

Sandra Rajmis^{1,2}, Isabella Karpinski¹, Hella Kehlenbeck¹

Ökonomische Kennzahlen und betriebswirtschaftliche Bewertung von teilflächenspezifischen Pflanzenschutzmittelapplikationen mit Direkteinspeisung und Assistenzsystem

Key performance indicators and economic assessment of site-specific pesticide applications with direct injection and application assistance system

159

Zusammenfassung

Teilflächenspezifische Applikationen von Pflanzenschutzmitteln haben im Vergleich zu flächeneinheitlichen ein hohes Potenzial, die reduzierte Ausbringung von Pflanzenschutzmitteln zu fördern. Im Rahmen des Forschungsprojektes „AssSys“ wurden erstmals teilflächenspezifische Pflanzenschutzmaßnahmen mit Direkteinspeisung und einem automatisierten Applikations-Assistenzsystem für Herbizid- und Fungizidmaßnahmen ökonomisch bewertet. Die ökonomische Bewertung basiert auf Feldversuchen und einer Szenarioanalyse. Die Feldversuche wurden in den Jahren 2018 und 2019 in Norddeutschland durchgeführt. Als wichtigste Kennzahl auf Betriebsebene wurde die direkt- und arbeitskostenfreie Leistung (DAL) herangezogen. In der Szenarioanalyse wurden zwei teilflächenspezifische Anwendungsszenarien mit einer flächeneinheitlichen Behandlung verglichen, bezogen auf einen Modellbetrieb. Die Unkrautbonituren wurden als (1) Standardverfahren gemäß dem integrierten Pflanzenschutz, (2) kamerabasiert und (3) drohnenbasiert in den Feldversuchen durchgeführt. Das Assistenzsystem zielt darauf ab, Landwirte bei der Entscheidungsfindung und praktischen Umsetzung von teilflächenspezifischen Pflanzenschutzapplikationen in der Planungsphase oder einer

Ex-post-Bewertung zu unterstützen. Für die automatisierte betriebswirtschaftliche Bewertung von teilflächenspezifischen Pflanzenschutzmittelapplikationen wurden mehrere Kennzahlen identifiziert und innerhalb eines Pflanzenschutzkosten- und Benchmark-Webservices im Assistenzsystem implementiert. Die Applikationskosten enthalten neben den Pflanzenschutzmitteln auch die Lohn- und Maschinenkosten für Bonituren und die Ausbringung. Investitionskosten für die notwendige technische Ausstattung zur teilflächenspezifischen Applikation wurden berücksichtigt. Die ökonomische Szenarioanalyse ergab durchschnittliche Kosteneinsparungen bei Pflanzenschutzmitteln, Lohn- und Maschinenkosten von 26 % bis 66 % für teilflächenspezifischen Applikationen im Vergleich zur flächeneinheitlichen. Die durchschnittliche DAL für teilflächenspezifische Applikationen von 787 € ha⁻¹ im Vergleich zu 631 € ha⁻¹ bei flächeneinheitlichen zeigt einen klaren betriebswirtschaftlichen Vorteil der teilflächenspezifischen Szenarien. Die teilflächenspezifische Applikation von Pflanzenschutzmitteln kann Landwirte bei der Umsetzung eines präzisen, nachhaltigen und wirtschaftlichen Pflanzenschutz-Managements unterstützen und dazu beitragen, die Ziele des neuen europäischen Green Deals zur Reduzierung der Pflanzenschutzmittelanwendungen und deren Risiken zu erreichen.

Affiliationen

¹ Julius Kühn-Institut (JKI) – Bundesforschungsinstitut für Kulturpflanzen, Institut für Strategien und Folgenabschätzung, Stahnsdorfer Damm 81, 14532 Kleinmachnow

² TU Berlin, Zentrum Technik und Gesellschaft, Kaiserin-Augusta-Allee 104, 10553 Berlin

Kontaktanschrift

Dr. Sandra Rajmis, Julius Kühn-Institut (JKI) – Bundesforschungsinstitut für Kulturpflanzen, Institut für Strategien und Folgenabschätzung, Stahnsdorfer Damm 81, 14532 Kleinmachnow, E-Mail: sandra.rajmis@tu-berlin.de

Zur Veröffentlichung eingereicht/angenommen

22. Februar 2021/14. April 2021

Stichwörter: Teilflächenspezifische Pflanzenschutzapplikationen, Szenarioanalyse, Pflanzenschutzkosten-Webservice und Benchmark-Webservice, Reduzierung von Pflanzenschutzkosten, direkt- und arbeitserledigungs-kostenfreie Leistung (DAL)

Abstract

Site-specific pesticide applications have a high potential to promote reductions in pesticides compared to conventional pesticide applications. Within the research project 'AssSys', site-specific pesticide applications with a direct injection sprayer system and an automatic application assistant were evaluated economically with respect to herbicide and fungicide applications. The economic assessment was based on field trials and scenario analysis. The field trials were conducted in 2018 and 2019 in the North of Germany. As key performance indicator at farm level, extended gross margins were calculated. In the scenario analysis, two site-specific application scenarios were compared to conventional uniform treatment, referring to a model farm. Weed monitoring was conducted as (1) standard procedure according to integrated pest management, (2) camera-based and (3) drone-based in the field trials. The application assistant aims to support farmers in decision-making and practical implementation of site-specific pesticide applications either in the planning stage or as ex-post assessment. For the economic assessment of site-specific pesticide applications, several key performance indicators were identified and implemented in the plant protection cost-webservice and benchmark-webservice within the application assistant. Pesticide application costs include plant protection products as well as labour and machine costs of monitoring and pesticide applications. Investment costs of the necessary technical equipment for site-specific applications were considered. The economic scenario-analysis showed average pesticide cost savings (plant protection products, labour and machine costs) from 26 % to 66 % for site-specific applications compared to conventional applications. The average extended gross margin for site-specific applications of 787 € ha⁻¹ compared to 631 € ha⁻¹ for conventional (uniform) application indicates a clear economic advantage of the site-specific application scenarios. Site-specific pesticide applications can support farmers in implementing precise, sustainable and also economic pesticide management and may thus contribute to meet the goals of the new European Green Deal to reduce pesticide use and risks of pesticides.

Key words: site-specific pesticide applications, scenario analysis, plant protection cost-webservice and benchmark-webservice, pesticide cost savings, extended gross margin

Einleitung

Gemäß den Grundsätzen des integrierten Pflanzenschutzes (IPS) ist die Anwendung von Pflanzenschutzmitteln

(PSM) auf das Notwendige Maß zu begrenzen und nach dem Prinzip „so wenig wie möglich, so viel wie nötig“ durchzuführen. Dazu bedient man sich einer Fülle von Verfahren und Maßnahmen einschließlich moderner Pflanzenschutztechnik und zunehmend von Methoden aus dem Bereich der Digitalisierung. Zudem spiegeln sich gesellschaftliche Forderungen nach einer Verringerung der Anwendung von PSM auch im Europäischen Green Deal wider und bedürfen geeigneter Verfahren und Lösungsansätze.

Precision Farming-Methoden (PF), wie die teilflächenspezifische Applikation von PSM, unterstützen das Ziel einer reduzierten Anwendung von PSM. Im Vergleich zu flächeneinheitlichen PSM-Applikationen, die in der Regel auf 100 % der Feldfläche durchgeführt werden, zielt die teilflächenspezifische PSM-Applikation nur auf die Bereiche des Feldes, in denen Unkräuter, Schädlinge oder Krankheitserreger in einer Dichte auftreten, die die Schadensschwelle überschreiten. Teilflächenspezifische PSM-Applikationen mit Applikationsassistenzsystemen erfordern Applikationskarten, die sich auf die Boniturergebnisse des jeweiligen zu behandelnden Schrages stützen. Idealerweise werden diese Boniturdaten von Sensoren oder Drohnen generiert, was bisher in der landwirtschaftlichen Praxis noch unzureichend umgesetzt ist. Landwirte in Deutschland setzen PF-Verfahren bisher hauptsächlich zur Feldvermessung, Bodenbeprobung und Ertragskartierung ein (HINCK et al., 2016). Die Zahl der Landwirte und Lohnunternehmer, die PF-Verfahren für Pflanzenschutzmaßnahmen einsetzen, steigt jedoch langsam an (RASMUSSEN et al., 2020). Obwohl die Investitionskosten für PF-Technologien noch relativ hoch sind, nutzen acht von zehn deutschen Landwirten bereits diese Technologien. Unsicherheiten bestehen bei Landwirten wegen der Datensicherheit (AGRA-EUROPE, 2020).

In jüngster Zeit wurde das Applikations-Assistenzsystem „Pflanzenschutz-Anwendungs-Manager“ (PAM) entwickelt, das in der Lage ist, die gesetzlichen Abstandsaufgaben zu Gewässern und Landschaftsstrukturen bei der PSM-Applikation automatisiert zu berücksichtigen, nachdem alle abstandsrelevanten Landschaftsstrukturen wie z. B. Hecken oder Gewässer vom Landwirt eingemessen wurden (FEDERLE et al., 2014, RAJMIS et al., 2016). In Erweiterung des Applikations-Assistenzsystems „PAM“, kann das neue Assistenzsystem, das für das Projekt „AssSys“ entwickelt wurde, den Schritt des manuellen Einmessens zur Berücksichtigung von Landschaftsstrukturen automatisieren.

Die neueste Entwicklung im Bereich PF sind teilflächenspezifische Anwendungen von Feldspritzen mit Direkteinspeisung und Mehrkammersystem (DIS; POHL et al., 2017). Im Forschungsprojekt „AssSys“ (Assistenzsystem für die teilflächenspezifische Applikation von Pflanzenschutzmitteln) wurden die DIS und ein im Projekt entwickeltes Assistenzsystem untersucht und wirtschaftlich bewertet. Zudem wurden ein Pflanzenschutzkosten-Webservice und ein Benchmark-Webservice anhand geeigneter ökonomischer Kennzahlen entwickelt und implementiert.

Benchmarking bezeichnet ursprünglich eine Managementmethode, mit der sich durch zielgerichtete Vergleiche unter mehreren Unternehmen, Prozessen oder Produkten das jeweils Beste als Referenz zur Leistungsoptimierung identifizieren lässt (DEUTSCHES BENCHMARKING ZENTRUM (DBZ), 2018; INFORMATIONSZENTRUM BENCHMARKING AM FRAUNHOFER INSTITUT (izB), 2018). Durch den Vergleich können *Best oder Successful Practices* identifiziert werden. Im nächsten Schritt müssen diese dann auf die eigene Situation angepasst werden. Dabei werden Kennzahlen zum Vergleich eingesetzt (DBZ, 2018; izB, 2018). Die Methode des Benchmarkings lässt sich auch auf einen landwirtschaftlichen Betrieb und die Bewertung von (PSM-)Maßnahmen, die auf dem Betrieb durchgeführt werden, übertragen. Die beiden Webservices für das Assistenzsystem wurden für die einzelbetrieblich angepasste Entscheidungsunterstützung von Landwirten zur Optimierung der (teilflächenspezifischen) Pflanzenschutzmaßnahmen entwickelt und ermöglichen einen automatisierten Vergleich von ökonomischen Kennzahlen innerhalb des eigenen Betriebes und mit anderen Betrieben innerhalb eines Betriebsnetzwerks. Geeignete ökonomische Kennzahlen charakterisieren dabei die Wirtschaftlichkeit der verwendeten Maßnahmen und Verfahren für den Betrieb beispielsweise hinsichtlich der Kosten oder Effizienz und basieren auf der betriebswirtschaftlichen Leistungs-Kosten-Rechnung (z. B. SCHROERS & SAUER, 2011; MUßHOFF & HIRSCHAUER, 2016).

Reduzierte Herbizidanwendungen bei teilflächenspezifischen PSM-Applikationen im Vergleich zu flächeneinheitlichen Applikationen wurden z. B. von GERHARDS &

CHRISTENSEN, 2003, NORDMEYER et al., 2003, TIMMERMANN et al., 2003 sowie HUFNAGEL et al., 2004 beschrieben.

Ökonomische Bewertungsstudien zu PF-Technologien mit Assistenzsystem, Drohnen oder Sensoren und Direkt-einspeisung gibt es bisher jedoch nicht und wurden erstmals in der vorliegenden Arbeit vorgenommen.

Dabei stellten sich folgende Forschungsfragen:

- (1) Welche Kosteneinsparungen können durch die teilflächenspezifische Applikation von PSM erzielt werden?
- (2) Welche weiteren wirtschaftlichen Vorteile ergeben sich aus den möglichen Kosteneinsparungen für einen landwirtschaftlichen Betrieb?
- (3) Können die Kosteneinsparungen bei den PSM die Investitionskosten für die PF-Technologie und das neu entwickelte Applikationsassistenzsystem kompensieren?

Material und Methoden

Vorgehensweise

Im Rahmen des Forschungsprojektes wurde die ökonomische Grundlage einer einzelbetrieblich angepassten Entscheidungsunterstützung mithilfe web-basierter Systeme entwickelt (Abb. 1; Teil A). Hierfür wurden ökonomische Kennzahlen für das Assistenzsystem identifiziert und in entsprechenden Webservices implementiert. Schließlich wurde einer der Webservices mit Hilfe von generischen Applikationsmustern aus Brandenburg getestet.

Die Ermittlung der wirtschaftlichen Vorteile teilflächenspezifischer PSM-Applikationen mit Hilfe des Assis-

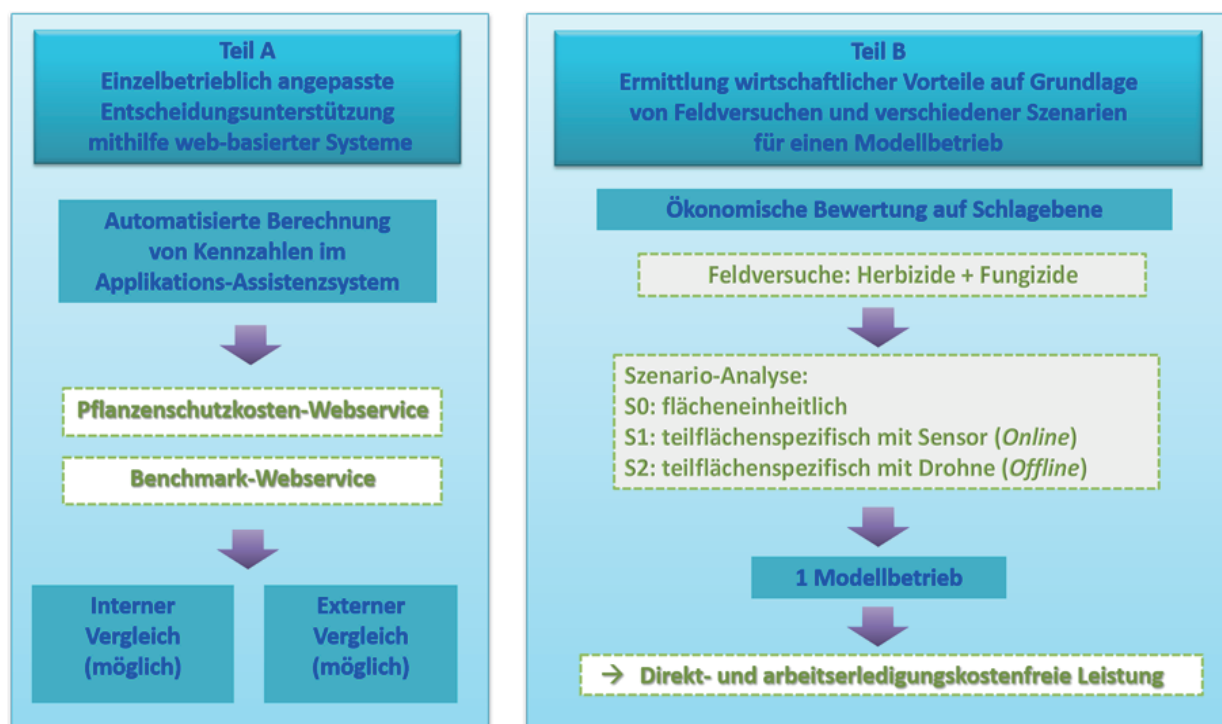


Abb. 1. Vorgehensweise bei der betriebswirtschaftlichen Bewertung.

benzsystems erfolgte auf der Grundlage von Feldversuchen in den Jahren 2018 und 2019 sowie für einen theoretischen Modellbetrieb in Norddeutschland. Hierfür wurde eine Szenarioanalyse mit verschiedenen Varianten der teilflächenspezifischen Bonitur und PSM-Applikation durchgeführt (Abb. 1; Teil B).

Kennzahlen

Die Kennzahlen des Pflanzenschutzkosten- und Benchmark-Webservices umfassen standardisierte Kennzahlen aus der betriebswirtschaftlichen Leistungs-Kosten-Rechnung oder zusammengesetzte Kennzahlen aus diesen, welche die landwirtschaftliche Intensität und Produktivität beschreiben (SCHROERS & SAUER, 2011; VOLLRATH, 2011; ATTAR et al., 2012; MUßHOFF & HIRSCHAUER, 2016). Letztere sind zum einen an Buchführungskennzahlen angelehnt und zum anderen aus dem Farm Management-Informationssystem (FMIS) relativ einfach zu berechnen. Auswahlkriterien für die Kennzahlen innerhalb des Benchmark-Webservices waren die Verfügbarkeit von Datenquellen (z. B. über FMIS) und ein möglichst einfaches Handling der Kennzahlen(-komponenten).

Feldversuche

Die Feldversuche wurden an drei Standorten (Sicke, Osterwieck und Cappeln) im Nordwesten Deutschlands in den Jahren 2018 und 2019 auf sechs Versuchspartellen durchgeführt. Es wurden Winterweizen, Sommerweizen und Wintergerste angebaut. Die Böden der Versuchflächen deckten das Spektrum von sandigem bis tonigen Lehm ab und repräsentieren eine Bodengüte von 40 bis 80 Bodenpunkten, was einer mittleren bis guten Bodenqualität entspricht. Die Unkrautbonituren wurden 1.) als Standardverfahren nach IPS (BARZMAN et al., 2015), 2.) kamerabasiert und 3.) drohnenbasiert in den Feldversuchen durchgeführt. Die Unkrautdetektion per Kamera und Drohne wurde mit einer hochauflösenden RGB-Ka-

mera durchgeführt. Die Drohne diente dabei als Trägersystem. Für die Analyse wurde nicht die gesamte Fläche überflogen, sondern ein Punktraster mit einer Rastergröße von 12 × 12 m. Die RGB-Bilder wurden mit einer selbstentwickelten Künstlichen Intelligenz nach dem Verfahren der Farb- und Formerkennung analysiert (KÄMPFER et al., 2021, in diesem Themenheft).

Szenarioanalyse

Für die Szenarioanalyse wurde ein Modellbetrieb auf Grundlage der Daten aus den Feldversuchen zu Lohn- und Maschinenkosten aller Feldarbeitsprozesse und der technischen Ausstattung angenommen und an Szenario-Annahmen (inklusive Sensor- und Drohnenausstattung) mit einer durchschnittlichen Feldgröße von 10 ha angepasst. Dies bedeutet, dass die Investitionskosten der PF-Technologie in den Herbizid- und Fungizidkosten mit Lohn- und Maschinenkosten für Bonituren und Ausbringung in den verschiedenen Szenarien enthalten sind. Die Auswahl der eingesetzten Betriebsmittel und Mengen basierte auf den Feldversuchen, ausgenommen Fungizide. Die teilflächenspezifische Applikation der Fungizide wurde auf Basis von Bonituren durchgeführt, die für ein im Projekt entwickeltes Prognosemodell zur Vorhersage der Wahrscheinlichkeit des Auftretens pilzlicher Schaderreger dienten (HERRMANN, 2020 bzw. HERRMANN et al., 2021, in dieser Sonderausgabe). Die Fungizidkostenberechnungen (Mittel, Aufwandmenge) in den Feldversuchen erfolgten gemäß diesem Ansatz. Für die Szenarioanalyse wurden erweiterte Annahmen getroffen (Tab. 1). Die Auswahl der PSM und Aufwandmengen basierte auf den Feldversuchen und die zu behandelnden Flächenanteile auf Expertenannahmen (POHL et al., 2021, in diesem Themenheft, Tab. 1). In den Feldversuchen wurden teilflächenspezifische und flächeneinheitliche Applikationen im Frühjahr oder Herbst durchgeführt. In der Szenarioanalyse wurde für die flächeneinheitliche Applikation jeweils eine Applikation im Früh-

Tab. 1. Übersicht zu den Annahmen der Szenario-Analyse.

	Flächeneinheitliche Applikation		Teilflächenspezifische Applikation	
	Szenario S0		Szenario S1 (S1 a und b)	Szenario S2 (S2 a, b und c)
Technische Ausstattung für die Bonitur	Durch den Landwirt (kein Sensor, keine Drohne)		Sensor (Online) Datentransfer automatisch zum FMIS ¹	Drohne/Drohnen-service (Offline) Datentransfer durch den Landwirt zum FMIS
Feldspritze	(kein Assistenzsystem)		Assistenzsystem und Applikationskarten	
Herbizid-Applikationen	100 % des Schlages		Fall 1: 40 % Herbizid A, 30 % Herbizid B Fall 2: 30 % Herbizid A, 20 % Herbizid B, 30 % Herbizid C	
Fungizid-Applikationen	100 % des Schlages		Fall 1: 66 % Fungizid A/B, Fall 2: 75 % Fungizid A/B Fall 3: 33 % Fungizid A/B Fall 4: 25 % Fungizid A/B	

¹Farm Management-Informationssystem

jahr und eine im Herbst unterstellt. Für die teilflächenspezifische Applikation wurde aufgrund der erst im Frühjahr zuverlässigen Größe der Unkräuter für die automatisierte Unkrautererkennung nur eine Applikation im Frühjahr angenommen. Lohn- und Maschinenkosten für Bonituren, Aussaat, Bodenbearbeitung, Düngung, PSM-Ausbringung und Ernte wurden nach KTBL (2018/2019) ermittelt und orientieren sich am Modellbetrieb.

Dazu wurde ein typischer Modellbetrieb angenommen. Der Modellbetrieb der Szenarioanalyse lag in Norddeutschland und hatte eine Größe von 1.000 ha. Die durchschnittliche Jahrestemperatur betrug 9,7°C, der durchschnittliche Jahresniederschlag lag bei 626 mm. Es wurde angenommen, dass im Modellbetrieb ein Traktor mit FarmManagement-Informationssystem (FMIS), Ertragskartierung, DGNS und Parallelfahrssystem eingesetzt wurde. Es wurde eine Hof-Feld-Entfernung von 5 km und eine Wasseraufwandmenge von 300 l je ha angenommen. Diesellosten von 0,75 € je Liter und Lohnkosten von 20 € pro Stunde wurden berücksichtigt (KTBL, 2018/2019). Die Herbizid- und Fungizidpreise basierten auf den gängigen Handelspreislisten für Pflanzenschutzmittel (AGRAVIS RAIFFEISEN AG, 2019/2020). Die Erzeugerpreise, die Kosten für Saatgut und Düngemittel stammten aus der Agrarstatistik (AMI, 2019/2020, BMEL, 2019/2020). Waren für eine Feldparzelle keine Ertragsdaten verfügbar, wurden Daten aus der Agrarstatistik für weitere Berechnungen verwendet (BMEL, 2019/2020).

Für die Ermittlung der Lohn- und Maschinenkosten in den flächeneinheitlichen Szenarien wurde eine Pflanzenschutz-Anhängespritze mit 27 m Arbeitsbreite, 4.000 l Tankvolumen, 83 kW Maschinenleistung verwendet (KTBL, 2018/2019). Für die Berechnung der Lohn- und Maschinenkosten in den teilflächenspezifischen Szenarien wurde eine Pflanzenschutzspritze mit Direkteinspeisung und zwei Kammern (DIS) mit 27 m Arbeitsbreite, 6.000 l Behältervolumen und 70 kW Maschinenleistung unterstellt.

Da nur Daten von wenigen Versuchsflächen zur Verfügung standen, wurde für die ökonomische Gesamtbewertung der teilflächenspezifischen Applikation mit Assistenzsystem und DIS eine Szenarioanalyse durchgeführt. Dazu wurde ein typischer Modellbetrieb in Norddeutschland angenommen. Drei Szenarien wurden entworfen: S0 simulierte betriebsübliche Methoden der Bonitur und der flächeneinheitlichen PSM-Ausbringung auf 100 % der Feldfläche nach IPM-Methoden, S1 und S2 unterstellten teilflächenspezifische Methoden der Bonitur und PSM-Ausbringung. In S1 und S2 wurden Applikationskarten verwendet, um die teilflächenspezifische PSM-Applikation von Herbiziden und Fungiziden zu unterstützen. In S1 basierten die Applikationskarten auf *Online*-Sensordaten (H-Sensor zur Unkrautererkennung und P3-Sensor zur Messung von Wuchshöhe, Biomasse sowie Anzahl und Position der Blattschichten zur Vorbereitung von Fungizidbehandlungen, AGRICON, 2020). In S2 wurde *Offline*-RGB-Bilderfassung durch eine Drohne eingesetzt. In S1 wurden zwei weitere Varianten (S1 a und b), in S2 drei weitere Varianten der Szenarien (S2 a, b, und c) unterstellt.

Im Einzelnen beinhaltet Variante S1 a.) die Anschaffung eines DIS-Pflanzenschutzgerätes, eines Assistenzsystems und von Sensoren. Variante S1 b.) unterscheidet sich von der ersten Variante nur darin, dass hier statt der Neuanschaffung ein vorhandenes Standard-Spritzgerät zu einem DIS-Spritzgerät aufgerüstet wurde. Im teilflächenspezifischen Szenario 2 simuliert Variante S2 a.) die Anschaffung eines DIS-Pflanzenschutzgerätes, eines Assistenzsystems und einer Drohne. Variante S2 b.) unterscheidet sich von der ersten Variante wiederum nur darin, dass hier anstelle der Neuanschaffung ein vorhandenes Standard-Spritzgerät zur einem DIS-Spritzgerät aufgerüstet wurde. In Variante S2 c.) wurde die Aufrüstung zu einem DIS-Pflanzenschutzgerät, die Anschaffung eines Assistenzsystems und ein Drohnenservice durch einen externen Dienstleister simuliert.

Für die Berechnung der Annuität wurden zehn Jahre Nutzungsdauer angenommen. Um die Lohnkosten für die Bonituren in den Szenarien S1 und S2 nicht zu unterschätzen, beinhalten sie die dreifache Arbeitszeit von S0.

Webservices

Im Rahmen des Projektes wurden für das automatisierte Assistenzsystem verschiedene Webservices entwickelt und programmiert. Ziele des Zusammenspiels der Webservices waren die Generierung einer Applikationskarte zur Unterstützung der Landwirte bei teilflächenspezifischen PSM-Applikationen sowie die betriebswirtschaftliche Bewertung dieser Applikationen.

Eine Übersicht zur Struktur des neu entwickelten automatischen Applikations-Assistenzsystems mit seinen implementierten Webservices und deren Interaktionen findet sich in (SINN & GOLLA, 2021, in diesem Themenheft). Alle benötigten Informationen innerhalb der Webservices können in Echtzeit abgerufen werden. Die Kennzahlen der beiden Webservices wurden als Kostendienst in GetDist4Agri (SINN & GOLLA, 2019) zugänglich gemacht.

Der Pflanzenschutzkosten-Webservice berechnet die Kosten für PSM-Applikationen, einschließlich den Lohn- und Maschinenkosten für Bonituren und Ausbringung. Der Benchmark-Webservice baut auf dem Pflanzenschutzkosten-Webservice auf und somit kann über eine Verknüpfung zusätzlich die Arbeitsproduktivität (ATTAR et al., 2012) und die Arbeitsintensität der PSM-Applikation (VOLLRATH, 2011) sowie die direkt- und arbeits erledigungskostenfreie Leistung (DAL; SCHROERS & SAUER, 2011; MUßHOFF & HIRSCHAUER, 2016) ermittelt werden. Der Benchmark-Webservice soll Landwirte dabei unterstützen, ihre aktuelle Pflanzenschutzstrategie zu verbessern.

Zur Überprüfung der Implementierung und Funktionsfähigkeit wurde der Pflanzenschutzkosten-Webservice mithilfe von generischen Applikationsmustern aus Brandenburg und entsprechenden Varianten zur teilflächenspezifischen und flächeneinheitlichen Ausbringung von Herbiziden getestet. Eine Schätzung der zu behandelnden Flächenanteile in den Applikations-Varianten des Testlaufs erfolgte auf Basis von Expertenwissen. Eine Übersicht zum Pflanzenschutzkosten- und Benchmark-Webservice zeigt Abb. 2.

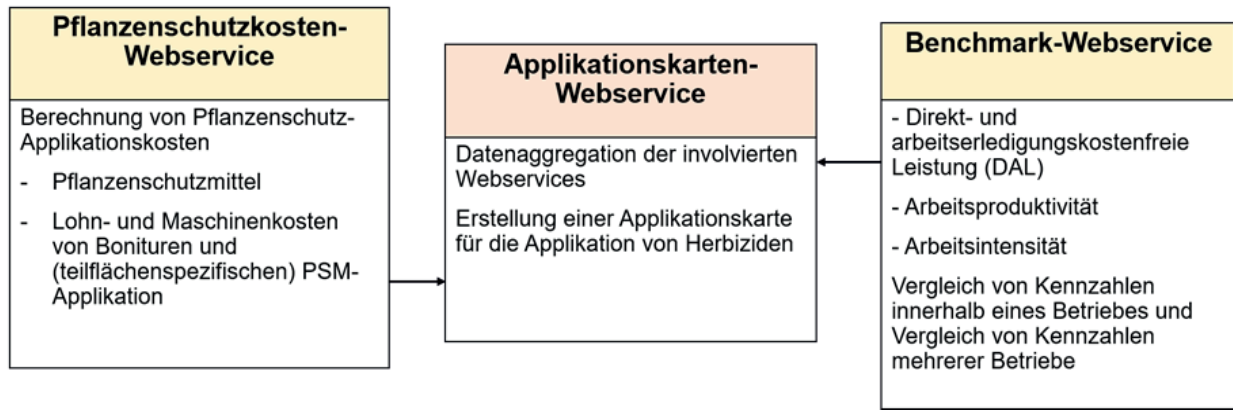


Abb. 2. Pflanzenschutzkosten- und Benchmark-Webservice.

Gesamtbewertung

Die ökonomische Gesamtbewertung in AssSys basiert auf einer Szenarioanalyse, die sich auf den Vergleich von teilflächenspezifischen mit flächeneinheitlichen PSM-Applikationen in Feldversuchen stützte. Standardisierte betriebswirtschaftliche Kennzahlen wurden für die Analyse verwendet, die auf der Teilkostenrechnung basieren (SCHROERS & SAUER, 2011; MUßHOFF & HIRSCHAUER, 2016). Die Kosten der Herbizid- und Fungizidapplikationen wurden um die festen Arbeitskosten „erweitert“ und ermöglichten so einen Vergleich der untersuchten Applikationsstrategien anhand der direkt- und arbeits erledigungskostenfreien Leistung (DAL; Abb. 3). Die Arbeits-

kosten der fest angestellten Arbeitskräfte wurden eingeschlossen, da sie dem jeweiligen Feldarbeitsprozess direkt zuzuordnen sind und somit einen Einflussfaktor darstellen. Zusätzlich zu den erzielten Erlösen wurden die Betriebskosten für Bonitur, Aussaat, Bodenbearbeitung, Düngung, PSM-Ausbringung und Ernte einschließlich Lohn- und Maschinenkosten berücksichtigt. Für die neuen PF-Technologien wurden Hardware-, Software- und Servicekosten mit (in die Lohn- und Maschinenkosten) eingerechnet. Die DAL wurde für jede Kultur auf der jeweiligen Versuchsparzelle für das jeweilige Jahr berechnet. Es wurde ein Zinssatz von 3 % für gebundenes Kapital angenommen.

Ergebnisse

Im Folgenden werden zunächst die Kennzahlen für den Pflanzenschutzkosten- und Benchmark-Webservice vorgestellt und ihre Anwendung im Assistenzsystem erläutert (Abb. 1; Teil A). Daran schließt sich die Darstellung der Ergebnisse zu den Investitionskosten des Assistenzsystems mit Sensor bzw. Drohne und einer DIS-Pflanzenschutzspritze in den Szenarien an (Abb. 1; Teil B). Die Vorstellung der Ergebnisse zu Einsparungen bei Herbizid- und Fungizid-Applikationskosten und der DAL runden den Ergebnisteil ab (Abb. 1; Teil B).

Ökonomische Kennzahlen für den Pflanzenschutzkosten-Webservice

Die Berechnung der Kennzahlen, ihre Bedeutung im Vergleich von teilflächenspezifischer und flächeneinheitlicher Applikation sowie die Herkunft der jeweiligen Datenquelle innerhalb der Webservices sind in Tab. 2 dargestellt. Einige Daten (z. B. Boniturzeiten) müssen vom Landwirt selbst eingegeben werden, wenn er die entsprechende Kennzahl berechnen möchte, da sie in der jetzigen Umsetzung noch nicht aus dem FMIS heraus exportiert werden können (z. B. über andere Webservices oder eine vorhandene Ackerschlagdatei). Es kann jedoch auch eine Standard-Daten-Zusammenstellung, die im System



Abb. 3. Ökonomische Gesamtbewertung.

hinterlegt ist, genutzt werden. Der Pflanzenschutzkosten-Webservice berechnet die *PSM-Applikationskosten* (Kennzahl 1) und beinhaltet die Mittelkosten, die Lohn- und Maschinenkosten der Bonitur und der PSM-Ausbringung. Als Datenquelle dient der Pflanzenschutzkosten-Webservice.

Mit einem erfolgreichen Testlauf konnte die gelungene Implementierung und Funktionsfähigkeit des Pflanzenschutzkosten-Webservices gezeigt werden. In einem zweiten Schritt wurde der Pflanzenschutzkosten-Webservice mit anderen Webservices des Assistenzsystems, wie dem Benchmark-Webservice verknüpft, um weitere betriebswirtschaftliche Kennzahlen, die auf den Pflanzenschutzapplikationskosten basieren, zu berechnen.

Ökonomische Kennzahlen für den Benchmark-Webservice

Für den Benchmark-Webservice wurden sechs weitere Kennzahlen identifiziert, die zum Teil auf die Kennzahlen des Pflanzenschutzkosten-Webservices zugreifen.

Eine genaue Beschreibung bzw. die Berechnung der Kennzahlen findet sich in Tab. 2. Der *Erlös* (Kennzahl 2) bildet zusammen mit den *PSM-Applikationskosten* (Kennzahl 1 des Pflanzenschutzkosten-Webservices) die Grundlage der Berechnungen weiterer Kennzahlen und setzt sich aus dem Ertrag und dem Erzeugerpreis zusammen.

Als Datenquelle für den Ertrag dient hier die digitale Ackerschlagdatei bzw. das FMIS. Der Erzeugerpreis muss durch den Landwirt selbst in das System eingegeben werden, falls er die Berechnung des Erlöses durch das Assistenzsystem in Anspruch nehmen möchte. Die *pflanzenschutzkostenfreie Leistung* (Kennzahl 3) setzt sich aus dem Erlös und den Pflanzenschutzkosten zusammen. Wurde diese bereits abgefragt, kann die Information im FMIS für weitere Abfragen hinterlegt werden. Die Informationen zu den Pflanzenschutzapplikationskosten kommen dabei aus dem Pflanzenschutzkosten-Webservice. Die *direkt- und arbeitserledigungskostenfreie Leistung* (DAL; Kennzahl 4) errechnet sich dabei aus dem Erlös abzüglich den Direktkosten für Saatgut, Dünger, PSM und weitere Betriebsmittel und den Arbeitserledigungskosten für alle erforderlichen Arbeitsgänge. Auch die Direktkosten muss der Landwirt selbst ins System einpflegen, falls er eine Berechnung der DAL wünscht. Gleiches trifft auf die Arbeitserledigungskosten zu. Die *Arbeitsintensität* (Kennzahl 5) setzt sich aus dem Quotienten von PSM-Kosten zu den Arbeitserledigungskosten der Bonitur und PSM-Ausbringung zusammen. Je kleiner die Arbeitsintensität ausfällt, desto höher ist der Anteil an Arbeitserledigungskosten an den PSM-Kosten. Je größer der Wert für die Arbeitsintensität ausfällt, desto geringer ist der Anteil an Arbeitserledi-

Tab. 2. In den Webservices implementierte Kennzahlen zur Bewertung teilflächenspezifischer PSM-Applikationen (TFA).

	Datenquelle	Berechnung innerhalb des Assistenzsystems	Ergebnis vorteilhaft, wenn Kennzahl in TFA ...
Kennzahl 1 ^a : Pflanzenschutz-Applikationskosten	PS-Kosten-Webservice ^b	PSM-Kosten + Bonitur (LK + MK) + Ausbringung (LK + MK) ^c	< flächeneinheitlich
Kennzahl 2: Erlös	FMIS/Selbsteingabe	Ertrag (dt je ha) × Erzeugerpreis (€ je dt)	> flächeneinheitlich
Kennzahl 3: Pflanzenschutzkostenfreie Leistung	FMIS/PS-Kosten-Webservice	= Erlös – Pflanzenschutzkosten	> flächeneinheitlich
Kennzahl 4: Direkt- und arbeitserledigungskostenfreie Leistung (DAL)	FMIS/Selbsteingabe/PS-Kosten-Webservice	= Erlös – Summe Direktkosten (Saatgut, Dünger, PSM) – Summe Arbeitserledigungskosten (Bodenbearbeitung, Aussaat, Düngung, Bonitur, PSM-Ausbringung, Ernte)	> flächeneinheitlich
Kennzahl 5: Arbeitsintensität	PS-Kosten-Webservice	$\frac{\text{PSM – Kosten}}{\text{Bonitur(LK + MK) + Ausbringung(LK + MK)}}$	< flächeneinheitlich
Kennzahl 6: Arbeitsproduktivität	PS-Kosten-Webservice	$\frac{\text{Pflanzenschutzkostenfreie Leistung}}{\text{Bonitur(LK + MK) + Ausbringung(LK + MK)}}$	> flächeneinheitlich
Kennzahl 7: Jährl. Mindesteinsatzfläche der PF-Technologie	Selbsteingabe	$\frac{\text{Jährliche Technikkosten des Feldspritzgerätes}}{\text{Eingesparte PSM – zusätzliche LK}}$	< flächeneinheitlich

^a Kennzahlen 1 bis 6 in Euro je ha, Kennzahl 7 in ha pro Jahr

^b Pflanzenschutzkosten-Webservice

^c LK: Lohnkosten; MK: Maschinenkosten

gungskosten an den PSM-Kosten. Möchte ein Landwirt z. B. den Anteil seiner Arbeitszeit an den PSM-Kosten reduzieren, dann müsste er versuchen, die Arbeitsintensität seiner Maßnahme zu erhöhen. Die *Arbeitsproduktivität* (Kennzahl 6) wird durch den Quotienten der *pflanzenschutzkostenfreien Leistung* (Kennzahl 3) und den *Arbeitsenergiekosten* der Bonitur und PSM-Ausbringung beschrieben. Wenn die Arbeitsproduktivität beispielsweise bei der Applikation der Teilfläche höher ausfällt als bei der flächeneinheitlichen, dann ist dies ein Indikator für eine optimierte Pflanzenschutz-Maßnahme.

Schließlich kann innerhalb des Benchmark-Webserver die *Mindesteinsatzfläche* in ha (Kennzahl 7) berechnet werden (LETTNER et. 2001). Hierbei handelt es sich um diejenige Fläche in einem landwirtschaftlichen Betrieb, die jährlich *mindestens* behandelt werden muss, damit der Einsatz der PF-Technologie für den Betrieb wirtschaftlich lohnenswert ist. Sie setzt sich zusammen aus den jährlichen Technikkosten des PF-Feldspritzgerätes, den durch die teilflächenspezifische Applikation eingesparten PSM-Applikationskosten und den zusätzlichen Lohnkosten pro Jahr inklusive Bonituren.

Investitionskosten des Assistenzsystems mit Sensor bzw. Drohne und einer Pflanzenschutzspritze mit Direkteinspeisung (DIS)

Die jährlichen Investitionskosten in den Teilflächenvarianten (Tab. 3) variieren zwischen 21 € je ha je nach Technikausstattung mit Direkteinspeisung, Assistenzsystem und Drohnenservice durch externe Dienstleister (S2 c) und 37 € je ha mit Direkteinspeisung, Assistenzsystem und eigenem Sensor (S1 a). Die Anschaffung von Sensoren zur Unkrauterkennung und Bestimmung der Bestandesdichte ist mit 56.000 € (S1 a und b) teurer im Vergleich zur Anschaffung einer Drohne mit ca. 9.000 € (S2 a und b). Um die Investitionskosten zur Anschaffung eines neuen DIS-Pflanzenschutzgerätes nicht zu unterschätzen, wurden die maximalen Kosten für ein System mit zwei Kammern mit 140.000 € angenommen (S1 a und S2 a). Für die Szenarien mit Aufrüstung statt Neuanschaffung wurde vorausgesetzt, dass ein Standardspritzgerät nach KTBL von 27 m Arbeitsbreite mit zwei zusätzlichen Düsenleitungen ausgestattet wird, was Investitionskosten von 98.000 € (S1 b, S2 b und c) ergibt. Die Kosten des Assistenzsystems, das für alle teilflächenspezifischen Szenarien vorgesehen ist, betragen jährlich 0,17 € je ha und setzen sich aus einem Basis-Paket für Hosting-Service, Software Updates und Anwender-Support zusammen. Beim flächeneinheitlichen Szenario fallen lediglich Lohn- und Maschinenkosten für Bonituren und PSM-Applikationen in Höhe von 13 € je ha an.

Insgesamt betragen die jährlichen Technikkosten somit für die teilflächenspezifische PSM-Applikation mit Assistenzsystem und Sensor bzw. Drohne 37 € je ha im teuersten Fall (S1 a) und im günstigsten Fall 21 € je ha (S2 c). Dies ist im Durchschnitt ein Unterschied von 17 € je ha.

Direkt- und arbeitsenergiekostenfreie Leistung (DAL) in den untersuchten Szenarien

Die DAL ist in den untersuchten teilflächenspezifischen Szenarien ökonomisch vorteilhafter als im flächeneinheitlichen Szenario (Tab. 4). Der ökonomische Vorteil (Differenz Szenario S1 bzw. S2 zu S0 in %) der DAL in den teilflächenspezifischen Szenarien gegenüber dem Mittelwert des flächeneinheitlichen Szenarios liegt zwischen 18 % und 22 %. Im Mittel der untersuchten Jahre und Flächen lag die DAL bei 631 € je ha im flächeneinheitlichen Szenario im Vergleich zu 787 € je ha bei den teilflächenspezifischen Szenarien, womit der ökonomische Vorteil bei 156 € je ha bzw. 20 % gegenüber dem Szenario S0 liegt. Am Größten war der wirtschaftliche Vorteil in der DAL zwischen der Variante S2 c und dem Szenario S0 mit 174 € je ha bzw. 22 %. Dies ist damit zu begründen, dass die untersuchte Variante S2 c die günstigste Technikausstattung hat.

Verglichen mit den Einsparungen an PSM in den teilflächenspezifischen PSM-Applikationen, die zu erheblichen Kosteneinsparungen führten, fielen die PF-Technikkosten in den Szenarien (umgerechnet pro ha und Jahr) nicht so stark ins Gewicht. Die Herbizidkosten (inkl. Mittel, Lohn- und Maschinenkosten der Bonituren und Ausbringung) im flächeneinheitlichen Szenario S0 lagen bei 169 € je ha, in den teilflächenspezifischen Szenarien bei durchschnittlich 58 € (Abb. 4). Die Herbizidkosten (inkl. Mittel, Lohn- und Maschinenkosten der Bonituren und Ausbringung) in den teilflächenspezifischen Szenarien wiesen somit eine Bandbreite zwischen 50 € je ha und 65 € je ha auf. Als Szenario mit den größten Herbizideinsparungen im Vergleich zu S0 stellte sich das Szenario S1 c heraus, wo auch die Investitionskosten am Niedrigsten waren. Das Szenario mit den höchsten Herbizidkosten war S1 a, wo auch die höchsten Investitionskosten zu verzeichnen waren. In analoger Weise präsentierten sich die Ergebnisse zu den Fungizidkosten (inkl. Mittel, Lohn- und Maschinenkosten der Bonituren und Ausbringung). Diese wiesen in den teilflächenspezifischen Szenarien eine Bandbreite zwischen 112 € je ha und 128 € je ha auf, im Vergleich zum Szenario S0, das bei 164 € je ha lag.

Betrachtet man alle Produktionsprozesse, lagen die höchsten Kosten beim Pflanzenschutz, gefolgt von den Kosten für die Ernte, die Bodenbearbeitung, die Aussaat und die Düngung.

Es zeigte sich also, dass die Teilflächenbehandlung auch bei den Gesamtkosten unter Einbeziehung der Investitionskosten der PF-Technologie in die Lohn- und Maschinenkosten von Bonituren und Applikationen (zzgl. Mittelkosten) um durchschnittlich 154 € je ha (20 %) günstiger ausfiel. Dieses Ergebnis spiegelte sich auch in der DAL wider.

Fazit

Um Landwirten einen automatisierten einzelbetrieblich angepassten und einen Vergleich mit anderen Betrieben

Tab. 3. Investitionskosten der untersuchten Szenarien mit Sensor bzw. Drohne.

	Betriebsübliche Bonitur und Applikation (S0)	Teilflächenspezifische Bonitur und Applikation				
		Szenario Sensor (S1)		Szenario Drohne (S2)		
Boniturmethode	durch Landwirt	S1 a Sensor	S1 b Sensor	S2 a Drohne	S2 b Drohne	S2 c Drohnen-Service
Annahmen für Pflanzenschutzgerät (DIS)	–	neu	Aufrüstung	neu	Aufrüstung	Aufrüstung
Investitionskosten der Teilflächenapplikation [€]	–	151.000	109.000	151.000	109.000	109.000
einschließlich Pflanzenschutzspritze (DIS) [€]	–	140.000	98.000	140.000	98.000	98.000
einschließlich Job Computer mit ISOXML-Support [€]	–	7.000	7.000	7.000	7.000	7.000
einschließlich Assistenzsystem [€]	–	4.000	4.000	4.000	4.000	4.000
Investitionskosten der Bonitur [€]	–	56.000	56.000	8.899	8.899	–
einschließlich Online-Sensoren (Unkrautererkennung, Bestandesdichte) [€]	–	56.000	56.000	–	–	–
oder Offline-Drohne zur Unkrautererkennung ^a [€]	–	–	–	8.899	8.899	–
Summe der Investitionskosten [€]	–	207.000	165.000	159.899	117.899	109.000
(1) Jährliche Boniturskosten (ohne Arbeitskosten) [€ ha ⁻¹]	–	9,54	9,54	2,83	2,83	0,50
(1a) Arbeitskosten der Bonitur/ Erstellung der Applikationskarte ^b [€ ha ⁻¹]	2,69	–	–	3,97	3,97	–
(1b) Jährliche Reparatur- und Servicekosten der Sensornutzung [€ ha ⁻¹]	–	0,38	0,38	–	–	–
(2) Jährliche Ausbringungskosten (ohne Reparatur, Diesel und Arbeitskosten) [€ ha ⁻¹]	–	21,50	15,52	21,50	15,52	15,52
(2a) Reparaturkosten, Dieselkosten und Arbeitskosten der Ausbringung [€ ha ⁻¹]	–	5,20	5,20	5,20	5,20	5,20
(2b) Jährliche Kosten Hosting, Software Updates, Anwender-Support (Assistenzsystem) [€ ha ⁻¹]	–	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17
Summe jährliche Boniturskosten (1, 1a and 1b) [€ ha ⁻¹]	2,69	9,92	9,92	6,80	6,80	0,50
Summe jährliche Ausbringungskosten (2, 2a and 2b) [€ ha ⁻¹]	9,94	26,87	20,89	26,87	20,89	20,89
Summe jährliche Kosten inkl. Services [€ ha⁻¹]^c	12,63	36,79	30,81	33,67	27,69	21,39

^a DJI P4 Multispectral kostet 5.999 EUR und enthält eine Jahreslizenz für die Windows-Software DJI Terra (Basic) und für die iPad-App DJI GS Pro (Team-Professional). Mit der Mobile Station D-RTK 2 kostet die Drohne 8.899 Euro;

^b in S2 a und b: Lohnkosten und Softwarekosten zur Erstellung einer Applikationskarte;

^c Berechnung der jährlichen Investitionskosten nach Annuitätenformel

bezüglich bestimmter Kenngrößen zu ermöglichen, wurden Kennzahlen für den Pflanzenschutzkosten- und Benchmark-Webservice identifiziert. Beide wurden in das Assistenzsystem integriert, der Pflanzenschutzkosten-Webservice konnte mit generischen Applikationsmustern aus Brandenburg erfolgreich getestet werden.

Anhand von Berechnungen zu Kosteneinsparungen teilflächenspezifischer Herbizid- und Fungizidapplikationen im Vergleich zu flächeneinheitlichen Applikationen, wurde der Einsatz des Assistenzsystems „AssSys“ betriebswirtschaftlich bewertet. Des Weiteren wurde die DAL als Kennzahl zur ökonomischen Bewertung herangezogen.

Tab. 4. Direkt- und arbeitserledigungskostenfreie Leistung (DAL) der untersuchten Szenarien.

Standort, Jahr, Kultur	Flächeneinheitliche Applikation (S0) € ha ⁻¹	Teilflächenspezifische Applikation				
		S1 a ^a	S1 b	S2 a	S2 b	S2 c
		€ ha ⁻¹				
Sickte 15 (2018) WW	501	756	768	762	774	786
Cappeln (2018) WW	371	477	489	484	496	508
Osterwieck 1 (2018) SW	569	696	708	702	714	726
Osterwieck 2 (2018) WW	459	601	613	607	619	631
Sickte 15 (2019) WG	834	701	713	707	719	732
Sickte 1 + 2 (2019) WW	843	1211	1223	1218	1230	1242
Sickte 9 (2019) WW	838	973	985	979	991	1004
Mittelwert	631			787 ^c		
Differenz S1/S2 zu S0		142	154	149	161	173
Ökonomischer Vorteil ^b [%]		18	20	19	20	22

^a S1 a: Feldspritzgerät mit Direkteinspeisung (DIS) + Assistenzsystem (AAS) + Sensor; S1 b: Aufrüstung Feldspritze zu DIS + AAS + Sensor; S2 a: DIS + AAS + Drohne;

S2 b: Aufrüstung Feldspritze zu DIS + AAS + Drohne; S2 c: Aufrüstung Feldspritze zu DIS + AAS + Drohnen-Service

^b Der ökonomische Vorteil ist die Differenz aus DAL S1 bzw. S2 zu S0.

^c Mittelwert der Szenarien S1 und S2

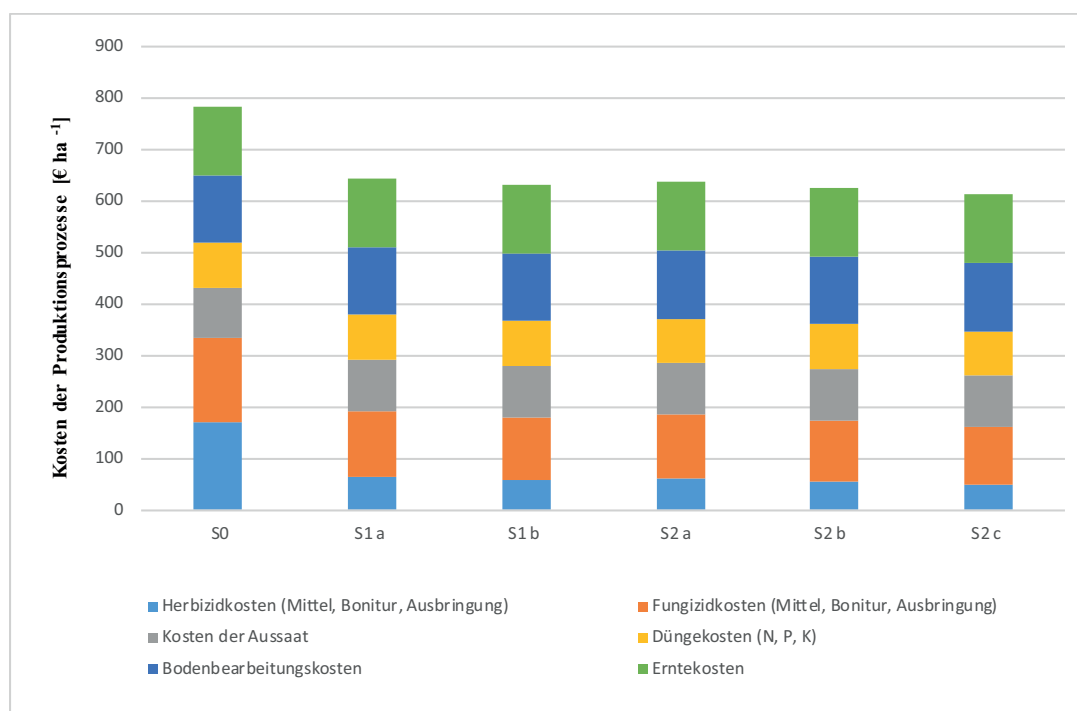


Abb. 4. Direkt-, Lohn- und Maschinenkosten der Produktionsprozesse im flächeneinheitlichen Szenario (S0) und den teilflächenspezifischen Szenarien. (S1 a: Feldspritzgerät mit Direkteinspeisung (DIS) + Assistenzsystem (AAS) + Sensor; S1 b: Aufrüstung Feldspritze zu DIS + AAS + Sensor; S2 a: DIS + AAS + Drohne; S2 b: Aufrüstung Feldspritze zu DIS + AAS + Drohne; S2 c: Aufrüstung Feldspritze zu DIS + AAS + Drohnen-Service)

Die eingangs gestellten Forschungsfragen können nun beantwortet werden:

(1) Welche Kosteneinsparungen können durch die teilflächenspezifische Applikation von Pflanzenschutzmitteln erzielt werden?

Die Ergebnisse der Szenarioanalyse zeigen, dass die Kosteneinsparungen bei den teilflächenspezifischen Applikationen gegenüber dem flächeneinheitlichen Szenario bei den Herbiziden im Mittel bei 111 € je ha bzw. 66 % lagen. In der Literatur finden sich Angaben zu Her-

bizideinsparungen von 40 % bis 90 % (NORDMEYER et al., 2003, TIMMERMANN et al., 2003, GERHARDS & CHRISTENSEN, 2003, HUFNAGEL et al., 2004). Somit liegen die in der vorliegenden Studie ermittelten Ergebnisse durchaus im Bereich vergleichbarer Untersuchungen.

(2) Welche weiteren wirtschaftlichen Vorteile ergeben sich aus den möglichen Kosteneinsparungen für einen landwirtschaftlichen Betrieb?

In den teilflächenspezifischen Szenarien konnte ein ökonomischer Vorteil (bzgl. DAL) gegenüber der flächeneinheitlichen Applikation von 18 % bis 22 % erzielt werden. Am größten war dieser im Szenario 2 c, wo anstelle der Neuanschaffung die Aufrüstung einer Pflanzenschutzspritze, die Anschaffung eines Assistenzsystems und ein Drohnenservice durch einen externen Anbieter simuliert wurde. Der „geringste“ ökonomische Vorteil (immer noch bei 18 %) im Vergleich der flächeneinheitlichen zur teilflächenspezifischen Applikation ergab sich in Szenario 1 a, wo die Anschaffung von Sensoren zur Unkrautererkennung und Bestimmung der Bestandesdichte sowie eines Assistenzsystems und einer DIS-Spritze simuliert wurde.

(3) Können die Kosteneinsparungen bei den teilflächenspezifischen PSM-Applikationen die Investitionskosten für die PF-Technologie und des neu entwickelten Applikationsassistenzsystems kompensieren?

Unter den getroffenen Annahmen lagen die jährlichen Investitionskosten des Assistenzsystems, einer DIS-Pflanzenschutzspritze und einer Drohne zur Unkrautererkennung oder von Sensoren zur Unkrautererkennung bzw. zur Bestimmung der Bestandesdichte in den teilflächenspezifischen Szenarien 9 € je ha bis 24 € je ha (im Mittel 17 € je ha) über denen des flächeneinheitlichen Szenarios. Mit 111 € je ha (Herbizide) bzw. 43 € je ha (Fungizide) lagen die Einsparungen bei den PSM deutlich über den Investitionskosten. Unter Einbeziehung der Investitionskosten in den Lohn- und Maschinenkosten der teilflächenspezifischen Applikationen zeigte sich, dass die Teilflächenbehandlung bei den jährlichen Gesamtkosten der PF-Technologie günstiger ausfiel. Auch die DAL in den teilflächenspezifischen Szenarien (unter Berücksichtigung der Erlöse) war höher als im flächeneinheitlichen Szenario. Somit zeigte sich, dass die teilflächenspezifische PSM-Applikation wirtschaftlicher war als die flächeneinheitliche.

Lediglich auf einer von sieben Versuchsflächen erwies sich die teilflächenspezifische PSM-Applikation in der Szenarioanalyse nicht als vorteilhaft. GERHARDS et al. (2004) haben jährliche Investitionskosten für Bonituren mit PF-Technologie von 7 € je ha für *Online*-Verfahren mit Kamera und 11 € je ha für *Offline*-Verfahren ermittelt, sowie 14 € je ha für eine Dreikammerspritze (mit 21 m Arbeitsbreite) zur teilflächenspezifischen Ausbringung von PSM. In der vorliegenden Studie lagen die ermittelten jährlichen Investitionskosten für *Online*-Verfahren bei 31 bis 37 € je ha und bei *Offline*-Verfahren zwischen 21 und 34 € je ha, inklusive der Kosten für die Ausbringungstechnik. Somit fallen

bei GERHARDS et al. (2004) insgesamt 21 € je ha für *Online*-Verfahren und 25 € je ha für *Offline*-Verfahren an. Auch hier liegen damit die ermittelten Ergebnisse im Größenbereich vergleichbarer Studien.

Die beschriebene PF-Technologie und das Assistenzsystem können helfen, PSM-Applikationen und damit entsprechende PSM- und Applikationskosten zu reduzieren. Hierfür müssen sie in der landwirtschaftlichen Praxis genutzt werden. Dabei ist die Investitionsförderung eine Möglichkeit, die Landwirte bei der Einführung von PF-Technologien zu unterstützen. Es besteht aber noch weiterer Forschungsbedarf zur Weiterentwicklung und vollständigen Integration der beschriebenen Webservices in Applikations-Assistenzsysteme, u. a. hinsichtlich der Benutzerfreundlichkeit und Verfügbarkeit von Daten, die innerhalb des Systems genutzt werden können.

In welchem Umfang der Einsatz von PF-Technologien zu einer reduzierten Ausbringung von PSM führt, hängt von vielen Faktoren ab, u. a. von der feldinternen Heterogenität, der Fruchtfolge und der Produktionsintensität. Im Bereich der Sensorik und datenbasierten Lösungen werden aktuell Unkrautsensoren im Zuckerrübenanbau und im Weizen (MAHLEIN & STOCKFISCH, 2020) sowie im Obst- und Weinbau erprobt (DUCKETT et al., 2018). Laufende Forschung im Bereich der Sensorik untersucht Methoden zum *Deep-Learning* (DUCKETT et al., 2018), insbesondere bei der Interpretation von Sensordaten, einschließlich der automatischen Unkrautererkennung.

Im Bereich der PF-Robotik werden Kamerasysteme in Kombination mit mechanischen Unkrautbekämpfungsmethoden in Reihenkulturen entwickelt und erprobt (z. B. Systeme von farming revolution oder FarmDroid; WEILAND, 2020). Auch hochpräzises punktuell Sprühen von Herbiziden mit Feldrobotern wird untersucht (z. B. ecoRobotix; WEILAND, 2020). Neben der mechanischen Unkrautbekämpfung und dem hochpräzisen punktuellen Sprühen wird die Unkrautbekämpfung mit Lasern erforscht (DUCKETT et al., 2018). Vor allem arbeitsintensive Kulturen mit hohen Erträgen und hohen Erlösen pro Flächeneinheit wie Zuckerrüben, Kartoffeln und Gemüse werden für neue autonome Systeme in Betracht gezogen (PEDERSEN et al., 2007). Die Unkrautbekämpfung mit automatisierten Systemen jenseits von Reihenkulturen erfordert eine sehr präzise Positionierung der Kulturpflanze (DUCKETT et al., 2018) und ist bisher nicht praxisreif.

Weiterer Forschungsbedarf besteht im Bereich der autonomen Roboterplattformen, die nahe an der Pflanze arbeiten (entweder am Boden oder aus der Luft), insbesondere mit interaktiven oder taktilen Eigenschaften, z. B. zum Pflücken von Weichobst (DUCKETT et al., 2018). Der Einsatz von heterogenen „multi-modalen“ Plattformen, die bodengebundene und luftgestützte PF-Technologien kombinieren, bietet das größte Potential für die automatisierte Unkrautbekämpfung sowie die Erkennung von Pflanzenkrankheiten (DUCKETT et al., 2018, BARRETO et al., 2021).


Erklärung zu Interessenskonflikten

Die Autoren erklären, dass keine Interessenskonflikte vorliegen.


Literatur

- AGRA-EUROPE, 2020: Acht von zehn Bauern setzen bereits digitale Techniken ein. Länderberichte 19, 15-16.
- AGRAVIS RAIFFEISEN AG, 2019: Pflanzenschutz- und Schädlingsbekämpfungsmittel, Preisliste 2019. Hannover, Münster, Germany, 74 S.
- AGRAVIS RAIFFEISEN AG, 2020: Pflanzenschutz- und Schädlingsbekämpfungsmittel, Preisliste 2020. Hannover, Münster, Germany, 200 S.
- AGRICON, 2020: Precision farming with Agricon. Best use of machines, operating resources and work time. www.agricon.de/en, Zugriff am 18.01.2020.
- AMI (Agrarmarkt Informations-Gesellschaft mbH), 2019: Marktbilanz Getreide, Ölsaaten und Futtermittel. Bonn, Germany, 223 S.
- AMI (Agrarmarkt Informations-Gesellschaft mbH), 2020: Marktbilanz Getreide, Ölsaaten und Futtermittel. Bonn, Germany, 219 S.
- ATTAR, A.A., A.K. GUPTA, D.B. DESAI, 2012: A Study of Various Factors Affecting Labour Productivity and Methods to Improve It. Journal of Mechanical and Civil Engineering 1 (3), 11-14.
- BARRETO, A., F. ISPIZUA, S. PAULUS, A.-K. MAHLEIN, 2021: Pflanzenkrankheiten mittels Drohnen erkennen. DLG-Mitteilungen 136 (1), 67.
- BARZMAN, M., P. BÄRBERI, A. NICHOLAS, E. BIRCH, P. BOONEKAMP, S. DACHBRODT-SAAAYDEH, et al., 2015: Eight principles of integrated pest management. Agronomy for Sustainable Development 35, 1199-1215.
- BMEL, 2019: Ernte 2018: Mengen und Preise. Berlin, Germany, 38 S.
- BMEL, 2020: Ernte 2019: Mengen und Preise. Berlin, Germany, 39 S.
- BUNDESMINISTERIUM FÜR ERNÄHRUNG UND LANDWIRTSCHAFT, 2013: Nationaler Aktionsplan zur nachhaltigen Anwendung von Pflanzenschutzmitteln. https://ec.europa.eu/food/sites/food/files/plant/docs/pesticides_sup_nap_deu_en.pdf (europa.eu), Zugriff am 10.12.2020.
- DEUTSCHES BENCHMARKING ZENTRUM [DBZ], 2018: Benchmarking Vorgehensweise. www.benchmarkingforum.de, Zugriff am 20.2.2019.
- DUCKETT, T., S. PEARSON, S. BLACKMORE, B. GRIEVE, 2018: Agricultural robotics: the future of robotic agriculture. UK-RAS White Papers, EPSRC UK-Robotics and Autonomous Systems Network. www.arxiv.org/abs/1806.06762, Zugriff am 3.4.2021.
- FEDERLE, C., M. SCHEIBER, B. KLEINHENZ, M. RÖHRIG, J. FELDHAUS, B. GOLLA, et al., 2014: Pesticide application manager (PAM) - decision support in crop protection based on terrain-, machine-, business- and public data. Proceedings International Conference of Agricultural Engineering, Zurich, Switzerland. 6-10.7., S. 1-8.
- GERHARDS, R., S. CHRISTENSEN, 2003: Real-time weed detection, decision making and patch spraying in maize, sugar beet, winter wheat and winter barley. Weed Research 43 (6), 385-392, DOI: 10.1046/j.1365-3180.2003.00349.x.
- GERHARDS, R., D. DICKE, H. OEBEL, 2004: Precision farming in weed control. In: Scientific Colloquium University of Hohenheim, Weed Science on the Go. ZWERGER, P., T. EGGERS (Eds.), Stuttgart-Hohenheim, Germany, S. 55-65.
- HERRMANN, M., 2020: Teilflächenspezifische Prognose von Halmbasiskrankheiten in Winterweizen - Aktueller Stand im Forschungsvorhaben AssSys. Journal für Kulturpflanzen 72 (5), 189-190.
- HERRMANN, M., C. FEDERLE, M. RÖHRIG, B. KLEINHENZ, 2021: Teilflächenspezifisches Prognosemodell zur räumlichen Verteilung von Fusarium-Halmbasisverbräunung. Journal für Kulturpflanzen 73 (5/6), 131-139, DOI: 10.5073/JfK.2021.05-06.05.
- HINCK, S., F. KLOEFFER, G. SCHUCHMANN, 2016: Precision Farming – Bodeneigenschaften erfassen. Darmstadt, Germany, KTBL-Heft 111, 56 S.
- HUFNAGEL, J., R. HERBST, A. JARFE, A. WERNER, 2004: Precision Farming: Analyse, Planung, Umsetzung in die Praxis. Darmstadt, KTBL-Loseblattsammlung.
- INFORMATIONSZENTRUM BENCHMARKING AM FRAUNHOFER [IZB], 2018: Benchmarking. URL: www.izb.ipk.fraunhofer.de/index.php/de/informtionszentrum-benchmarking, Zugriff am 21.2.2019.
- KÄMPFER, C., L. ULBER, C. WELHAUSEN, M. PFLANZ, 2021: Unkrauterkennung und Kartierung zur automatischen Applikationskartenerstellung im Pflanzenschutz. Journal für Kulturpflanzen 73 (5/6), 121-130, DOI: 10.5073/JfK.2021.05-06.04.
- KTBL, 2018/2019: KTBL-Feldarbeitsrechner. URL: https://daten.ktbl.de/feldarbeit/entry.html, Zugriff am 1.12.2020.
- LETTNER, J., K. HANK, P. WAGNER, 2001: Ökonomische Potenziale der teilschlagspezifischen Unkrautbekämpfung. Berichte über Landwirtschaft 79, 107-139.
- MAHLEIN, A.-K., N. STOCKFISCH, 2020: Pflanzenschutz digitalisieren und optimieren: Projektstart FarmerSpace in Göttingen. Zuckerrübe 69 (5), 36-37.
- MUßHOFF, O., N. HIRSCHAUER, 2016: Modernes Agrarmanagement. Betriebswirtschaftliche Analyse- und Planungsverfahren. 4. Auflage, München, Verlag Franz Vahlen.
- NORDMEYER, H., A. ZUK, A. HÄUSLER, 2003: Experiences of site-specific weed control in winter cereals. Precision Agriculture 4, 457-462.
- PEDERSEN, S.M., S. FOUNTAS, S. BLACKMORE, 2007: Economic potential of robots for high value crops and landscape treatment. Precision Agriculture 7, 457-464.
- POHL, J.-P., D. RAUTMANN, H. NORDMEYER, D. VON HÖRSTEN, 2017: Site-specific application of plant protection products in Precision Farming by direct injection. In: TAYLOR, J.A., D. CAMMARANO, A. PRASHAR, A. HAMILTON (Eds.), Proceedings of the 11th European Conference on Precision Agriculture Advances in Animal Biosciences 8, 255-258.
- POHL, J.-P., H. DUNEKACKE, F. VON BARGEN, D. VON HÖRSTEN, J.K. WEGENER, 2021: Direkteinspeisung an Feldspritzgeräten zur situationsgerechten und teilflächenspezifischen Applikation. Journal für Kulturpflanzen 73 (5/6), 116-120, DOI: 10.5073/JfK.2021.05-06.03.
- RAJMIS, S., B. GOLLA, B. UHL, D. MARTINI, H. KEHLENBECK, 2016: Ökonomische Bewertung eines Entscheidungshilfesystems im Pflanzenschutz am Beispiel von Winterweizen. Julius-Kühn-Archiv, 454, 551-552.
- RASMUSSEN, J., S. AZIM, J. NIELSEN, B. FELD MIKKELSEN, R. HORFARTER, S. CHRISTENSEN, 2020: A new method to estimate the spatial correlation between planned and actual patch spraying of herbicides. Precision Agriculture 21, 713-728.
- SCHROERS, J.O., N. SAUER, 2011: Die Leistungs-Kostenrechnung in der landwirtschaftlichen Betriebsplanung. Darmstadt, Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e. V. KTBL.
- SINN, C., B. GOLLA, 2019: GetDist4Agri, ein Webservice zur Ermittlung abstandsrelevanter Landschaftsstrukturen für den PSM-Einsatz. In: Digitalisierung in kleinstrukturierten Regionen, Lecture Notes in Informatics. MEYER-AURICH, A. et al. (Eds.), Bonn, Germany, Gesellschaft für Informatik, S. 245-250.
- SINN, C., J.-P. POHL, D. JAHNCKE, B. GOLLA, 2021: Webservices für die teilschlagspezifische Bereitstellung ökologischer und ökonomischer Kennzahlen und Basisinformationen im Pflanzenschutz. Journal für Kulturpflanzen 73 (5/6), 149-158, DOI: 10.5073/JfK.2021.05-06.07.
- TIMMERMANN, C., R. GERHARDS, W. KÜHBAUCH, 2003: The economic impact of site-specific weed control. Precision Agriculture 4, 249-260.
- VOLLRATH, D., 2011: The agricultural basis of comparative development. Journal of Economic Growth 16, 343-370, DOI: 10.1007/s10887-011-9074-1.
- WEILAND, B., 2020: KWS testet Unkrautroboter im Feld. Presse-Information KWS. URL: www.kws.com/de/de/media-innovation/presse/press-corner/kws-testet-unkrautroboter-im-feld/, Zugriff am 3.4.2021.

© Der Autor/Die Autorin 2021.

 Dies ist ein Open-Access-Artikel, der unter den Bedingungen der Creative Commons Namensnennung 4.0 International Lizenz (CC BY 4.0) zur Verfügung gestellt wird (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.de).

© The Author(s) 2021.

 This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 International License (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.en).