) zusammenfassend dargestellt. Die in dieser Studie befragten Betriebe haben alle klein(er) strukturierte Flächen, aber mit einer Spannweite von 75 bis 660 ha liegen sie im Vergleich über dem baden-württembergischen Durchschnitt der Gesamtfläche (im Ackerbau). Denn von ca. 39.000 Betrieben in Baden-Württemberg bewirtschaften nur 25 % mehr als 50 ha und 9 % mehr als 100 ha (STATISTISCHES LANDESAMT BADEN-WÜRTEMBERG 2021). Dies steht im Einklang mit der Annahme, dass größere Betriebe eher digitale Technologien nutzen (GABRIEL und GANDORFER 2023, SHANG et al. 2021). Die Datensättigung, um reliable Aussagen treffen zu können, kann dadurch sichergestellt werden, dass eine theoretische Sättigung (STRAUSS 1991, GLASER und STRAUSS 1998) innerhalb der befragten Betriebe vorliegt. Denn alle befragten Betriebe verfügen über individuelle Ausgangslagen und Gegebenheiten, wodurch ein breites Spektrum an Perspektiven und Erfahrungen eingebracht werden konnte. Dennoch konnten bei den befragten Betriebsleitern inhaltlich ähnliche Schlüsse aufgrund ihrer Einschätzungen gezogen werden.

Tabelle 2: Persönliche, betriebliche und technische Merkmale der zur teilflächenspezifischen Stickstoffdüngung (TFSD) befragten Betriebe B 1-6

	B1	B2	B3	B4	B5	B6
Geschlecht	männlich	männlich	männlich	männlich	männlich	männlich
Alter (in J.)	25	39	44	54	24	38
Berufserfahrung (in J.)	10	16	24	28	6	22
Höchste landwirtschaftliche Ausbildung	B.Sc. in Agrarwirtschaft	Diplom Agrarwirtschaft	Landwirtschafts- und Pferdewirtschaftsmeister	Agraringenieur, B.Sc. in Agrarwissenschaften	Landwirtschaftliche Lehre, B.Sc. in Agrarwissenschaften	Landmaschinen-mechaniker, Ausbildung zum Nebenerwerbslandwirt
Erfahrung mit digitalen Technologien	hoch, sehr affin	hoch, sehr affin	hoch, sehr affin	nicht sehr affin	mittelmäßig affin	mittelmäßig affin
Rechtsform	Einzelunternehmen	KG	GbR	Einzelunternehmen	Einzelunternehmen	Einzelunternehmen
Erwerbsform	Nebenerwerb	Haupterwerb	Haupterwerb	Haupterwerb	Nebenerwerb	Haupterwerb
Betriebsgröße (in ha)	75	660	154	115	97	82
Bisheriger Mechanisierungs-/ Digitalisierungsstand vor Investition	Lenksystem	GPS-Lenkassistent und Düngerstreuer war schon da	Spurführung installiert, 1 Traktor mit ISOBUS	es gab vorher nichts, Ausrüstung mit GPS und ISOBUS, neuer Traktor für teilfl. Spritze, Ackerschlagkartei	seit 2013 kein neuer Schlepper, 2018 auf 2 Traktoren RTK-Lenksystem installiert, 1 älterer Traktor ISOBUS-fähig gemacht	Neuanschaffung waren sowieso geplant, daher war Düngerstreuer bereits für TFSD kompatibel
Aktuell genutzte Technologien für Düngungsvorgang	TFSD online mit Kartenüberlagerung, Nutzung seit 4 Jahren	TFSD online, Nutzung seit 7 Jahren	TFSD offline basierend auf Satellitenbildern, Nutzung seit 3 Jahren	TFSD online mit Kartenüberlagerung, Nutzung seit 1 Jahr	TFSD online mit Kartenüberlagerung, Nutzung seit 6 Jahren	TFSD (online, offline, bzw. kombiniert mit Kartenüberlagerung), Nutzung seit 3 Jahren
	Lenksystem	Lenkassistent	Lenkassistent und Spurführung		Lenksystem	Lenksystem

Mithilfe eines Leitfadens mit offen gestellten Fragen (MEUSER und NAGEL 2009) wurden die Interviews mit den Betriebsleitern durchgeführt. Der Leitfaden basiert auf den zu Beginn erläuterten Forschungsfragen und befasst sich mit dem Entscheidungsprozess, der Implementierungsphase auf dem Betrieb sowie den wahrgenommenen Veränderungen im Betriebsalltag. Dementsprechend gliedert sich der Leitfaden (siehe auch Anhang I) in die folgenden Teilbereiche:

- (A) Erfassung betrieblicher und soziodemographischer Merkmale,
- (B) Beschreibung der Entscheidungsfindung und Erwartungen,
- (C) Beschreibung der ersten Phase der Einführung, Zeitaufwand und Probleme und
- (D) Veränderungen im Betriebsalltag durch die Nutzung digitaler Technologien.

Im ersten Quartal 2024 fanden die qualitativen Gespräche sowohl in Form von Betriebsbesuchen vor Ort als auch Videogesprächen statt. Die Interviews wurden aufgezeichnet, anonymisiert und einheitlich nach den Vorgaben von KUCKARTZ (2018) und DRESING und PEHL (2017) transkribiert. Anschließend wurde eine qualitative Inhaltsanalyse nach MAYRING (2015) mit der Software MAXQDA durchgeführt. Dabei wurde das Prinzip der deduktiven Kategorienbildung und strukturellen Inhaltsanalyse gemäß MAYRING (2015) angewendet. Zunächst wurden theoriegeleitet deduktiv Ober- und Unterkategorien sowie Strukturdimensionen entwickelt. Auf dieser Grundlage wurden die jeweiligen Ausprägungen und die Erstellung des Kategoriensystems (siehe Anhang II) bestimmt. Hierzu wurden unter anderem Definitionen und Kodierregeln für jede Kategorie formuliert. Nach Abschluss des Kategoriensystems begann die Analyse der Interviewtranskripte einschließlich der Extraktion relevanter Fundstellen, Paraphrasierung und Zusammenfassung der gewonnenen Erkenntnisse. Da die Fragen an die Betriebsleiter offen formuliert waren, wurden die nachfolgend dargestellten Ergebnisse aus dem Interviewmaterial abgeleitet. Auf dieser Grundlage konnten die Ergebnisse aus dem analysierten Interviewmaterial erarbeitet werden.

Ergebnisse

Entscheidung zur Investition in TFSD: Motivation und Informationsquellen

Aus Sicht der befragten Landwirte sprachen verschiedene Gründe dafür, in die TFSD zu investieren. Aufgrund der Flächenbedingungen (heterogene Flächen, Hanglagen, unregelmäßig geformte Flächen) sowie der verschiedenen Investitionsfördermöglichkeiten und den wesentlichen finanziellen Anreizen (Investitionsprogramm Landwirtschaft, Förderprogramm für Agrarumwelt, Klimaschutz und Tierwohl (FAKT II)) sowie der eigenen Freude an der Digitalisierung beschäftigten sich die befragten Betriebsleiter vermehrt mit den Möglichkeiten der TFSD und investierten schlussendlich. Zudem sei es nicht möglich, manuell gesteuert so bedarfsgerecht zu applizieren wie eine auf Daten basierende Technologie, denn „jeder Sensor ist besser als das menschliche Auge“, so B2. Dadurch könne auch die Düngeverordnung besser beachtet werden. Erwartungen, die mit der Investition in die TFSD einhergingen, wurden wie folgt beschrieben: Neben einer verbesserten Arbeitseffizienz und ggf. einer Zeitersparnis erhoffen sich die Betriebsleiter eine bessere Düngerausnutzung und -verteilung durch eine präzisierte Applikation des Düngers.

Um für den jeweiligen Betrieb die beste Lösung zu finden, haben die Betriebsleiter verschiedene Informationsquellen zur Investitionsentscheidung parallel verwendet (Abbildung 2). Insbesondere die Beratung durch Herstellerfirmen sowie der kollegiale Erfahrungsaustausch werden von allen Betrieben gleichermaßen intensiv genutzt, um bestmöglich an Produktinformationen und realistische Einschätzungen der Vor- und Nachteile zu gelangen. Erfahrungen auf Lehrbetrieben (B6) und der

Austausch mit Hochschulen (B3) werden vereinzelt herangezogen, um sich für ein passendes Produkt entscheiden zu können.

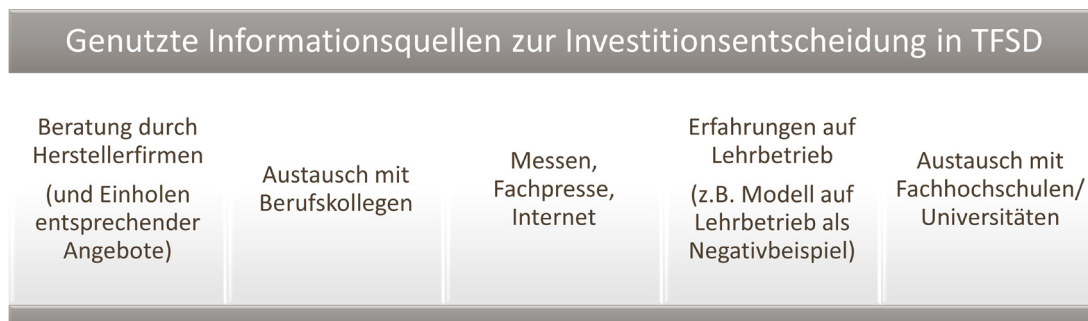


Abbildung 2: Von B1-6 verwendete Informationsquellen vor der Investitionsentscheidung in TFSD

Die befragten Betriebsleiter nutzten somit eine vielfältige Informationsbeschaffung, damit das passende Angebot für den eigenen Betrieb gefunden werden konnte. Ein Betriebsleiter (B3) erwähnte, dass das Landwirtschaftsamt kein wirklicher Ansprechpartner mehr sei und ein anderer (B2), dass er den Hersteller trotz Probegerät gewechselt habe, da Folgeinvestitionen notwendig gewesen wären. Dennoch betonen alle befragten Betriebsleiter, dass es schlussendlich doch eine recht kurzfristige Entscheidung „mit Bauchgefühl“ war.

Wahrnehmung der Implementierungsphase auf dem Betrieb

Der Umbau bzw. die Umrüstung des bestehenden Fuhrparks auf die TFSD wurde teils komplett selbst (B1, B6), teils durch Hersteller oder Händler (B2, B3) und durch beides in Kombination (B4, B5) durchgeführt. Die Phase nach der Investitionsentscheidung, in welcher es dann zur aktiven Einführung der TFSD auf den Betrieben kam, wurde von den befragten Landwirten sehr ähnlich reflektiert: Auf fünf von sechs Betrieben war beim Einstieg in die TFSD bereits ein Spurführungs- oder Lenksystem vorhanden. Zu Beginn der Implementierungsphase der TFSD war die Anfangseuphorie oftmals sehr hoch. Dann traten laut der befragten Betriebsleiter erste Probleme auf, wobei man als Betrieb dranbleiben und sich die entsprechende Unterstützung holen müsse. Bis die Grundeinstellungen getroffen wurden, war sowohl Zeit als auch Geduld notwendig. Generell wurde dies aber als eigenständig lösbar eingestuft. Nach einer kurzen Einweisung seitens der Herstellerfirmen arbeiteten einige Betriebe mit dem Handbuch weiter und probierten intuitiv verschiedene Aspekte aus. Alle Betriebe betonten allerdings, dass die Einweisung durch den Händler oder den Werksbeauftragten schlecht und/oder zu kurz war. Der Support durch die Herstellerfirmen selbst wurde besser bewertet, allerdings seien die Wartezeiten hierbei nicht unerheblich. Die befragten Landwirte greifen aus diesem Grund vermehrt auf Hilfe durch Familie und private Kontakte zu technikaffinen Personen (z. B. Programmierer) zurück. B1 und B5 arbeiten zudem mit hochschulgeleiteten Forschungsprojekten zusammen, wodurch sie sich noch zusätzlichen fachlichen Input einholen können. Insgesamt sei es schwierig, sich als Anfänger selbstständig in die Thematik der TFSD einzufinden.

Während der Implementierung und Nutzung waren Fehleingaben, z. B. bei der Spezifizierung der Düngermengen, aufgrund fehlenden Know-hows bei der Mehrheit der befragten Betriebsleiter unvermeidlich. Obschon diese Fehleingaben unerwünscht waren, dienten sie als wichtige Lerngelegenheiten und trugen dazu bei, den Prozess der Technologieadaption zu verbessern. Ferner traten

Schwierigkeiten bei der Erstellung von PDF-Dokumenten für die Dokumentation im Rahmen der FAKT-Förderung auf (B2, B4, B5, B6). Dies führte dazu, dass zusätzliche Unterstützung gesucht werden musste. Hierbei funktionierte die Dokumentation auf dem Feld fehlerfrei, allerdings hakte es bei der Übertragung in die Ackerschlagkartei. Aufgrund von Erfahrungen mit solchen Fehlfunktionen in der automatischen Dokumentation erzeugte ein Betrieb (B6) gezielt Screenshots der verarbeiteten Applikationskarten, um eine adäquate Dokumentation sicherzustellen. Ferner wechselte er die Ackerschlagkartei. Die neue Software bot erweiterte Funktionen und ermöglichte ein vereinfachtes Importieren und Konvertieren von abgearbeiteten Applikationskarten in das PDF-Format. Dies ist den befragten Betriebsleitern zufolge im Hinblick auf die Beantragung von Fördermitteln durch die Agrarinvestitionsförderungsmaßnahme (FAKT) von Vorteil, da hierdurch eine effiziente Dokumentation und Archivierung der Arbeitsprozesse gewährleistet wird.

Die zuvor beschriebenen Wahrnehmungen gleichen sich bei allen Betriebsleitern, unabhängig davon, ob sie das Online-Verfahren oder das Offline-Verfahren anwenden. Nachfolgend werden Erfahrungen berichtet, die sich nur auf die Nutzung des N-Sensors und somit das Online-Verfahren beziehen. Denn die Anfangsphase der Implementierung auf einzelnen Betrieben war durch eine Reihe von weiteren Herausforderungen gekennzeichnet, insbesondere bei den befragten Landwirten, die Lenksysteme und N-Sensor kombinieren. Ein Lösungsansatz (B5) bestand darin, aufgrund von Funktionsstörungen beim N-Sensor zunächst auf die Offline-Applikationskarten zu setzen. Im weiterführenden Prozess kam der ursprüngliche Sensor wiederholt zum Einsatz, welcher jedoch weiterhin Verbindungsschwierigkeiten aufwies und dadurch die Betriebseffizienz beeinträchtigte. Als Lösungsansatz wurde ein zusätzliches Terminal erworben. Es zeigte sich allerdings, dass dieses Gerät nur zu 50 % funktionsfähig war. Daher überlegte dieser Betrieb (B5), den N-Sensor wieder zu verkaufen, da es zu häufig vorkam, dass er trotz wiederholter Versuche nicht funktionierte. Solche Fehlfunktionen wie z. B. Verbindungsschwierigkeiten kamen bei der Mehrheit der Betriebe mit Einsatz von N-Sensoren (B1, B4, B5, B6) vor. In solchen Fällen wurde auf die bereits etablierten Offline-Applikationskarten zurückgegriffen, der N-Sensor nicht mehr genutzt aber behalten und ggf. im Folgejahr erneut ausprobiert. Ferner betonten die befragten Betriebsleiter, dass es manchmal nicht transparent sei, wie der N-Sensor arbeite, sodass man gezwungen sei, der Technik komplett zu vertrauen.

Der Zeitaufwand, bis die TFSD vollständig in den Arbeitsvorgang Stickstoffdüngung integriert ist, wird unabhängig von der Verfahrenswahl als betriebs- und personenindividuell beschrieben. Den befragten Landwirten zufolge ist er am Anfang sehr hoch, was sich jedoch mit der automatisierten Dokumentation nach der erfolgten Düngung allmählich ausgleicht. Das erste Jahr bzw. die erste Saison wird als „Lehrjahr“ bezeichnet, in welchem die richtigen Einstellungen, der Umgang mit Störungen (z. B. am Sensor) und die automatisierte Dokumentation erlernt werden müssen. Auch bräuchte man dieses Jahr dazu, um sich den Düngungsprozess im Detail, z. B. bei den verschiedenen Düngegaben und Pflanzenstadien, erarbeiten zu können.

Alle befragten Landwirte stellen sehr deutlich heraus, dass ein wesentliches Problem das fehlende Know-how bei den potenziellen Ansprechpartnern sei. Rückblickend hätten sie sich Folgendes gewünscht: Werkstätten, Händler- und Herstellerfirmen müssten über mehr fachkundiges Personal für eine bessere (zeitnahe) Unterstützung und schnellere Reaktionszeiten verfügen. Zudem sollte der Kundendienst schneller reagieren können, da sonst das mögliche Zeitfenster zur Düngung oftmals bereits verstrichen ist. Ferner wäre es aus Sicht der befragten Betriebsleiter hilfreich, wenn die Händler- oder Herstellerfirmen bei der Einweisung z. B. auch auf mögliche Fehlerquellen eingehen können,

um bestimmte Eingabefehler oder eingabespezifische Aspekte vermeiden zu können. Auch wäre eine Hilfestellung dazu, wie Feldgrenzen richtig eingepflegt werden können (z. B. Flächen mit Hangneigung), von Vorteil. Bei keinem der befragten Betriebsleiter spielten Beratungsdienste eine Rolle, dies wurde mit fehlendem Know-how und Erfahrungen seitens der Berater begründet.

Von Erwartungen zu Erfahrungen: Wandel im Betriebsalltag

Bei der Reflexion der befragten Betriebsleiter, ob sich ihre Erwartungen an die TFSD in der Realität bewahrheitet haben, zeigen sich deutliche Tendenzen. Zunächst funktioniert die automatisierte Dokumentation des Düngungsvorgangs generell gut, allerdings treten bei der Mehrheit der befragten Landwirte regelmäßig Probleme hierbei auf. Ferner sei die grundsätzliche Frage aber, ob man als Betriebsleiter größere Erwartungen bezüglich der Düngereinsparung, des Mehrertrags oder besserer Verteilung des Düngers habe. Die befragten Betriebsleiter erwarteten vorwiegend eine bessere Düngerverteilung. Bisher sehen die Flächen laut der befragten Landwirte homogener aus, die Verteilung ist bedarfsgerechter und die Qualität scheint auf den Flächen gleichmäßig zu sein. Ob der Ertrag tatsächlich infolge der TFSD höher ist, bleibt für die befragten Betriebsleiter weiterhin unklar und ist eher eine intuitive Vermutung: „Ich habe nichts direkt Messbares, aber ich meine schon, dass es etwas bringt“, so B6. Grund hierfür ist, dass die befragten Landwirte z. B. keine Ertragskarten und die damit einhergehenden Daten zur Ertragsauswertung schlag- und teilzonenspezifisch erfassen bzw. in der Vergangenheit erfasst haben. Daher werden subjektive Einschätzungsgrößen wie homogener erscheinende Flächen herangezogen. Der Ertrag ist z. B. bei B6 seit der Nutzung der TFSD angestiegen, dem Betriebsleiter zufolge könnte dies aber ebenfalls von vielen anderen Faktoren (z. B. Wetter) abhängen. Eine mögliche Düngereinsparung wurde nur bedingt bei einzelnen Betriebsleitern (B1, B3) gemessen. Allerdings sei diese B3 zufolge so niedrig, dass sich das nicht mit den aktuellen Preisen für die Technik sowie den Marktabsatzpreisen für Getreide rechnen würde.

Insgesamt können sich Landwirte – den befragten Betriebsleitern zufolge – intensiver mit dem Düngungsvorgang auseinandersetzen und Hoch- und Niedrigertragsbereiche abschätzen, teilweise mehr Ertrag erzielen oder etwas einsparen. Basierend auf METTA et al. (2022) lassen sich die Veränderungen im Betriebsalltag, die von den befragten Landwirten genannt wurden (Abbildung 3), kategorisieren: Positiv wahrgenommen wird, dass die automatisierte Dokumentation mit TFSD bei störungsfreier Funktionsweise Arbeitszeit im Büro sparen, Arbeitsspitzen entzerren und somit zu mehr Flexibilität führen kann, da „einfach zu 100 % dokumentiert wird“ (B1). Auch die Arbeitseffizienz kann durch bedarfsgerechtes Düngen erhöht werden, weil die Arbeitszeit je Bestand effektiver eingesetzt werden kann, so B1 und B3. Wie B2, B5 und B4 herausstellen, können Arbeitsspitzen durch die automatische Dokumentation sowie die präzise schlag- und teilzonenspezifische Düngeauswertung in den Wintermonaten abgefangen werden. So kann man laut B5 „Arbeitsspitzen in den Bereich reinschieben, wo man mehr Zeit hat“. Eine befähigende Wirkung besteht darin, dass die Flächen und deren Teilzonen für den Landwirt transparenter werden und „man sich die Flächen besser vor Augen führen kann“ (B2). Das ermöglicht dem Landwirt, ein vertieftes Verständnis für diese Bereiche zu entwickeln und bedarfsgerecht zu handeln. Weiterhin kann z. B. laut B1 und B2 die Arbeitszuteilung vereinfacht werden, da durch die Vorplanung des Düngungsvorgangs Schlagspezifika auf der Zugmaschine hinterlegt sind. Bei einer Verwendung von TFSD mit Lenksystem kommt somit ein weitestgehend automatisierter Arbeitsvorgang zustande, den auch Arbeitskräfte mit weniger Erfahrung in der Stickstoffdüngung durchführen können.

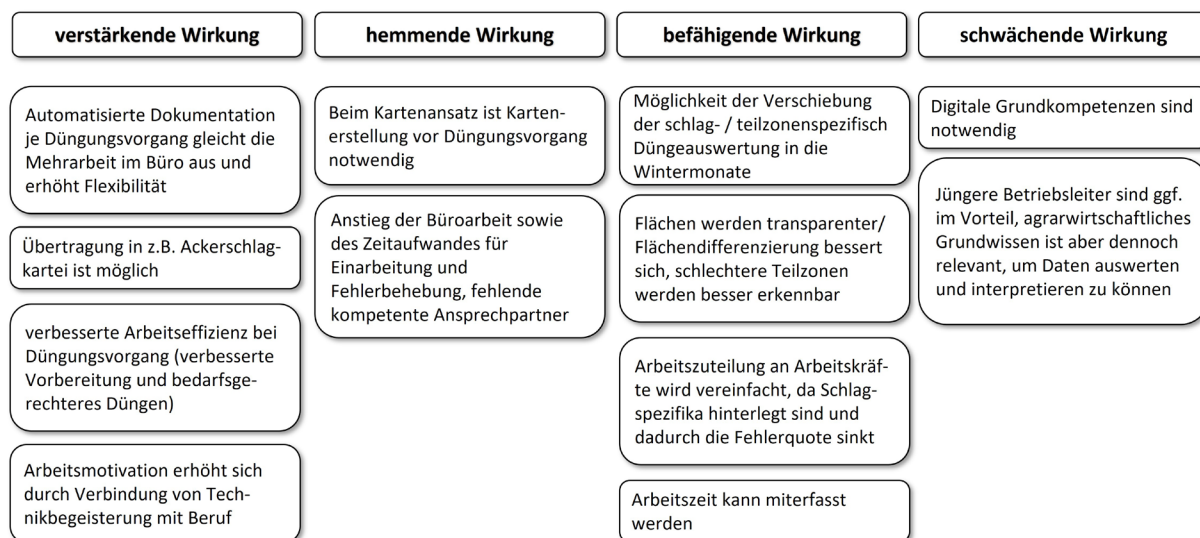


Abbildung 3: Wahrgenommene Veränderungen im Betriebsalltag durch die Nutzung von TFSD, Darstellung angelehnt an Metta et al. (2022)

Bei der Nutzung des Kartenansatzes wird eine „relativ umfangreiche Vorausplanung notwendig, man kann nicht einfach sagen, dass man düngen geht“, so B5. Kommt es zu Störungen, so konkretisiert B2, dass „man Lust haben muss, sich damit zu befassen, da es dann keine rein landwirtschaftliche Tätigkeit mehr ist, sondern darüber hinaus geht und man entsprechend das Handy in die Hand nehmen und mailen oder in der Warteschleife warten muss, bis man Unterstützung bekommt“. Insgesamt betonen alle Betriebsleiter, dass die gesammelten Erfahrungswerte über die Zeit sehr wichtig sind und sich dadurch die Bedienung erleichtert. Dennoch sei es wichtig, stets mitzudenken, wie die TFSD-Technologie arbeitet und ob die TFSD-Arbeitsweise den herkömmlichen Arbeitserfahrungen ohne teilflächenspezifische Applikation ähnelt oder stark abweicht.

Einfluss der digitalen Technologien auf das Belastungs- und Stressempfinden

Alle sechs Betriebsleiter wurden gebeten, die wahrgenommene Entlastung und Belastung durch die Nutzung der TFSD gegenüberzustellen. Es zeigt sich, dass überwiegend eine Entlastung durch die oben genannten Veränderungen wahrgenommen wird. Ferner sei die Entlastung nur spürbar, wenn man sich eingearbeitet hat und weiß, wie die Technik bedient werden muss. Bei der Nutzung mit Offline-Karten ist die Entlastung größer, sobald die entsprechenden Applikationskarten erstmals erarbeitet wurden, da in den Folgejahren dieser Schritt zwar weiterhin erforderlich ist, jedoch durch das bereits vorhandene Wissen aus dem Vorjahr deutlich schneller und einfacher durchgeführt werden kann.

B1 zufolge hätte er diesen Investitionsschritt zur TFSD rückblickend schon sehr viel früher machen sollen. Die Betriebsleiter betonen, dass man als Nutzer Begeisterung und Technikaffinität mitbringen sollte, da sonst Störungen oder Herausforderungen zu stark belastend wirken könnten, so B6: „Wenn man da keinen Spaß dran hat, dann ist da vielleicht sogar die negative Seite manchmal höher als die positive Seite“ und B2 „man muss auch Spaß an der Geschichte haben“.

In Abbildung 4 ist das Stressempfinden der befragten Landwirte nach der Einführung von TFSD dargestellt. Diese subjektiven Erfahrungen wurden explizit im Kontext der Nutzung von TFSD genannt, andere Einflussfaktoren wurden hierbei nicht speziell betrachtet. Demzufolge wird der (ne-

gative) Stress kurzfristig ausgelöst, wenn in bestimmten Situationen betriebliche oder technische Probleme auftreten, die sich auf TFSD zurückführen lassen. Schließlich kann sich der Zeitaufwand erhöhen und Stress verursachen, wenn bestimmte Funktionen der TFSD, beispielsweise aufgrund eines nicht korrekt gesetzten Hakens, nicht wie erwartet arbeiten. Es kann dann einige Zeit in Anspruch nehmen, bis der Fehler gefunden und behoben ist.

Stressempfinden	Problem	Situation	Problem gelöst
	Karten noch nicht erstellt	Düngemaßnahme geplant	Karten bereits erstellt
	Störungen/Ausfall	passendes Wetter zum Düngen	alles funktioniert
	Fehler unbekannt → zeitaufwendig	etwas funktioniert nicht	Fehler bekannt → schnell behoben
	autom. Dokumentation funktioniert nicht	Bürotätigkeit	autom. Dokum. funktioniert → Zeitersparnis
	Kompromisse müssen gefunden werden	Generationskonflikte	Kompromisse gefunden

Abbildung 4: Stressempfinden der befragten Betriebsleiter nach der Einführung von TFSD in beispielhaften Situationen

Durch die vorhandene Technikaffinität der befragten Landwirte in dieser Studie gleichen sich die zuvor genannten stressbehafteten Situationen aus, da in Fällen von Störungen und Fehlfunktionen schneller und effektiver reagiert werden kann als bei einer geringeren Technikaffinität und weniger digitalspezifischem Know-how. Aufgrund unterschiedlicher Technikaffinität kann es laut der befragten Landwirte zu Generationenkonflikten kommen. Ein Beispiel für einen generationsübergreifenden Kompromiss ist, dass ein Betriebsleiter (B1) einen Teil der Flächen mit der teilflächenspezifischen Technologie und einen anderen Teil manuell gesteuert düngt.

Des Weiteren zeigt sich, dass langfristig vor allem in der Kombination mit einem Lenksystem ein deutlich entspannteres und somit auch stressreduzierteres Arbeiten während der Düngung in der Außenwirtschaft möglich wird.

Diskussion

Grundsätzlich lässt sich sagen, dass sich alle befragten Betriebsleiter jederzeit wieder für das teilflächenspezifische Düngen von Stickstoff entscheiden würden, auch wenn sie teilweise Anpassungen in der Vorgehensweise, z.B. andere spezifischere Fragen bei der Einweisung, und Produkt- oder Händlerwechsel vornehmen würden. Die Herausforderungen der Implementierung und des Einsatzes von teilflächenspezifischer Stickstoffdüngung werden im Weiteren diskutiert und es werden mögliche Lösungsansätze vorgeschlagen.

Zu Beginn ist es wichtig festzuhalten, dass die Ergebnisse auf der subjektiven Wahrnehmung der befragten sechs Betriebsleiter beruhen. Jeder Betrieb ist individuell, z.B. hinsichtlich Standortbedingungen, Flächenverfügbarkeit und -strukturiertheit, Arbeitskraftressourcen, Bildungsstand, Zustand und Alter der eingesetzten Traktoren oder finanzieller Möglichkeiten. Somit können die Ergebnisse

nicht pauschal übertragen werden, aber sie eignen sich, um tiefergehende Einblicke in die Einführung von teilflächenspezifischer Stickstoffdüngung im Ackerbau in Baden-Württemberg zu erhalten.

Entscheidung für TFSD – Hintergründe und Motivation?

Der Einsatz von TFSD ist – wie bei anderen digitalen Technologien in der Landwirtschaft – nur möglich, wenn Landwirte die nötige Motivation (PFAFF et al. 2023a) und grundlegende digitale Kompetenzen mitbringen (REITH et al. 2023). Vier der sechs befragten Landwirte schätzen sich selbst als sehr technikaffin ein. Alter, Berufserfahrung, Bildungsgrad, Rechts- oder Erwerbsform und Betriebsgröße haben bei diesen Landwirten nicht die entscheidende Rolle gespielt. Trotzdem kann z. B. das Alter einen Einfluss haben, wenn Generationskonflikte entstehen, da z. B. ältere Personen die Technik nicht annehmen und weiter ohne TFSD wirtschaften möchten. So kann es dazu kommen, dass Betriebe wie B1 Kompromisse finden müssen, um Generationskonflikte zu lösen und weiterhin gemeinsam den Betriebsalltag zu managen, auch wenn dies bedeutet, dass ein Teil der Flächen weiterhin ohne TFSD bewirtschaftet wird.

Die finanzielle Unterstützung durch Investitionsfördermöglichkeiten war bei den befragten Landwirten ausschlaggebend für die Investition in TFSD. Denn besonders für kleinstrukturierte, diversifizierte Betriebe ist es oft nicht möglich, für diesen verhältnismäßig kleinen Arbeitsbereich Stickstoffdüngung eine (teilweise sehr hohe) Investition zu tätigen, da es sich auf den Gesamtprozess und die bewirtschaftete Fläche bezogen kaum rechnet (SONNTAG et al. 2022). Für einen durchschnittlichen Betrieb in Baden-Württemberg (50–100 ha) liegen die Kosten zwischen 23.000 und 33.000 € abhängig davon, ob das Online- oder Offline-Verfahren angewendet wird (MUNZ et al. 2024). Des Weiteren haben die befragten Landwirte Schwierigkeiten die Rentabilität von TFSD einzuschätzen. Dies resultiert z. B. aus einem Mangel an schlag- sowie teilzonenspezifisch dokumentierten Düngungs- und Ertragsdaten, der es den befragten Landwirten erschwert, die Wirtschaftlichkeit ihrer Investition nachzuweisen. Die Unsicherheit über das Potenzial einer verbesserten Rentabilität zur Amortisierung der Investition hindert Landwirte somit häufig daran, eine derartige Investition zu tätigen (BARNES et al. 2019). MUNZ und SCHUELE (2022) empfehlen eine genaue Berechnung der finanziellen Lage, um zu entscheiden, welche Investition sich bei den individuellen Betriebsbedingungen rechnen kann. Ein geeignetes Tool hierfür könnte der Wirtschaftlichkeitsrechner WiLaDi sein (PFAFF und MUNZ 2024).

Ist die Anschaffung von TFSD finanziell möglich, können die Vorteile dieser Technologie in Betracht gezogen werden. Die kleinstrukturierten Flächen in Baden-Württemberg weisen eine hohe Heterogenität auf, wodurch Teilzonen häufig nicht optimal mit Dünger versorgt werden können (ENGELHARDT 2004). Die TFSD unterstützt eine präzisere Düngerverteilung und -ausnutzung (MITTERMAYER et al. 2020) und hilft, die Heterogenität der Pflanzenbestände auszugleichen (SCHMITZ 2017). Dies bestätigen auch die subjektiven Einschätzungen der befragten Landwirte. Grundsätzlich gaben alle befragten Landwirte an, mit der Investition zufrieden zu sein. Die Zufriedenheit hing jedoch davon ab, ob die Haupterwartung in der Düngereinsparung, einem höheren Ertrag oder einer besseren Verteilung des Düngers lag. Besonders wichtig war den befragten Betriebsleitern die optimierte Verteilung des Düngers. Die Antworten der befragten Landwirte bezüglich eines Mehrertrags oder homogenerer Flächen beruhen auf deren subjektiver Einschätzung, nicht auf gemessenen Ergebnissen. Außerdem ist bei den Wahrnehmungen hinsichtlich des Mehrertrags nicht nachzuweisen, ob es an der TFSD oder an bestimmten Wetterbedingungen lag. Zwei Betriebe weisen – subjektiv gesehen – Einsparungen in der Düngemenge auf, allerdings so gering, dass diese keinen Beitrag zur Amorti-

sierung der Technologien bietet – besonders im Hinblick auf die aktuellen Marktabsatzpreise. Diese Einschätzung fügt sich in die divergierenden Einschätzungen bisheriger Studien zu ökonomischen und ökologischen Einsparpotenzialen von TFSD ein (BLASCH et al. 2021, BONGIOVANNI und LOWENBERG-DEBOER 2004, EBERTSEDER et al. 2003, GANDORFER 2006, LANGENBERG et al. 2017, RÖSCH et al. 2005). Es lässt sich also sagen, dass der Einsatz von TFSD bei diesen Betrieben eher zu einer subjektiven Verbesserung der Homogenität der Flächen und in der Qualität der Feldfrüchte aufgrund einer bedarfsgerechten Düngerverteilung geführt hat. Basierend auf diesen Erkenntnissen und den nicht vorab einschätzbaren tatsächlichen (ökonomischen) Mehrwert von TFSD ist es nicht verwunderlich, dass Studien wie GABRIEL und GANDORFER (2022, 2023) oder PFAFF et al. (2023b) die aktive Nutzung von TFSD als zurückhaltend beschreiben.

Einstieg in TFSD – erleichtert durch Lenkassistenten, Spurführungs- oder Lenksysteme?

Digitale Technologien wie z. B. Lenksysteme können den Fahrer wesentlich entlasten, sodass er sich auf die eigentliche Arbeit auf dem Feld konzentrieren kann (SCHMITZ 2017). Durch ein Lenksystem kann auch bei schlechteren Sichtverhältnissen gefahren werden oder der Fahrer kann nebenher andere Aufgaben erledigen bzw. fachfremde Personen können die Nutzung der Maschine leichter erlernen. Das ist vor allem dann hilfreich, wenn z. B. neue Technologien wie TFSD implementiert werden, denn so kann sich der Landwirt auch im Fahrprozess mit der Technologie vertraut machen, was langfristig Fehler und Stress reduzieren kann. Auf neueren Traktormodellen sind Lenksysteme oftmals bereits eingebaut (SCHMITZ 2017). Eine Aufrüstung mit TFSD ist z. B. bei Lenksystemen einfacher möglich, da zum Teil schon Ackerschlagkarteien im Gebrauch sind und somit Feldgrenzen bereits aufgezeichnet sind (SCHMITZ 2017).

Aufgrund der genannten Vorteile sind Lenkassistenten, Spurführungs- oder Lenksysteme im Ackerbau relativ häufig im Einsatz (GABRIEL et al. 2021) und gut für den Einstieg geeignet (PAETOW 2017), denn sie sind ebenfalls verhältnismäßig kostengünstig (BAHRS 2018) bzw. amortisieren sich durch ein Einsparpotenzial an Betriebsmitteln schnell (PAETOW 2017). Allerdings ist hier hinzuzufügen, dass die Betriebe bei PAETOW (2017) hinsichtlich Flächen und Struktur größer waren. Daher fallen die genannten Kostenvorteile also eher für Betriebe mit ausreichend großer Bewirtschaftungsfläche an (MUNZ und SCHUELE 2022), dies kann aber sehr betriebsindividuell sein. Fünf der sechs befragten Betriebsleiter stiegen ebenfalls mit Lenkassistenten, Spurführungs- oder Lenksystemen ein. Durch die Kombination der Lenksysteme mit TFSD lässt sich der Düngungsvorgang auf dem Betrieb erheblich erleichtern, weil dadurch sowohl die Dokumentation als auch der Fahrprozess entlastet werden kann.

Herausforderungen in der Implementierung von TFSD und ihre praktischen Implikationen

Mit Blick auf den Implementierungsprozess gaben die befragten Landwirte an, dass es ca. ein Jahr dauert („Lehrjahr“), bis man sich eingearbeitet hat und mit Herausforderungen wie z. B. Störungen, richtigen Einstellungen sowie der automatisierten Dokumentation umgehen kann, da sich die Arbeitsschritte im Düngeprozess wandeln.

Zunächst gab es bei einzelnen Landwirten Probleme mit der Implementierung von TFSD in bereits vorhandene bzw. ältere Ackerschlagkarteien. Ein Wechsel der Ackerschlagkartei mit dem verbundenen Aufwand und zusätzliche Screenshots als Absicherung bei Systemversagen waren die Lösung. Hier stellt sich die Frage, ob eine bessere vorherige Beratung diesen Wechsel hätte vermeiden können.

Ein Landwirt berichtete, dass die angestrebte präzisere Applikation teilweise mit dem N-Sensor nicht wie gewünscht funktioniert hat, trotz zusätzlicher Erweiterungsinvestitionen. Aufgrund dieser Probleme wird er den N-Sensor verkaufen und wieder mit Offline-Karten arbeiten, da er dies als sicherer und transparenter einstuft. Das Problem lag weniger in der Technik selbst als in der fehlenden fachkundigen Unterstützung. Da kein kompetenter Ansprechpartner zur Verfügung stand, führte dies zu negativen Erfahrungen mit der TFSD, sodass der Landwirt diese Teiltechnologie aufgibt. Auch die Literatur bestätigt, dass negative Erfahrungen den weiteren Einsatz von Innovationen (hier TFSD) hemmen (ROGERS 2003) und dazu führen, dass wieder auf traditionelle Arbeitsweisen zurückgegriffen wird (DRIESSEN und HEUTINCK 2015, LUNDSTRÖM und LINDBLOM 2021). Ein vorzeitiger Ausstieg aus einer solchen (Teil-)Technologie kann allerdings aus ökonomischer Perspektive problematisch sein, insbesondere wenn die Investitionen noch nicht vollständig amortisiert sind. Zudem kann Unsicherheit darüber bestehen, ob eine Amortisation in der Zukunft überhaupt hätte erreicht werden können (MUNZ 2024).

Dies zeigt, dass es dringend notwendig ist, ein ausreichendes Netz an kompetenten Ansprechpersonen aufzubauen, damit Landwirte in Problemfällen zeitnah Unterstützung bekommen können. So könnten Fehlkäufe vermieden und die Zeit und die damit verbundenen (Lern-)Kosten für vergebliche Problemlösungen sinnvoll eingesetzt werden. Eine mögliche Herangehensweise ist die direkte Vernetzung zwischen Landwirten, Unternehmen, Beratungsstellen und anderen relevanten Akteuren. Zur konkreteren Visualisierung könnte eine digitale interaktive Karte mit allen Beteiligten eingerichtet werden. Durch die Nutzung könnten Interessierte leicht Kontakte knüpfen, Wissen austauschen und von den Erfahrungen anderer profitieren. Dieser Ansatz berücksichtigt, dass der Erfahrungsaustausch in der Entscheidungsfindung und Implementierung eine wesentliche Rolle spielt (PFAFF et al. 2022, GIUA et al. 2022).

Auch die Einweisung in die TFSD wurde von den befragten Betriebsleitern als unzureichend und/oder zu kurz eingestuft. Gefehlt haben zum Beispiel Hinweise auf mögliche eingabespezifische Fehlerquellen oder Hilfestellung bei der Einpflege von Feldgrenzen. Alle Betriebsleiter hätten sich bessere Unterstützung und eine schnellere Reaktion gewünscht, da das Zeitfenster zum Düngen sehr kurz ist und teilweise verstrichen war, bis sich Werkstätten, Händler, Hersteller oder Kundendienste zurückgemeldet haben. Als Konsequenz haben die befragten Landwirte auftretende Probleme teilweise selbstständig lösen bzw. sich anderweitig Unterstützung suchen müssen. Ein Netzwerk an Kontaktpersonen zu haben, ist in der Landwirtschaft zwar fast unerlässlich, allerdings sollte dieses nicht dafür notwendig sein, die Tätigkeitsbereiche von Händlern oder Herstellern abzudecken – eine Problematik, die aber in der Landwirtschaft generell verbreitet ist (BLASCH et al. 2021). Demzufolge sind Schulungen für die Landwirte zwar wichtig (PFAFF et al. 2023a), gleichzeitig besteht ein besonders großer Aufholbedarf an der Schulung von fachkundigem Personal (Hersteller, Händler, Werkstätten). Ferner könnte es hilfreich sein, eine Datenbank zu erstellen (ZSCHEISCHLER et al. 2022), in der Informationen und Lösungsansätze der Betriebe gesammelt werden könnten. Betriebe wie B6, der zwischenzeitlich die Ackerschlagkartei gewechselt hat, könnten dort Gründe und Erfahrungen dokumentieren und andere in ihren Entscheidungs- und Implementierungsprozessen unterstützen. Ein konkreter Ansatz könnte hierbei z. B. die Plattform „Farmwissen“ (<https://farmwissen.de/>) sein.

Veränderungen im Betriebsalltag durch die Nutzung von TFSD

Durch die Einführung von TFSD verändert sich bei den befragten Betriebsleitern der Arbeitsvorgang Stickstoffdüngung. Zum Beispiel sollten Düngegaben bedarfsgerecht an die Pflanzenstadien angepasst werden, unter Berücksichtigung möglicher Witterungen. Dies kann dazu führen, dass die fachkundigen Landwirte mehr Zeit im Büro verbringen müssen, um den Düngeprozess vorzubereiten, wohingegen fachfremde Personen auf der Maschine sitzen könnten, da die Düngegabe selbst eingestellt werden kann. Wird zusätzlich z. B. noch ein Lenksystem genutzt, so wird die fachfremde Arbeitskraftzuteilung nochmals erleichtert. Dies kann neue Möglichkeiten der Arbeitszuteilung in Arbeitsspitzen der Saison ermöglichen, insbesondere vor dem Hintergrund des Fachkräftemangels (GINDELE et al. 2016, PITSON et al. 2020).

Die automatische Dokumentation vereinfacht nicht nur die Erfüllung der Auflagen, z. B. im Förderprogramm FAKT oder hinsichtlich der neuen Düngeverordnung, sondern spart effektiv Arbeitszeit und schafft somit Flexibilität in saisonalen Arbeitsspitzen. Die Düngeauswertung kann in den Wintermonaten erledigt und die Erkenntnisse für das Folgejahr weiterverwendet werden. Der Einsatz von TFSD führt bei den befragten Betriebsleitern zu einer erhöhten Flächentransparenz und einem vertieften Verständnis, was das bedarfsgerechte, agronomische Handeln deutlich unterstützen kann. Vor dem Hintergrund sinkender Zahlen landwirtschaftlicher Ausbildungen (BMEL 2023b) und Studierenden (DESTATIS 2024) könnte dies positive Effekte auf das Berufsbild haben und den Beruf „Landwirt“ attraktiver gestalten, da Landwirte so in der Lage sind, datenbasiert und fundiert in der Düngung zu arbeiten, bestenfalls mit geringerem Aufwand.

Allerdings erfordert der Offline-Ansatz eine umfangreiche Vorausplanung und Vorarbeit, was spontane Entscheidungen zur Düngung einschränken kann. Insbesondere in Zeiten des Klimawandels und schnell schwankenden Wetterextremen (MISAAL et al. 2023) kann dies die tatsächliche (stressfreie) Umsetzung erschweren. Es ist daher wichtig, Strategien zu entwickeln, die eine vorausschauende Planung im Winter auf Basis der Düngeauswertung sowie Feinadjustierungen kurz vor der Düngegabe anhand aktueller Daten ermöglichen. So lassen sich die Planungsanforderungen mit der notwendigen Flexibilität im landwirtschaftlichen Alltag vereinbaren. SCHLEICHER und GANDORFER (2018) betonen, dass die Bedienerfreundlichkeit sowie Kompatibilität von digitalen Technologien erhöht werden müsse. Diese Einschätzung spiegelt sich auch bei den befragten Landwirten wider, da sowohl im Implementierungsprozess als auch nach jahrelanger Nutzung von TFSD diesbezüglich Herausforderungen auftreten wie z. B. bei der automatischen Dokumentation mit Ackerschlagkarteien oder Verbindungsschwierigkeiten des N-Sensors. Solche Fälle der Fehlerbehebung können zu Mehraufwand führen, sofern die Verfügbarkeit eigener digitaler Kompetenzen oder fachkundiger Ansprechpartner begrenzt ist.

TFSD wird von den sechs Betriebsleitern überwiegend als entlastend wahrgenommen. Diese positive Wahrnehmung ist jedoch nicht allgemeingültig und hängt stark von der Qualität der Einarbeitung, der Nutzerbegeisterung sowie deren Technikaffinität ab. Dies legt nahe, dass gezielte Schulungen der Ansprechpartner und/oder Landwirte sowie die Unterstützung der Landwirte während der Implementierungsphase entscheidend und unerlässlich sind, um die anfänglichen Hürden zu überwinden und die langfristigen positiven Effekte der TFSD umfassend ausschöpfen zu können.

Schlussfolgerungen

Die Einführung von TFSD folgte bei fünf der sechs befragten Landwirte auf eine bereits getätigte Investition in Lenkassistenten, Lenk- oder Spurführungssysteme. Sowohl vor, während als auch nach der Implementierung von TFSD wurde die Unterstützung durch Hersteller, Händler, Werksbeauftragte oder Kundendienste als mangelhaft und vor allem nicht rechtzeitig eingestuft. So kam es teilweise zu Fehlinvestitionen und langen Einarbeitungszeiten. Die Hinweise der in dieser Untersuchung befragten Landwirte sollten ein Anstoß zur Veränderung sein: Es erfordert praxisnahe Lösungen, damit die genannten Akteure bessere Unterstützungsangebote für die Landwirte bieten und das Vertrauen in die Technologie stärken können.

Trotz dieser negativen Aspekte geben die befragten Landwirte an, nach der Einarbeitung in die Technik überwiegend eine Entlastung wahrzunehmen. Die durch die Einarbeitung anfallenden Lernkosten dürfen trotzdem nicht außer Acht gelassen werden. Die Gründe für eine wahrgenommene Entlastung sind weniger finanzieller, sondern vermehrt sozialer Natur. Die befragten Landwirte gaben an, durch die TFSD z.B. die schlag- und teilzonenspezifische Düngeauswertung in die Wintermonate verschieben zu können oder eine erleichterte Arbeitszuteilung und -zeiterfassung zu haben. Außerdem wurde genannt, dass die automatisierte Dokumentation im Falle der einwandfreien Funktionsfähigkeit die Flexibilität erhöhe und die Mehrarbeit im Büro ausgleiche. Die Kombination mit einem Lenksystem biete ein deutlich entspannteres und angenehmeres Arbeiten auf dem Acker.

Basierend auf den Ergebnissen dieser Studie sowie deren praktischen Implikationen bedarf es konkreter Aktivitäten, um den Einsatz der TFSD in der Praxis zu fördern. Neben (i) Schulungen von Landwirten für fundierte betriebsindividuelle Investitionsentscheidungen sowie (ii) Schulungen von fachkundigem Personal, um zeitnah qualitative Einarbeitung und Unterstützung bieten zu können, sollten (iii) Netzwerke etabliert werden, in denen sich Landwirte untereinander sowie mit fachkundigem Personal austauschen können. Abschließend kann eine (iv) Datenbank mit Erfahrungswerten eine hilfreiche Strategie darstellen, um flächendeckend Erfahrungen bereitstellen zu können. Die Basis für alle genannten Ansätze ist, dass die verschiedenen Akteure (Industrie, (Weiter-) Bildung, Handel) in der Landwirtschaft zusammenarbeiten und zukünftig konkrete Konzepte hierfür entwickelt werden.

Darüber hinaus besteht weiterhin Forschungsbedarf im Bereich betriebsindividueller Wirtschaftlichkeit von TFSD (offline, online, kombiniert) in Betrieben mit kleinstrukturierten Flächengegebenheiten oder grundsätzlich kleiner Betriebsgröße.

Literatur

- Bahrs, E. (2018): Exemplarische betriebswirtschaftliche Auswirkungen der Digitalisierung in der Landwirtschaft und im Agribusiness. Hrsg. H. Wilhelm Schaumann Stiftung, 27. Hülsenberger Gespräche 2018: Landwirtschaft und Digitalisierung, Hamburg, https://www.schaumann-stiftung.de/statics/www_schaumann_stiftung_de/downloads/H%C3%BCIsenberger%20Gespr%C3%A4che/bro_hwss_huelsenberger_gespraech_2018.pdf#page=163, Zugriff am 17.02.2025
- Balafoutis, A.T.; Beck, B.; Fountas, S.; Tsiropoulos, Z.; Vangeyte, J.; van der Wal, T.; Soto-Embodas, I.; Gómez-Barbero, M.; Pedersen, S.M. (2017): Smart Farming Technologies–Description, Taxonomy and Economic Impact. In: Precision Agriculture: Technology and Economic Perspectives, Eds. Pedersen, S.M.; Lind, K.M., Cham, Switzerland, Springer, pp. 21–77
- Barnes, A.P.; Soto, I.; Eory, V.; Beck, B.; Balafoutis, A.T.; Sanchez, B.; Vangeyte, J.; Fountas, S.; van der Wal, T.; Gómez-Barbero, M. (2019): Influencing incentives for precision agricultural technologies within European arable farming systems. *Environmental Science & Policy* 93, pp. 66–74, <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2018.12.014>

- Barrett, H.; Rose, D. C. (2020): Perceptions of the Fourth Agricultural Revolution: What's In, What's Out, and What Consequences are Anticipated? *Sociologia Ruralis* 62(2), <https://doi.org/10.1111/soru.12324>
- Blasch, J.; Vuolo, F.; Essl, L.; van der Kroon, B. (2021): Drivers and Barriers Influencing the Willingness to Adopt Technologies for Variable Rate Application of Fertiliser in Lower Austria. *Agronomy* 11(10), <https://doi.org/10.3390/agronomy11101965>
- Bongiovanni, R.; Lowenberg-Deboer, J. (2004): Precision Agriculture and Sustainability. *Precision Agriculture* 5, pp. 359–387, <https://doi.org/10.1023/B:PRAG.0000040806.39604.a>
- Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) (2023a): Agrarpolitischer Bericht der Bundesregierung 2023. <https://www.bmel.de/SharedDocs/Downloads/DE/Broschueren/agrarbericht-2023.html>, Zugriff am 17.02.2025
- Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) (2023b): Berufliche Bildung – Ausbildung. <https://www.bmel-statistik.de/landwirtschaft/berufliche-bildung/ausbildung>, Zugriff am 17.02.2025
- Carolan, M. (2017): Publicising Food: Big Data, Precision Agriculture, and Co-Experimental Techniques of Addition. *Sociologia Ruralis* 57(2), pp. 135–154, <https://doi.org/10.1111/soru.12120>
- Cisternas, I.; Velásquez, I.; Caro, A.; Rodríguez, A. (2020): Systematic literature review of implementations of precision agriculture. *Computers and Electronics in Agriculture* 176, 105626, <https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105626>
- Dresing, T.; Pehl, T. (2017): Praxisbuch Interview, Transkription & Analyse: Anleitungen und Regelsysteme für qualitativ Forschende. Marburg, Dr. Dresing & Pehl GmbH
- Driessen, C.; Heutinck, L.F.M. (2015): Cows desiring to be milked? Milking robots and the co-evolution of ethics and technology on Dutch dairy farms. *Agriculture and Human Values* 32(1), pp. 3–20, <https://doi.org/10.1007/s10460-014-9515-5>
- Duncan, E.; Glaros, A.; Ross, D. Z.; Nost, E. (2021): New but for whom? Discourses of innovation in precision agriculture. *Agriculture and Human Values* 38(4), pp. 1181–1199, <https://doi.org/10.1007/s10460-021-10244-8>
- Ebertseder, T.; Gutser, R.; Hege, U.; Brandhuber, R.; Schmidhalter, U. (2003): Strategies for site-specific nitrogen fertilization with respect to long-term environmental demands. In: *Precision Agriculture*, Eds. Stafford, J.; Werner, A., Wageningen, Wageningen Academic Publishers, pp. 193–198
- Engelhardt, H. (2004): Auswirkungen von Flächengröße und Flächenform auf Wendezeiten, Arbeitserledigung und verfahrenstechnische Maßnahmen im Ackerbau. Dissertation, Justus-Liebig-Universität, Fachbereich Agrarwissenschaften, Ökotrophologie und Umweltmanagement, Gießen, <https://jpubub.uni-giessen.de/items/9c5ef849-b361-4bae-a89e-caac954e6658>, Zugriff am 17.02.2025
- Frey, C. B.; Osborne, M. A. (2013): The future of employment. How susceptible are jobs to computerisation? https://www.oxfordmartin.ox.ac.uk/downloads/academic/The_Future_of_Employment.pdf, Zugriff am 20.03.2025
- Gabriel, A.; Gandorfer, M. (2023): Adoption of digital technologies in agriculture—An inventory in a european small-scale farming region. *Precision Agriculture* 24(1), pp. 68–91, <https://doi.org/10.1007/s11119-022-09931-1>
- Gabriel, A.; Gandorfer, M.; (2022): Landwirte-Befragung 2022 – Digitale Landwirtschaft Bayern: Ergebnisband (n=805). https://www.lfl.bayern.de/mam/cms07/ilt/dateien/ilt6_dft_ergebnisband_by_2022_805.pdf, Zugriff am 17.02.2025
- Gabriel, A.; Gandorfer, M.; Spykman, O. (2021): Nutzung und Hemmnisse digitaler Technologien in der Landwirtschaft: Sichtweisen aus der Praxis und in den Fachmedien. *Berichte über Landwirtschaft* 99(1), S. 1–27, <https://doi.org/10.12767/buel.v99i1.328>
- Gandorfer, M. (2006): Bewertung von Precision Farming dargestellt am Beispiel der teilflächenspezifischen Stickstoffdüngung. Dissertation, Technische Universität München, <https://mediatum.ub.tum.de/doc/603702/00000bd5.pdf>, Zugriff am 17.02.2025
- Gandorfer, M.; Meyer-Aurich, A. (2017): Economic Potential of Site-Specific Fertiliser Application and Harvest Management. In: *Precision Agriculture: Technology and Economic Perspectives*, Eds. Pedersen, S.M.; Lind, K.M., Cham, Switzerland, Springer, S. 79–92
- Gindele, N.; Kaps, S.; Doluschitz, R. (2016): Betriebliche Möglichkeiten im Umgang mit dem Fachkräftemangel in der Landwirtschaft. In: *Berichte über Landwirtschaft* 94(1), <https://doi.org/10.12767/buel.v94i1.89>

- Giua, C.; Materia, V.C.; Camanzi, L. (2022): Smart farming technologies adoption: Which factors play a role in the digital transition? *Technology in Society* 68, <https://doi.org/10.1016/j.techsoc.2022.101869>
- Glaser, B.G.; Strauss, A.L. (1998/1967): *Grounded Theory*. Göttingen: Huber (amerik. Orig.: *The Discovery of Grounded Theory*. Chicago: Aldine, 1967)
- Goller, M.; Caruso, C.; Harteis, C. (2021): Digitalisation in Agriculture: Knowledge and Learning Requirements of German Dairy Farmers. *International Journal for Research in Vocational Education and Training* 8(2), pp. 208–223, <https://doi.org/10.13152/IJRVET.8.2.4>
- Groher, T.; Heitkämper, K.; Walter, A.; Liebisch, F.; Umstätter, C. (2020): Status quo of adoption of precision agriculture enabling technologies in Swiss plant production. *Precision Agriculture* 21(6), pp. 1327–1350, <https://doi.org/10.1007/s11119-020-09723-5>
- Hansen, B. G.; Bugge, C. T.; Skibrek, P. K. (2020): Automatic milking systems and farmer wellbeing—exploring the effects of automation and digitalization in dairy farming. *Journal of Rural Studies* 80, pp. 469–480, <https://doi.org/10.1016/j.jrurstud.2020.10.028>
- Heege, H.J. (Ed.) (2013): *Precision in Crop Farming: Site Specific Concepts and Sensing Methods: Applications and Results*. Dordrecht, Springer
- Kehl, C.; Meyer, R.; Steiger, S. (2021): Digitalisierung der Landwirtschaft: Gesellschaftliche Voraussetzungen, Rahmenbedingungen und Effekte. Teil II des Endberichts zum TA-Projekt. TAB-Arbeitsbericht Nr. 194, Berlin, Büro für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag (TAB), <https://doi.org/10.5445/IR/1000142951>
- Klerkx, L.; Rose, D. (2020): Dealing with the game-changing technologies of Agriculture 4.0: How do we manage diversity and responsibility in food system transition pathways? *Global Food Security* 24, <https://doi.org/10.1016/j.gfs.2019.100347>
- Knierim, A.; Kernecker, M.; Erdle, K.; Kraus, T.; Borges, F.; Wurbs, A. (2019): Smart farming technology innovations – Insights and reflections from the German Smart-AKIS hub. *NJAS: Wageningen Journal of Life Sciences* 90–91(1), <https://doi.org/10.1016/j.njas.2019.100314>
- Kolady, D. E.; van der Sluis, E.; Uddin, M. M.; Deutz, A. P. (2021): Determinants of adoption and adoption intensity of precision agriculture technologies: Evidence from South Dakota. *Precision Agriculture* 22, pp. 689–710, <https://doi.org/10.1007/s11119-020-09750-2>
- Kuckartz, U. (2018): *Qualitative Inhaltsanalyse. Methoden, Praxis, Computerunterstützung*. Weinheim, Beltz Juventa
- Langenberg, J.; F. Nordhaus, L. Theuvsen (2017): Navigations- und N-Sensorgestützte Anwendungen in der Landwirtschaft – eine Rentabilitätsanalyse. In: Hrsg. Ruckelshausen, A.; Meyer-Aurich, A.; Lentz, W.; Theuvsen, B., *Informatik in der Land-, Forst- und Ernährungswirtschaft*, Bonn, Gesellschaft für Informatik e.V., S. 97–100
- Lambert, D.; Lowenberg-Deboer, J. (2000): *Precision Agriculture Profitability Review*. Site-specific Management Center. Purdue, School of Agriculture Purdue University, <https://ag.purdue.edu/ssmc/frames/newsoilsx.pdf>, Zugriff am 17.02.2025
- Lundström, C.; Lindblom, J. (2021): Care in dairy farming with automatic milking systems, identified using an Activity Theory lens. *Journal of Rural Studies* 87, pp. 386–403, <https://doi.org/10.1016/j.jrurstud.2021.09.006>
- Mayring, P. (2015): *Qualitative Inhaltsanalyse: Grundlagen und Techniken*. Weinheim, Beltz Verlag http://content-select.com/index.php?id=bib_view&ean=9783407293930, Zugriff am 17.02.2025
- Metta, M.; Ciliberti, S.; Obi, C.; Bartolini, F.; Klerkx, L.; Brunori, G. (2022): An integrated socio-cyber-physical system framework to assess responsible digitalisation in agriculture: A first application with Living Labs in Europe. *Agricultural Systems* 203, <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2022.103533>
- Meuser, M.; Nagel, U. (2009): Das Experteninterview – Konzeptionelle Grundlagen und methodische Anlage. In: Hrsg. Pickel, S.; Pickel, G.; Lauth, H.-J.; Jahn, D., *Methoden der vergleichenden Politik- und Sozialwissenschaft: Neue Entwicklungen und Anwendungen*, S. 465–479, VS Verlag für Sozialwissenschaften, https://doi.org/10.1007/978-3-531-91826-6_23
- Misaal, M.A.; Zahra, S.M.; Rasul, F.; Imran, M.; Noor, R.; Fahad, M. (2023): Influence of Climate Change on Crop Yield and Sustainable Agriculture. In: Eds. Pande, C.B.; Moharir, K.N.; Singh, S.K.; Pham, Q.B.; Elbeltagi, A., *Climate Change Impacts on Natural Resources, Ecosystems and Agricultural Systems*, Springer Climate, Cham, Springer, https://doi.org/10.1007/978-3-031-19059-9_7

- Mittermayer, M.; Gilg, A.; Maidl, F.-X.; Hülsbergen, K.-J. (2020): Erfassung der räumlichen Variabilität von Boden- und Pflanzenparametern: Grundlage für die teilflächenspezifische N-Bilanzierung. In: Hrsg. M. Gandorfer et al., 40. GIL-Jahrestagung, Digitalisierung für Mensch, Umwelt und Tier, Weihenstephan, Freising. 17.–18. Februar 2020, Bonn, Gesellschaft für Informatik e.V., pp. 181–186
- Munz, J. (2024): What if precision agriculture is not profitable?: A comprehensive analysis of the right timing for exiting, taking into account different entry options. *Precision Agriculture* 25, pp. 1284–1323, <https://doi.org/10.1007/s11119-024-10111-6>
- Munz, J.; Maurmann, I.; Schuele, H.; Doluschitz, R. (2024): Digital transformation at what cost? A case study from Germany estimating the adoption potential of precision farming technologies under different scenarios. *Smart Agricultural Technology* 9, <https://doi.org/10.1016/j.atech.2024.100585>
- Munz, J.; Schuele, H. (2022): Influencing the Success of Precision Farming Technology Adoption—A Model-Based Investigation of Economic Success Factors in Small-Scale Agriculture. *Agriculture* 12(11), <https://doi.org/10.3390/agriculture12111773>
- Paetow, H. (2017): Landwirtschaft 4.0 – Erfahrungen aus der Praxis. In: Hrsg. Wendl, G., Tagungsband Landtechnische Jahrestagung 21.11.2017, Ackerbau – technische Lösungen für die Zukunft, Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL), S. 27
- Pfaff, S.A.; Paulus, M.; Schüle, H.; Thomas, A. (2023a): Werden Landwirte zu IT-Spezialisten?: Ein Mixed-Methods-Ansatz zur Erfassung der digitalen Kompetenzanforderungen und des Kompetenzstands der Betriebsleiter in Baden-Württemberg. *Berichte über Landwirtschaft* 101(2), S. 1–38, <https://doi.org/10.12767/buel.v101i2>
- Pfaff, S.A.; Thomas, A.; Schüle, H.; Knierim, A. (2023b): Auswirkungen digitaler Technologien im Betriebsalltag aus Sicht baden-württembergischer Landwirte. *agricultural engineering.eu* 78(3), <https://doi.org/10.15150/LT.2023.3297>
- Pfaff, S.A.; Munz, J. (2024): Verbindung von Wissenschaft und Praxis: WiLaDi. In: Hrsg. Hoffmann, C. et al., 44. GIL-Jahrestagung, Biodiversität fördern durch digitale Landwirtschaft, Stuttgart, 27.–28.02.2024, Bonn, Gesellschaft für Informatik e.V., https://gil-net.de/Publikationen/GIL_24_Proceedings_final-3.pdf, Zugriff am 17.02.2025
- Pitson, C.; Appel, F.; Balmann, A. (2020): Policy Brief – Politikoptionen zur Stärkung der Resilienz in der Landwirtschaft angesichts demographischer Herausforderungen. D3.9, https://www.surefarmproject.eu/wp-content/uploads/2020/08/D3.9_Policy-brief-on-farm-demographics-German.pdf, Zugriff am 17.02.2025
- Statistisches Bundesamt (2024): Hochschulen – Studierende nach Fächergruppen. Stand 9. August 2024, <https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Bildung-Forschung-Kultur/Hochschulen/Tabellen/studierende-insgesamt-faechergruppe.html>, Zugriff am 17.02.2025
- Pierpaoli, E.; Carli, G.; Pignatti, E.; Canavari, M. (2013): Drivers of Precision Agriculture Technologies Adoption: A Literature Review. *Procedia Technology* 8, pp. 61–69, <https://doi.org/10.1016/j.protcy.2013.11.010>
- Prause, L. (2021): Digital Agriculture and Labor: A Few Challenges for Social Sustainability. *Sustainability* 13(11), <https://doi.org/10.3390/su13115980>
- Rakun J.; Rihter E.; Kelc D.; Denis S.; Vindiš P.; Berk P.; Polič P.; Lakota M. (2022): Possibilities and concerns of implementing precision agriculture technologies on small farms in Slovenia. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering* 15(3), pp. 16–21, <https://doi.org/10.25165/j.ijabe.20221503.6111>
- Regan, Á. (2019): ‘Smart farming’ in Ireland: A risk perception study with key governance actors. *NJAS: Wageningen Journal of Life Sciences* 90–91(1), <https://doi.org/10.1016/j.njas.2019.02.003>
- Reichardt, M.; Jürgens, C. (2009): Adoption and future perspective of precision farming in Germany: Results of several surveys among different agricultural target groups. *Precision Agriculture* 10(1), 73–94, <https://doi.org/10.1007/s11119-008-9101-1>
- Reissig, L. (2021): Stress durch Digitalisierung? Agrarbericht 2022, <https://2022.agrarbericht.ch/de/mensch/bauernfamilie/wahrnehmung-der-digitalisierung-durch-landwirte-und-landwirtinnen>, Zugriff am 17.02.2025
- Reith, S.; Frisch, J.; Kunisch, M. (2023): Chancen und Risiken der Digitalisierung in der Landwirtschaft. *agricultural engineering.eu* 78(3), <https://doi.org/10.15150/lt.2023.3296>
- Rob, V.; Lorenzo, G. B. (2019): Chapter 2—Global Trends and Challenges to Food and Agriculture into the 21st Century. In: Eds. Campanhola, C.; Pandey, S., *Sustainable Food and Agriculture*, pp. 11–30, Academic Press, <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-812134-4.00002-9>

- Rogers, E. M. (2003): Diffusion of innovations. New York, Free Press
- Rolandi, S.; Brunori, G.; Bacco, M.; Scotti, I. (2021): The Digitalization of Agriculture and Rural Areas: Towards a Taxonomy of the Impacts. *Sustainability* 13(9), <https://doi.org/10.3390/su13095172>
- Rösch, C.; Dusseldorp, M.; Meyer, R. (2005): Precision Agriculture. Berlin, Büro für Technikfolgen-Abschätzung beim Dt. Bundestag (TAB), <https://www.fe-lexikon.info/material/texte/TAB-Arbeitsbericht-ab106.pdf>, Zugriff am 17.02.2025
- Schewe, R. L.; Stuart, D. (2015): Diversity in agricultural technology adoption: How are automatic milking systems used and to what end? *Agriculture and Human Values* 32(2), pp. 199–213, <https://doi.org/10.1007/s10460-014-9542-2>
- Schleicher, S.; Gandorfer, M. (2018): Digitalisierung in der Landwirtschaft: Eine Analyse der Akzeptanzhemmnisse. In: Hrsg. A. Ruckelshausen et al., *Digitale Marktplätze und Plattformen, Lecture Notes in Informatics (LNI)*, Gesellschaft für Informatik, Bonn 2018, S. 203–206
- Schmitz, B. (2017): Digitale Landwirtschaft aus der Sicht eines Landmaschinenherstellers. In: Hrsg. Wendl, G., Tagungsband Landtechnische Jahrestagung 21.11.2017, Ackerbau – technische Lösungen für die Zukunft, Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL), S. 21
- Shang, L.; Heckelei, T.; Gerullis, M. K.; Börner, J.; Rasch, S. (2021): Adoption and diffusion of digital farming technologies—Integrating farm-level evidence and system interaction. *Agricultural Systems* 190, 103074, <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2021.103074>
- Sonntag, W.I.; Wienrich, N.; Severin, M.; Schulze Schwering, D. (2022): Precision Farming – Nullnummer oder Nutzbringer? Eine empirische Studie unter Landwirten. *Berichte über Landwirtschaft* 100(2), <https://doi.org/10.12767/buel.v100i2.411>
- Sparrow, R.; Howard, M. (2021): Robots in agriculture: Prospects, impacts, ethics, and policy. *Precision Agriculture* 22, pp. 818–833, <https://doi.org/10.1007/s11119-020-09757-9>
- Statistisches Landesamt Baden-Württemberg (2021): Landwirtschaftszählung 2020. Strukturen im Wandel. https://www.statistik-bw.de/Service/Veroeff/Statistik_AKTUELL/803421006.pdf, Zugriff am 17.02.2025
- Strauss, A.L. (1991): Grundlagen qualitativer Sozialforschung. München, Fink Verlag (amerik. Orig.: *Qualitative Analysis for Social Scientists*. New York: Cambridge University Press, 1987)
- Wagner, P. (2010): Bewertung unterschiedlicher Ansätze zur teilflächenspezifischen Düngung aus informationstechnischer und ökonomischer Sicht. In: Hrsg. Claupein W.; Theuvsen, L.; Kämpf, A.; Morgenstern, M., *Precision Agriculture Reloaded – Informationsgestützte Landwirtschaft*, Bonn, Gesellschaft für Informatik e.V., S. 217–220
- Weber, R.; Braun, J.; Frank, M. (2022): How does the Adoption of Digital Technologies Affect the Social Sustainability of Small-scale Agriculture in South-West Germany? *Journal on Food System Dynamics* 13(3), <https://doi.org/10.18461/IJFSD.V13I3.C3>
- Zscheischler, J.; Brunsch, R.; Rogga, S.; Scholz, R. W. (2022): Perceived risks and vulnerabilities of employing digitalization and digital data in agriculture – Socially robust orientations from a transdisciplinary process. *Journal of Cleaner Production* 358, 132034, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.132034>

Autorinnen

Sara Anna Pfaff, M. Sc. und **Ines Maurmann, M. Sc.** sind wissenschaftliche Mitarbeiterinnen an der Hochschule für Wirtschaft und Umwelt Nürtingen-Geislingen, Institut für angewandte Agrarforschung (IAAF), Campus C18 115, Neckarsteige 6–10, 72622 Nürtingen. E-Mail: sara.pfaff@hfwu.de

Hinweise und Danksagungen

Die Förderung des Vorhabens DiWenLa (Digitale Wertschöpfungsketten für eine nachhaltige kleinstrukturierte Landwirtschaft) erfolgt aus Mitteln des Bundesministeriums für Ernährung und Landwirtschaft aufgrund eines Beschlusses des deutschen Bundestages. Die Projektträgerschaft liegt bei der Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung im Rahmen der Förderung der Digitalisierung in der Landwirtschaft (28DE106B18) und wird durch das Ministerium für Ernährung, Ländlichen Raum und Verbraucherschutz Baden-Württemberg unterstützt.

Bei weiterem Interesse am Leitfaden für die qualitativen Interviews sowie der Datengrundlage können Informationen dazu gerne beim Autor angefragt werden. Im Rahmen des Forschungsteams möchten wir uns ganz herzlich bei den befragten Landwirten bedanken, welche uns in dieser qualitativen Studie maßgeblich unterstützt haben.