

Christoph Kämpfer, Henning Nordmeyer

Teilflächenspezifische Unkrautbekämpfung als ein Baustein von Smart Farming

Site-specific weed control
as a component of smart farming

284

Zusammenfassung

Unkräuter treten auf Ackerflächen selten gleichmäßig verteilt auf. Heterogene Unkrautdichten eröffnen der Landwirtschaft die Möglichkeit, Herbizidmaßnahmen teilflächenspezifisch durchzuführen. Hieraus ergibt sich ein erhebliches Einsparpotential für den Einsatz von Pflanzenschutzmitteln. Moderne Technologien wie Direktinspeisungssysteme und verschiedene Verfahren der automatischen Unkrauterkennerung und -kartierung sind die technischen Grundlagen für dieses Verfahren. Es zeigt sich, dass die fortlaufende Forschung und Entwicklung seit den 1980er Jahren das Verfahren der teilflächenspezifischen Unkrautbekämpfung weit vorgebracht hat und dadurch hohe Pflanzenschutzmitteleinsparungen realisiert werden können. Dennoch bleibt die Nutzung des Verfahrens in der landwirtschaftlichen Praxis hinter den technischen Möglichkeiten zurück, obwohl automatische Unkrautdetektion und der Einsatz unbemannter Flugsysteme die Erstellung von Unkrautverteilungskarten stark vereinfacht haben. Zukünftig kann es jedoch dazu beitragen, Pflanzenschutzmittel einzusparen und Biodiversität auf Ackerflächen zu fördern, wenn sich die Akzeptanz in der landwirtschaftlichen Praxis weiter erhöht.

Stichwörter: Herbizideinsparung, Teilflächenspezifische Applikation, Unkrauterkennerung, UAV, Direkteinspeisung, Präzisionslandwirtschaft

Abstract

Weeds are rarely evenly distributed on arable land. Heterogeneous weed densities and distributions open up the possibility for farmers to apply herbicides on a site-specific basis. This results in considerable saving potential for the consumption of plant protection products. Modern technologies such as direct injection systems and various weed detection and mapping methods are the technical basis for this procedure. It can be seen that ongoing development and research since the 1980s has advanced the process a long way. In the future, site-specific weed control can help to save pesticides and create biodiversity on arable land.

Key words: Weed detection, Herbicidereduction, site-specific crop protection, UAV, direct injection, precision farming

Einleitung

Die Unkrautkontrolle ist ein wichtiges Instrument im modernen Ackerbau, um Erträge und die Qualität der Ernteprodukte zu sichern. Mit der Zeit wurde ihr eine immer größere Bedeutung beigemessen, weil Unkräuter mit den Kulturpflanzen um Wachstumsfaktoren wie Nährstoffe, Wasser, Standraum und Licht konkurrieren (SPITTERS & VAN DEN BERGH, 1982) und so den Ertrag und die Qualität

Affiliation

Julius Kühn-Institut (JKI) – Bundesforschungsinstitut für Kulturpflanzen, Institut für Pflanzenschutz in Ackerbau und Grünland, Braunschweig

Kontaktanschrift

Christoph Kämpfer, Julius Kühn-Institut (JKI) – Bundesforschungsinstitut für Kulturpflanzen, Institut für Pflanzenschutz in Ackerbau und Grünland, Messeweg 11/12, 38104 Braunschweig, E-Mail: christoph.kaempfer@julius-kuehn.de

Zur Veröffentlichung eingereicht/angenommen

30. März 2021/26. Mai 2021

des Erntegutes reduzieren (HUME, 1989; MILBERG & HALLGREN, 2004).

Ab Mitte des 19. Jahrhunderts und mit Beginn der Industrialisierung standen in der Landwirtschaft weniger Arbeitskräfte zur Verfügung, und es wurden die ersten Herbizide für die Unkrautkontrolle zur Anwendung gebracht. In der Literatur dieser Zeit finden sich Hinweise, dass z. B. Eisenvitriol vor dem Jahr 1851 zur Unkrautbekämpfung eingesetzt wurde (SCHMITT, 1969). Allerdings werden in einem Fachbuch der Biologischen Reichsanstalt Berlin-Dahlem aus dem Jahre 1943 neben zahlreichen mechanischen Bekämpfungsverfahren nur einige wenige Herbizide erwähnt (BRAUN, 1943). In den 50er und 60er Jahren des 20. Jahrhunderts nahm die Anzahl der verfügbaren Herbizide rasant zu und die technischen Entwicklungen der Applikations- und Landtechnik ermöglichten bald einen flächendeckenden Einsatz (BELL, 2015). Dass Fragen der Unkrautforschung in dieser Zeit immer häufiger im Zentrum wissenschaftlicher Untersuchungen lagen, zeigt auch die steigende Zahl an Vorträgen und Veröffentlichungen, die z. B. im Rahmen der damals von der Universität Hohenheim ausgerichteten Deutschen Arbeitsbesprechung über Fragen der Unkrautbiologie und -bekämpfung („Unkrauttagung“) vorgestellt wurden.

Neben Fragen zur Wirksamkeit der Herbizide standen zum Ende der 1980er Jahre zunehmend Aspekte zur Umweltverträglichkeit des Herbizideinsatzes auf der Agenda und Funde von Herbiziden in Oberflächen- und Grundwasser verschärften die Diskussion um die Notwendigkeit von flächendeckendem Herbizideinsatz im Ackerbau (PIONKE & DE GLOTFELTY, 1989; RITTER, 1990; MULL & NORDMEYER, 1995).

Eine moderne Landwirtschaft steht heute vor der Herausforderung, signifikante Beiträge zum Erhalt von Biodiversität und Kulturlandschaft leisten zu müssen. Dabei hat der reduzierte Einsatz chemischer Pflanzenschutzmittel eine zentrale gesellschaftliche und politische Bedeutung. Dies erfordert umfangreiche Transformationsprozesse in der Bewirtschaftung von Ackerflächen und der generellen Gestaltung von Agrarsystemen. In Bezug auf die Unkrautbekämpfung kann dies u. a. gelingen, wenn Unkräuter mit hohem Schadpotential gezielt bekämpft werden können, während Unkräuter mit hoher ökologischer Wertigkeit von einer Herbizidapplikation ausgenommen werden. Die teilflächenspezifische Applikation als Forschungsfeld soll langfristig Instrumente entwickeln, um diese Zielvorgaben zu erfüllen. Dieser Beitrag soll daher beleuchten, welche Forschungsziele in der Vergangenheit bereits u. a. am Julius Kühn-Institut (JKI) erreicht wurden und zukünftige Handlungsfelder für eine erfolgreiche Implementierung der teilflächenspezifische Herbizidapplikation in die Praxis aufzeigen.

Herbologische und technische Aspekte

Verteilung von Unkräutern

Unkräuter sind in Art und Dichte ungleichmäßig über einen Ackerschlag verteilt. Sie können kumuliert, in

scharf abgegrenzten Nestern oder mit fließenden Übergängen auftreten (DUNKER & NORDMEYER, 2000; WILES & SCHWEIZER, 2002; NORDMEYER & HÄUSLER, 2004; JURADO-EXPOSITO et al., 2009). Dies ist sowohl von biologischen Faktoren, wie der Art und Weise der Fortpflanzung der Unkräuter (vegetative bzw. generative Vermehrung) und der räumlichen Verbreitung der Unkrautsamen, als auch von biotischen, abiotischen und agronomisch technischen Faktoren bestimmt (ANDREASEN et al., 1991; HÄUSLER, 2002; NORDMEYER & HÄUSLER, 2004). Bedingt durch eine vegetative Vermehrung kann das Vorkommen einiger Unkrautarten im Laufe der Zeit räumlich sehr stabil (z. B. *Cirsium arvense*) sein mit nur geringen Veränderungen der Unkrautdichte (JOHNSON et al., 1996; COLBACH et al., 2000). Ein nesterweises bzw. ungleichmäßiges Auftreten konnte dagegen u. a. in Studien zur Verteilung einjähriger ein- und zweikeimblättriger Unkräuter in Getreide und Zuckerrüben herausgearbeitet werden (WALTER, 1996; GERHARDS et al., 1997; NORDMEYER, 2006a; SCHUSTER et al., 2007; KLUGE & NORDMEYER, 2009; WELLHAUSEN et al., 2019).

Für die Landwirtschaft ergibt sich somit ein hohes Einsparpotential bei Herbiziden, wenn die Applikation teilflächenspezifisch auf die jeweilige Unkrautart und -dichte angepasst wird (NORDMEYER, 2006b; POHL et al., 2018).

In der landwirtschaftlichen Praxis erfolgt die Applikation von Herbiziden derzeit dagegen meist schlagspezifisch einheitlich und berücksichtigt kleinräumige Unterschiede im Unkrautvorkommen nicht. Die Entscheidung zur Unkrautbekämpfung erfolgt dabei in Abhängigkeit vorkommender einzelner Leitunkräuter, die aufgrund hoher Dichten, ihres Vermehrungspotentials oder ihrer hohen Konkurrenzkraft gegenüber der Kulturpflanze den Ertrag oder die Qualität des Erntegutes negativ beeinflussen. Ist dagegen das räumliche Vorkommen der Unkräuter bekannt, können je nach Ausmaß der Heterogenität Herbizidanwendungen teilflächenspezifisch erfolgen und zu Einsparungen bei der eingesetzten Herbizidmenge führen (OEBEL & GERHARDS, 2005; NORDMEYER, 2006b). GERHARDS & CHRISTENSEN (2003) konnten bei einem teilflächenspezifischen Herbizideinsatz Einsparungen von 60 % bei zweikeimblättrigen Unkrautarten und 90 % bei einkeimblättrigen Arten zeigen. Auch NORDMEYER (2006a) konnte bei einer nach Unkrautauftreten differenzierten Herbizidapplikation eine deutliche Reduzierung des Herbizideinsatzes in Wintergetreide zeigen (Abb. 1). Die Reduktion lag bei 39 % für einkeimblättrige Unkrautarten und bei 44 % für zweikeimblättrige Arten.

Um eine teilflächenspezifische Applikation von Herbiziden praxistauglich umzusetzen, ist jedoch eine präzise und räumlich hochauflösende Unkrauterkenntnis und -kartierung, sowie eine angepasste Applikationstechnik erforderlich.

Unkrauterkenntnis und -kartierung

Grundvoraussetzung für eine teilflächenspezifische Unkrautbekämpfung sind genaue Kenntnisse über Vorkommen und Dichte der Unkrautarten sowie deren orts-

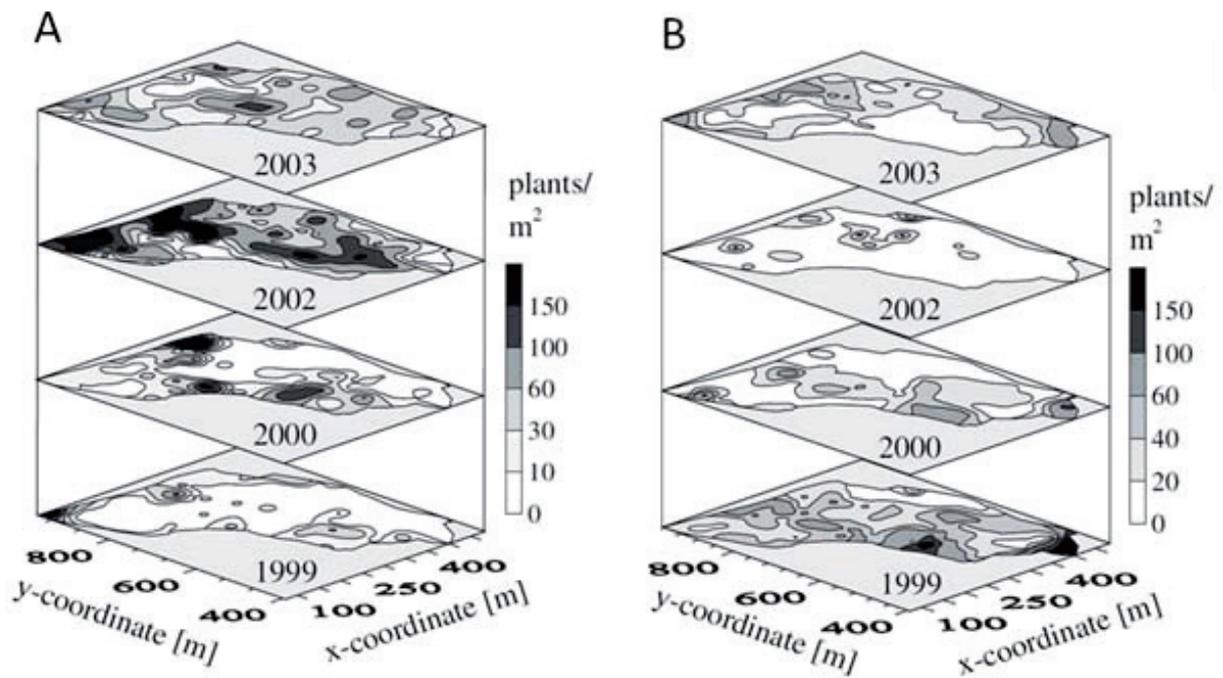


Abb. 1. Karten der Unkrautverteilung vor Herbizideinsatz für Grasunkräuter (A) und breitblättrige Unkräuter (B) über einen Zeitraum von 4 Jahren (Nordmeyer, 2006a)

genaue Lage auf der Ackerfläche, um daraus Bekämpfungsentscheidung abzuleiten und eine Applikationskarte zu erstellen. Die Freischaltung des Global Positioning Systems (GPS) für die zivile Nutzung im Jahr 1983 machte es ab etwa Mitte der 1990er Jahre möglich, vergleichsweise einfach die Position von Objekten und Bereichen im Raum zu kartieren (DOBERS, 2002; LINK, 2018). Die erweiterten Möglichkeiten der Datenverarbeitung und die Verfügbarkeit digitaler Kamerasysteme in diesem Zeitraum führten dazu, dass sich bald zwei Konzepte (Offline und Online Verfahren) für die flächenbezogenen Erfassung von Unkräutern auf der Fläche etablierten, die auch heute noch Anwendung finden (NORDBO et al., 1995).

Offline Verfahren. Offlineverfahren basieren auf Unkrautverteilungskarten. Bei der manuellen Kartierung erfolgt zunächst eine Bonitur der vorhandenen Unkräuter anhand eines festgelegten Rasters auf der Ackerfläche. Im zweiten Schritt werden die Boniturdaten über ein Geoinformationssystem digitalisiert und eine Verteilungskarte des Unkrautvorkommens generiert (Abb. 2). Aus dieser Verteilungskarte lässt sich dann eine Applikationskarte für die Herbizidapplikation ableiten, die die Steuerinformationen für die Teilbreiten bzw. Einzeldüsen der Feldspritze enthält. Die manuelle Generierung von Unkrautverteilungskarten ist seit Beginn der teilflächenspezifischen Unkrautbekämpfung weit verbreitet und wurde über die Jahre in zahlreichen Untersuchungen ange-

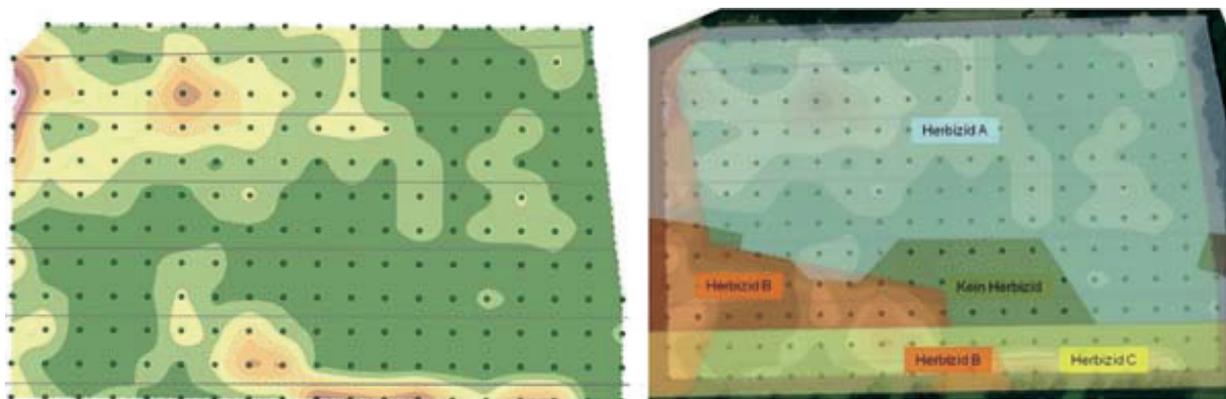


Abb. 2. Links: Unkrautverteilung einer Beispielfläche (braun = hohe Unkrautdichte). Rechts: Applikationskarte für ein Direkteinspeisungs-Mehrkammerspritzsystem basierend auf der Unkrautverteilung (Wellhausen und Nordmeyer, 2019).

wandt (NORDMEYER et al., 1996; GONZALEZ-ANDUJAR & SAAVEDRA, 2003; NORDMEYER, 2006a; IZQUIERDO et al., 2009; POHL et al., 2017; POHL et al., 2019). Die manuelle Unkrautkartierung ist personal- und zeitaufwändig und ihre Genauigkeit hängt von der Größe des Boniturrasters ab. Allerdings erfolgt die Bonitur an jedem Punkt sowohl quantitativ als auch artspezifisch auf einem kleinen Flächenausschnitt (z. B. 0,1 m² mit Göttinger Zählrahmen). Daraus resultiert weiterhin, dass die für die Herbizidbehandlung benötigte Menge Spritzflüssigkeit vor der Ausbringung genau kalkuliert werden kann und somit keine Herbizid-Restmengen entstehen (NORDMEYER & NIEMANN, 1992; NORDBO et al., 1995).

Um den für die Offline-Kartierung benötigten Personal- und Zeitbedarf zu reduzieren, können Fernerkundungsdaten in Betracht gezogen werden. Bereits in den 1980er Jahren wurden Versuche mit ferngelenkten Flugzeugen durchgeführt, die allerdings aufwendig waren, da die Bildübertragung und Steuerung der Flugzeuge nur von gut ausgebildetem Personal durchgeführt werden konnte (THURLING et al., 1985). Mit der Auswertung von Luftbildern konnten hingegen auf Ackerflächen einige Erfolge bei der Identifizierung größerer Unkrautnester mit einer scharfen Abgrenzung erzielt werden (HÄUSLER & NORDMEYER, 2003). Eine feinere Abgrenzung auf Einzelpflanzenebene konnte anhand der Auswertung von Luftbildern allerdings nicht realisiert werden, da die Auflösung der Bilder zu gering war und die Aufnahmen nicht immer aktuell genug waren (HÄUSLER, 2002). Flexibler zur Erfassung der Unkrautverteilung auf landwirtschaftlichen Flächen können dagegen unbemannte Fluggeräte (Unmanned Aerial Vehicles – UAVs) eingesetzt werden, die in geringer Höhe und mit entsprechender Sensor- bzw. Kameratechnik operieren.

Ab Ende der 2010er Jahre entwickelte sich die Technik von Multikoptern im zivilen Sektor rasant weiter. Autopilotensysteme und Teilautomatisierte Flugsteuerung machten die Geräte für den Laien nutzbar, wodurch ein Einsatz in der Landwirtschaft realistisch wurde. Die Nutzlastkapazitäten der gegenwärtig verfügbaren UAVs reichen aus, um Kompakt- oder hochwertige Systemkameras zu tragen. Die inzwischen stabilen Flugeigenschaften der Multikopter sind zudem auch für Luftaufnahmen aus geringer Höhe geeignet, wie sie für die artspezifische Erkennung der einzelnen Unkrautarten benötigt wird. Insbesondere automatische Wegpunktfüge reduzieren Bewegungsunschärfe und ermöglichen eine präzise Überlappung von Einzelbildern für die Erstellung georeferenzierter Unkrautkarten. Die heutige UAV-Technik bietet zahlreiche Vorteile bei der Unkrauterfassung auf dem Acker. Sie kann helfen, große Flächen mit hoher Auflösung und mit geringem zeitlichen sowie personellen Aufwand zu befliegen. Außerdem hat eine signifikante Weiterentwicklung von Photogrammetriesoftware dazu beigetragen, das Unkrautvorkommen bis hin zu Einzelpflanzen räumlich erfasst werden können und die Unkrautkartierung damit vereinfachen (PFLANZ et al., 2014). Dies gelingt durch die geringe Flughöhe der Kopter von 5 m bis 10 m und dem damit verbundenen hohen

Auflösungsvermögen der eingesetzten Sensoren (PFLANZ & NORDMEYER, 2016). In Versuchen des JKIs (Institut für Pflanzenschutz in Ackerbau und Grünland) wurde ein kompakter Multikopter mit einer modifizierten RGB-Kamera (Sony alpha NEX-5N) ausgestattet und es erfolgten Testflüge über verunkrautete Ackerflächen. Der verwendete Hexakopter wurde GPS-gesteuert und operierte in vorgegebener geringer Flughöhe (5 bis 10 m). Bezüglich der Flughöhe, der Bildauflösung und des Entwicklungsstandes von Unkraut und Kulturpflanze wurden verschiedene Szenarios von photogrammetrischer Unkrauterkenntnis durchgeführt. Erfahrungen mit dem Kopter deuten auf ein hohes Potential für eine räumlich hoch aufgelöste Unkrautkontrolle hin. Durch Analyse der georeferenzierten Einzelbilder mit Hilfe einer Softwaregestützten Bonitur und geostatistischer Verfahren konnten räumliche Areale mit hohen Unkrautdichten im Gesamtbestand identifiziert werden (PFLANZ & NORDMEYER, 2016; LATI et al., 2021).

Neben dem Einsatz von UAVs werden seit einigen Jahren Versuche mit bodengestützten Robotern durchgeführt, die über eine Vielzahl von Sensoren wie z. B. UV-induzierte Fluoreszenz-, Ultraschall- oder LiDAR-Sensoren verfügen können, um Höhenunterschiede bzw. Form- und Farbfaktoren der vorkommenden Unkräuter zu bestimmen (STROTHMANN et al., 2017). Allerdings können bodengestützte Roboter bisher nicht in jedem Pflanzenbestand eingesetzt werden, da sie z. B. in einem dichten Rapsbestand nur begrenzt manövrieren können.

In Reihenkulturen kommen sie allerdings schon zu Versuchs- und Erprobungszwecken zum Einsatz. Aufgrund der relativ langen Verarbeitungszeit einiger der genannten Sensorsysteme (z. B. Fluoreszenzmessungen) können diese bisher allerdings nicht für eine gleichzeitige Erfassung der Verunkrautung und Echtzeitansteuerung von Pflanzenschutzgeräten uneingeschränkt verwendet werden (FERNÁNDEZ-QUINTANILLA et al., 2018).

Online Verfahren. Die Installation von Sensoren zur Unkrauterkenntnis direkt am Pflanzenschutzgerät ermöglicht es dagegen, die Unkrauterfassung und Ausbringung der Herbizide im Online-Verfahren durchzuführen (NORDBO et al., 1995; WARTENBERG, 2001; PHILIPP I. et al., 2002; LEITHOLD et al., 2018). Dieses Verfahren bietet den Vorteil, dass der Arbeitsaufwand der separaten Unkrautkartierung entfällt, was aber zur Folge hat, dass Unkrauterkenntnis, Entscheidung über die Behandlung und das Ansteuern der Düsen in relativ kurzer Zeit während der Überfahrt erfolgen müssen. Verfügbare Applikationssysteme, die auf Echtzeitinformationen von Spektralreflexionssensoren für die Unkrauterkenntnis basieren, sind z. B. Weedseeker® (Trimble Inc., Sunnyvale CA, USA), AmaSpot® (Amazonen-Werke H. Dreyer GmbH & Co, Hasbergen, Deutschland) und Weed-it® (Rometron BV, Steenderen, die Niederlande). Den genannten Systemen ist allerdings gemein, dass sie zumeist nur zwischen den Kategorien Boden und Pflanze differenzieren können und daher primär in Reihenkulturen eingesetzt werden können. Eine Erkennung einzelner Unkrautarten in dichten

ten Kulturpflanzenbeständen ist dagegen meist nicht möglich. Einen komplexeren Ansatz verfolgte der H-Sensor (LEITHOLD et al., 2018), der die Zielsetzung hat, die Kultur von den Unkräutern zu unterscheiden und anschließend die Herbizidapplikation des Pflanzenschutzgerätes selektiv durchzuführen (FERNÁNDEZ-QUINTANILLA et al., 2018).

Heute können die Mehrzahl der verfügbaren Systeme zur automatischen Erkennung von Pflanzen meist nur die Kulturpflanze von Unkraut unterscheiden, wenn im Reihenanbau die Position der Kulturpflanze durch GPS-gestützte Aussaat bekannt ist und daraus folgend alle Pflanzen außerhalb der Kulturpflanzenreihe mit Herbiziden behandelt werden müssen. Weiterhin erfolgt in der Praxis bislang keine einzelpflanzenspezifische Erkennung der Unkrautarten, weshalb auch mit Blick auf Aspekte der Biodiversitätsförderung Forschungsbedarf in diesem Bereich zu erkennen ist

Zahlreiche Forschungsarbeiten widmen sich daher seit einigen Jahren dem Thema automatische Unkrauterken- nung. Ziel ist es, unabhängig vom Trägersystem aus Bild- und Sensordaten eine sichere Unterscheidung von Kultur- und Unkrautpflanze zu erreichen. Weiterhin soll die korrekte Arterkennung von Unkräutern ermöglicht werden. So konnte zum Teil die Unkrautzusammensetzung am Boden mit Textur- und Formmodellen bestimmt werden (MANH et al., 2001; SILVESTRI et al., 2003; SØGAARD, 2005). Diesen Arbeiten ist allerdings gemein, dass sie sich auf eine geringe Anzahl an Unkrautarten beschrän- ken. Auf Basis von blattkonturbezogener Fourierdeskrip- tion konnten hingegen über 20 Unkrautarten erkannt werden (SØKEFELD & GERHARDS, 2004).

Der langjährige Trend bei der automatischen Pflanzen- erkennung geht hin zu Methoden der künstlichen Intelli- genz und des maschinellen Lernens (KLUGE & NORDMEYER, 2009; ELI-CHUKWU, 2019). Dabei war das JKI an der Er- probung solcher Verfahren (u. a. künstliche Neuronale Netze) beteiligt (KLUGE & NORDMEYER, 2009). Am JKI konnte mit Hilfe von UAV-erstellten Bildern eine hohe Genauigkeit bei der Unkrauterken- nung mit einem klassi- schen Verfahren des maschinellen Lernens nach dem Prinzip des „Bag of Visual Words Based Image Classifier“ erreicht werden (PFLANZ et al., 2018a). Wie auch bei an- deren Untersuchungen mit UAVs ist eine geringe Flug- höhe von nur wenigen Metern erforderlich, um Bilder in ausreichend hoher räumlicher Auflösung in der Betrach-

tungsebene zu erhalten. Auch in jüngster Zeit wurden diese Verfahren im Rahmen von Forschungsprojekten wie „AssSys“ zum Einsatz gebracht, um Unkrautarten auf Bildern zu erkennen (PFLANZ et al., 2018b; WELLHAUSEN et al., 2020). Allerdings zeigte sich hier, dass das hier ver- wendete einfache CNN nicht die relevanten Pflanzen- muster aus den Trainingsdaten gelernt hat. Folglich lie- ßen sich die Muster aus den Trainingsdaten nicht in den Testdaten wiederfinden. Die Untersuchungen zeigen auch, dass die Anwendung und die Genauigkeit dieser Methoden stark von der Qualität und der Menge an Trai- ningsdaten abhängen, um eine hohe Unkrautkrauterken- nungsrate zu erreichen.

Applikationstechnik

Gegenwärtig werden in der landwirtschaftlichen Praxis zur Unkrautbekämpfung im Allgemeinen Tankmischun- gen ganzflächig eingesetzt um eine breite Wirkung gegen die vorhandenen Unkräuter zu erreichen und um die Anzahl von Überfahrten zu reduzieren. Teilflächenspezi- fische Applikation kann allerdings zu einer teils erheb- lichen Pflanzenschutzmitteleinsparung führen (Tab. 1). Dafür ist neben einer möglichst genauen Unkrautkartie- rung die präzise, automatische Ansteuerung der jeweili- gen Teilbreiten bzw. Einzeldüsen der Feldspritze erfor- derlich. Eine räumlich differenzierte Anwendung von verschiedenen Herbiziden auf einer Fläche kann in Abhängigkeit von der Heterogenität des Unkrautvorkom- mens sinnvoll sein und den Herbizidaufwand verringern (ULBER et al., 2010). Daher werden seit einiger Zeit Pflan- zenschutzgeräte mit Mehrkammersystemen und Direkt- einspeisung entwickelt und erprobt. Ein erstes Gerät wur- de 1989 von der Firma Ciba-Geigy präsentiert (NEUNABER, 1989). Eine der jüngsten Entwicklungen ist das von Julius Kühn-Institut und der Firma Dammann entwickelte und erprobte Direkteinspeisungssystem (KREBS et al., 2015; WELLHAUSEN & NORDMEYER, 2019; POHL et al., 2020). Das Gerät verfügt über ein Mehrkammersystem womit meh- rere Herbizide in einer Überfahrt unabhängig voneinan- der, verzögerungsfrei und zielgenau appliziert werden können. Zudem treten durch das Direkteinspeisungssys- tem nur sehr geringe Restmengen der Spritzflüssigkeit auf. Untersuchungen zu Auswirkungen der ortsspezifi- schen Applikation von Herbiziden mit dem Direktein-

Tab. 1. Einsparungen des Herbizideinsatzes bei teilflächenspezifischer Applikation

Quelle	Einsparung gegenüber ganzflächiger Applikation [%]
GERHARDS, 1997	40–50
LETTNER et al., 2001	30–70
TIMMERMANN et al., 2003	50–70
NORDMEYER, 2006a	Mittel über 7 Jahre: 50 % bis zu 85 %
LEITHOLD et al., 2018	8–63

speisungssystem ergaben, dass die Herbizideinsparungen hierbei schlagspezifisch je nach Auftreten und Häufigkeit der Unkräuter stark variierten. Es konnte aber die Applikationsgenauigkeit des Systems über mehrere Jahre nachgewiesen werden (KREBS et al., 2015; POHL et al., 2016).

Ausblick

Obwohl sich die teilflächenspezifische Unkrautbekämpfung bislang noch nicht flächendeckend in der Praxis durchgesetzt hat, wird sie aufgrund des Herbizideinsparpotentials und der Möglichkeit, Unkräuter selektiv mit Direkteinspeisungssystemen zu bekämpfen, zukünftig an Bedeutung gewinnen. Denkbar ist aber auch, dass eine selektive Unkrautbekämpfung zukünftig mit mechanischen Systemen erfolgt. Verschiedene Landmaschinenhersteller haben bereits Systeme entwickelt und kamerageführte Präzisionshacken auf den Markt gebracht, die Unkräuter zwischen den Reihen und/oder in der Reihe entfernen.

Die gesellschaftliche und politische Forderung nach einer Reduzierung des Pflanzenschutzmitteleinsatzes und einer Steigerung der Biodiversität auf Ackerflächen, machen es erforderlich, die Behandlungsmaßnahmen zukünftig auf Unkräuter mit hohem Schadpotential zu beschränken und andere Arten mit hohem Wert für die Biodiversität von der Bekämpfungsmaßnahme auszunehmen. Eine wichtige Aufgabe besteht jetzt in der Verbesserung der Akzeptanz für diese Technologie bei den Landwirten (LATI et al., 2021). Ein erster Ansatz hierfür ist das Innovationsprogramm Landwirtschaft 2021, das u. a. Pflanzenschutzgeräte fördert, die für die teilflächenspezifische Applikation geeignet sind oder für die Aufnahme externer Sensoren vorbereitet wurden. Aber auch der demografische Wandel in der praktischen Landwirtschaft wird sich auf den Einsatz teilflächenspezifischer Managementverfahren auswirken. PAUSTIAN & THEUVSEN (2016) haben eine breite Palette von Betriebsmerkmalen und demografischen Merkmalen untersucht, um wichtige Aspekte für die Nutzung IT-gestützter Verfahren in der Landwirtschaft zu ermitteln. Ihre Ergebnisse zeigen, dass gut ausgebildete, erfahrene und junge LandwirtInnen eher bereit waren, diese Praktiken zu übernehmen.

Weiterhin muss sichergestellt werden, dass die Kommunikation über entsprechende Datenschnittstellen von Sensorsystemen, Auswerte- und Gerätetechnik unterschiedlicher Hersteller zuverlässig funktioniert. Die weiterhin fortschreitende Entwicklung auf dem Gebiet der künstlichen Intelligenz wird es zukünftig ermöglichen, die Unkrauterkenntung weiter zu vereinfachen und zu automatisieren, wodurch der Aufwand der Kartenerstellung reduziert wird. Die Nutzung von OpenData-Projekten und Bilddatenbanken kann zudem helfen, Modelle zur Unkrauterkenntung robuster und zuverlässiger zu machen, da die Trainingsdatengrundlage erhöht werden kann. Zu einer möglichen Plattform für den Austausch

von Daten und Bilderkennungsalgorithmen könnte sich in den kommenden Jahren AGRI-GAIA auf der Basis von GAIA-X entwickeln. Hierbei muss sich allerdings erst noch zeigen, ob ein problemloser Datenaustausch zwischen verschiedenen Systemen realisiert werden kann.

In den letzten Jahren hat sich weiterhin die Akzeptanz und Verbreitung von hochwertigen UAVs deutlich gesteigert. So ist es denkbar, dass zukünftig die Unkrautkartierung im Zuge der Digitalisierung vollautonom ohne Zutun des Landwirts stattfinden kann. Das Julius Kühn-Institut wird sich auch zukünftig an der Entwicklung durch Forschungsprojekte beteiligen, um die Erreichung der gesetzten Ziele aktiv mit zu gestalten.

Erklärung zu Interessenskonflikten

Die Autoren erklären, dass keine Interessenskonflikte vorliegen.

Literatur

- ANDREASEN, C., J.C. STREIBIG, A. HAAS, 1991: Soil properties affecting the distribution of 37 weed species in Danish fields. *Weed Research* **31** (4), 181–187, DOI:10.1111/j.1365-3180.1991.tb01757.x.
- BELL, C., 2015: A Historical View of Weed Control Technology. Zugriff: 6. Dezember 2020, URL: <https://ucanr.edu/blogs/blogcore/postdetail.cfm?postnum=17593>.
- BRAUN, H., 1943: Kurze Anleitung zur Erkennung und Bekämpfung der wichtigsten Unkräuter. Berlin, Parey.
- COLBACH, N., F. FORCELLA, G.A. JOHNSON, 2000: Spatial and temporal stability of weed populations over five years. *Weed Science* **48** (3), 366–377, DOI: 10.1614/0043-1745(2000)048[0366:SATSOW]2.0.CO;2.
- DOBERS, E.S., 2002: Methoden der Standorterkundung als Grundlage des DGPS-gestützten Ackerbaus eine Fallstudie aus dem Lössgebiet des Mittleren Fläming. Dissertation, Universität Göttingen - Inst. für Bodenwiss.
- DUNKER, M., H. NORDMEYER, 2000: Ursachen einer kleinräumigen Verteilung von Unkrautarten auf Ackerflächen – Feld- und Gewächshausuntersuchungen zum Einfluss von Bodeneigenschaften. *Zeitschrift für Pflanzenkrankheiten und Pflanzenschutz, Sonderheft* **17**, 55–62.
- ELI-CHUKWU, N.C., 2019: Applications of artificial intelligence in agriculture: A review. *Engineering, Technology & Applied Science Research* **9** (4), 4377–4383, DOI: 10.5281/zenodo.3370594.
- FERNÁNDEZ-QUINTANILLA, C., J.M. PEÑA, D. ANDÚJAR, J. DORADO, A. RIBEIRO, F. LÓPEZ-GRANADOS, 2018: Is the current state of the art of weed monitoring suitable for site-specific weed management in arable crops? *Weed Research* **58** (4), 259–272, DOI: 10.1111/wre.12307.
- GERHARDS, R., 1997: Das System schlägt zurück. *DLZ-agrarmagazin, Sonderheft* (10), 35–37.
- GERHARDS, R., S. CHRISTENSEN, 2003: Real-time weed detection, decision making and patch spraying in maize, sugarbeet, winter wheat and winter barley. *Weed Research* **43** (6), 385–392, DOI: 10.1046/j.1365-3180.2003.00349.x.
- GERHARDS, R., M. SÖKEFELD, K. SCHULZE-LOHNE, D.A. MORTENSEN, W. KÜHBAUCH, 1997: Site Specific Weed Control in Winter Wheat. *Journal of Agronomy and Crop Science* **178** (4), 219–225, DOI: 10.1111/j.1439-037X.1997.tb00494.x.
- GONZALEZ-ANDUJAR, J., M. SAAVEDRA, 2003: Spatial distribution of annual grass weed populations in winter cereals. *Crop Protection* **22** (4), 629–633, DOI: 10.1016/S0261-2194(02)00247-8.
- HÄUSLER, A., 2002: Herbologische und verfahrenstechnische Grundlagen einer teilflächenspezifischen Unkrautbekämpfung. Hannover, Inst. für Technik in Gartenbau und Landwirtschaft.
- HÄUSLER, A., H. NORDMEYER, 2003: Using aerial photography to detect weed patches for site-specific weed control – perspectives and limitations. 4th European Conference on Precision Agriculture; Berlin, Germany; 2003.06.15-19, 271–277.
- HUME, L., 1989: YIELD LOSSES IN WHEAT DUE TO WEED COMMUNITIES DOMINATED BY GREEN FOXTAIL [*Setaria viridis* (L.)

- BEAUV.] A MULTISPECIES APPROACH. *Canadian Journal of Plant Science* **69** (2), 521–529, DOI: 10.4141/cjps89-063.
- IZQUIERDO, J., J.M. BLANCO-MORENO, L. CHAMORRO, J.L. GONZÁLEZ-ANDÚJAR, F.X. SANS, 2009: Spatial distribution of weed diversity within a cereal field. *Agronomy for Sustainable Development* **29** (3), 491–496, DOI: 10.1051/agro/2009009.
- JOHNSON, G.A., D.A. MORTENSEN, C.A. GOTWAY, 1996: Spatial and temporal analysis of weed seedling populations using geostatistics. *Weed Science*, 704–710, DOI: 10.1017/S0043174500094571.
- JURADO-EXPOSITO, M., F. LÓPEZ-GRANADOS, L. TORRES, A. GARCÍA-FERRER, SANCHEZ DE LA ORDEN, MANUEL, S. ATENCIANO, 2009: Multi-Species Weed Spatial Variability and Site-Specific Management Maps in Cultivated Sunflower. *Weed Science* **51**, 319–328, DOI: 10.1614/0043-1745(2003)051[0319:MWSVAS]2.0.CO;2.
- KLUGE, A., H. NORDMEYER, 2009: Automated weed detection in winter wheat by using artificial neural network. *Precision Agriculture 2009 - Papers Presented at the 7th European Conference on Precision Agriculture, ECPA 2009* **10**, 321–327.
- KREBS, M., D. RAUTMANN, H. NORDMEYER, J.K. WEGENER, 2015: Entwicklung eines Direkteinspeisungssystems ohne Verzögerungszeiten zur Pflanzenschutzmittelapplikation. *LANDTECHNIK* (70 (6)), 238–253, DOI: 10.15150/lt.2015.3114.
- LATI, R.N., J. RASMUSSEN, D. ANDUJAR, J. DORADO, T.W. BERGE, C. WELLHAUSEN, M. PFLANZ, H. NORDMEYER, M. SCHIRRMANN, H. EIZENBERG, P. NEVE, R.N. JØRGENSEN, S. CHRISTENSEN, 2021: Site-specific weed management—constraints and opportunities for the weed research community: Insights from a workshop. *Weed Research*, DOI: 10.1111/wre.12469.
- LEITHOLD, H., H. SCHMEER, P. LEITHOLD, S. MÜLLER, 2018: Sensorbasierte, teilflächenspezifische Unkrautbekämpfung im Mais: Ergebnisse eines 3-jährigen Großflächenversuches. *Julius-Kühn-Archiv* (461), 361–362.
- LETTNER, J., K. HANK, P. WAGNER, 2001: Ökonomische Potenziale der teilflächenspezifischen Unkrautbekämpfung. *Berichte über Landwirtschaft* (79), 107–139.
- LINK, M., 2018: Das Navi weiß den Weg: 40 Jahre GPS-Satelliten. Zugriff: 9. Januar 2021, URL: <https://www.heise.de/newsticker/meldung/Das-Navi-weiss-den-Weg-40-Jahre-GPS-Satelliten-3975516.html>.
- MANH, A.-G., G. RABATEL, L. ASSEMAT, M.-J. ALDON, 2001: AE—Automation and Emerging Technologies. *Journal of Agricultural Engineering Research* **80** (2), 139–146, DOI: 10.1006/jaer.2001.0725.
- MILBERG, P., E. HALLGREN, 2004: Yield loss due to weeds in cereals and its large-scale variability in Sweden. *Field Crops Research* **86** (2–3), 199–209, DOI: 10.1016/j.fcr.2003.08.006.
- MULL, R., H. NORDMEYER, 1995: Pflanzenschutzmittel im Grundwasser: Eine interdisziplinäre Studie. Berlin, Heidelberg, Springer Berlin Heidelberg.
- NEUNABER, N., 1989: Pflanzenschutz: Wasser und Mittel endlich getrennt. *Profi* **1** (12), 9.
- NORDBO, E., S. CHRISTENSEN, K. KRISTENSEN, 1995: Teilflächen Unkrautmanagement/Weed patch management. *Zeitschrift für Pflanzenkrankheiten und Pflanzenschutz/Journal of Plant Diseases and Protection* **102** (1), 75–85.
- NORDMEYER, H., 2006a: Patchy weed distribution and site-specific weed control in winter cereals. *Precision Agriculture* **7** (3), 219–231, DOI: 10.1007/s11119-006-9015-8.
- NORDMEYER, H., 2006b: Reduktionsprogramm chemischer Pflanzenschutz – Beitrag der teilflächenspezifischen Unkrautbekämpfung. *Nachrichtenblatt des Deutschen Pflanzenschutzdienstes* **58** (12), 317–322.
- NORDMEYER, H., A. HÄUSLER, 2004: Einfluss von Bodeneigenschaften auf die Segetalflora von Ackerflächen. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* **167** (3), 328–336, DOI: 10.1002/jpln.200221071.
- NORDMEYER, H., A. HÄUSLER, P. NIEMANN, 1996: Weed mapping as a tool for patchy weed control. *Proceedings Second International Weed Control Congress, Copenhagen* **Volume 1**, 119–124.
- NORDMEYER, H., P. NIEMANN, 1992: Möglichkeiten der gezielten Teilflächenbehandlung mit Herbiziden auf der Grundlage von Unkrautverteilung und Bodenvariabilität. *Z. Pflkrankh. Pflschutz Sonderheft* **13**, 539–547.
- OEBEL, H., R. GERHARDS, 2005: Site-specific weed control using digital image analysis and georeferenced application maps: On-farm experiences. *Stafford, J.V. (Ed.), Precision Agriculture, 5th European Conference on Precision Agriculture*, 131–137.
- PAUSTIAN, M., L. THEUVSEN, 2016: Einfluss von betrieblichen und soziodemografischen Faktoren auf die Nutzung von IT-basierten Planungshilfen durch landwirtschaftliche Unternehmer. 1617–5468.
- PFLANZ, M., D. FEISTKORN, H. NORDMEYER, 2014: Unkrauterkennung mit Hilfe unbemannter Luftfahrzeuge. *Julius-Kühn-Archiv* (443), 396, DOI: 10.5073/jka.2014.443.050.
- PFLANZ, M., H. NORDMEYER, 2016: Automatisierte Unkrauterkennung auf dem Acker – Möglichkeiten und Grenzen. *Julius-Kühn-Archiv* (452), 241, DOI: 10.5073/jka.2016.452.033.
- PFLANZ, M., H. NORDMEYER, M. SCHIRRMANN, 2018a: Weed Mapping with UAS Imagery and a Bag of Visual Words Based Image Classifier. *Remote Sensing* **10** (10), 1530, DOI: 10.3390/rs10101530.
- PFLANZ, M., M. SCHIRRMANN, H. NORDMEYER, 2018b: Räumlich hochauflösende Unkrauterkennung mittels Flugroboter und merkmalsextrahierender Bildverarbeitung. *Julius-Kühn-Archiv* **458**, 379–384, DOI: 10.5073/JKA.2018.458.056.
- PHILIPP I., T. RATH, H. NORDMEYER, 2002: Computerbildanalytische Unkrautkartierung in Zuckerrübenbeständen. *Zeitschrift für Pflanzenkrankheiten und Pflanzenschutz (Sonderheft XVIII)*, 429–436.
- PIONKE, H.B., DE GLOTFELTY, 1989: Nature and extent of groundwater contamination by pesticides in an agricultural watershed. *Water research* **23** (8), 1031–1037, DOI: 10.1016/0043-1354(89)90178-4.
- POHL, J., D. RAUTMANN, H. NORDMEYER, D. VON HÖRSTEN, 2017: Site-specific application of plant protection products in Precision Farming by direct injection. *Advances in Animal Biosciences* **8** (2), 255–258, DOI: 10.1017/S2040470017000255.
- POHL, J.P., D. VON HÖRSTEN, J.K. WEGENER, B. GOLLA, I. KARPINSKI, S. RAJMIS, C. SINN, H. NORDMEYER, C. WELLHAUSEN, B. KLEINHENZ, M. HERRMANN, H. DUNEKACKE, A. MATTHIESEN, F. VON BARGEN, D. JAHNCKE, D. FEISE, M. RÖHRIG, R. SANDER, 2020: Assistance system for the site-specific use of herbicides. *Julius-Kühn-Archiv* (464), 216–221, DOI: 10.5073/jka.2020.464.033.
- POHL, J.-P., D. RAUTMANN, D. VON HÖRSTEN, H. NORDMEYER, M. KREBS, 2016: Precision Farming: Präzise Unkrautbekämpfung durch Direkteinspeisung. *Der Pflanzenarzt* **69** (5), 12–14.
- POHL, J.-P., D. RAUTMANN, H. NORDMEYER, D. VON HÖRSTEN, 2018: Teilflächenspezifische Unkrautbekämpfung durch Direkteinspeisung – eine Innovation zur präzisen Applikation im Pflanzenbau. *Julius-Kühn-Archiv* (458), DOI: 10.5073/JKA.2018.458.055.
- POHL, J.-P., D. RAUTMANN, H. NORDMEYER, D. VON HÖRSTEN, 2019: Direkteinspeisung im Präzisionspflanzenschutz – Teilflächenspezifische Applikation von Pflanzenschutzmitteln. *Gesunde Pflanzen* **71** (S1), 51–55, DOI: 10.1007/s10343-019-00452-y.
- RITTER, W.F., 1990: Pesticide contamination of ground water in the United States-A review. *Journal of Environmental Science & Health Part B* **25** (1), 1–29, DOI: 10.1080/03601239009372674.
- SCHMITT, N., 1969: Über 100 Jahre chemische Unkrautbekämpfung: Beiträge zur Geschichte der chemischen Unkrautbekämpfung. *Zeitschrift für Pflanzenkrankheiten (Pflanzenpathologie) und Pflanzenschutz* **76** (5), 282–290.
- SCHUSTER, I., H. NORDMEYER, T. RATH, 2007: Comparison of vision-based and manual weed mapping in sugar beet. *Biosystems Engineering* **98** (1), 17–25, DOI: 10.1016/j.biosystemseng.2007.06.009.
- SILVESTRI, S., M. MARANI, A. MARANI, 2003: Hyperspectral remote sensing of salt marsh vegetation, morphology and soil topography. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C* **28** (1–3), 15–25, DOI: 10.1016/S1474-7065(03)00004-4.
- SØGAARD, H.T., 2005: Weed Classification by Active Shape Models. *Biosystems Engineering* **91** (3), 271–281, DOI: 10.1016/j.biosystemseng.2005.04.011.
- SÖKEFELD, M.R. GERHARDS, 2004: Automatische Unkrautkartierung mit digitaler Bildverarbeitung. *LANDTECHNIK* **59** (3), 154–155, DOI: 10.15150/lt.2004.1316.
- SPITTERS, C.J.T., J.P. VAN DEN BERGH, 1982: Competition between crop and weeds: A system approach. In: *Biology and ecology of weeds*. HOLZNER, W., M. NUMATA (Hrsg.), Dordrecht, Springer Netherlands, S. 137–148.
- STROTHMANN, W., A. RUCKELSHAUSEN, J. HERTZBERG, C. SCHOLZ, F. LANGSENKAMP, 2017: Plant classification with In-Field-Labeling for crop/weed discrimination using spectral features and 3D surface features from a multi-wavelength laser line profile system. *Computers and Electronics in Agriculture* **134**, 79–93, DOI: 10.1016/j.compag.2017.01.003.
- THURLING, D.J., R.M. HARVEY, N.J. BUTLER, 1985: Aerial photography of field experiments using remotely piloted aircraft. *Proceedings BCPS - Weeds*, 357–363.
- TIMMERMANN, C., R. GERHARDS, W. KÜHBAUCH, 2003: The economic impact of site-specific weed control. *Precision Agriculture* (4), 249–260, DOI: 10.1023/A:1024988022674.
- ULBER, L., H.-H. STEINMANN, S. KLIMEK, 2010: Using selective herbicides to manage beneficial and rare weed species in winter wheat. *Journal of Plant Diseases and Protection* **117** (5), 233–239, DOI: 10.1007/BF03356366.
- WALTER, A.M., 1996: Temporal and spatial stability of weeds. 2. *International Weed Control Congress, Copenhagen (Denmark)*, 25–28 June 1996.

- WARTENBERG, G., 2001: Teilflächenspezifische Unkrautregulierung im Echtzeit-Verfahren. *LANDTECHNIK* 56 (5), 322–323, DOI:10.15150/lt.2001.1793.
- WELLHAUSEN, C., H. NORDMEYER, 2019: Ein weiter Weg zur Praxisreife. *Land & Forst: Landwirtschaft und Landleben in Niedersachsen* 172 (48), 29–31.
- WELLHAUSEN, C., M. PFLANZ, J.-P. POHL, H. NORDMEYER, 2019: Automatic weed recognition for site-specific herbicide application. The 12th European Conference on Precision Agriculture: 8–11 July 2019, Montpellier, France; Book of abstracts of all the Posters, 196–197.
- WELLHAUSEN, C., M. PFLANZ, J.-P. POHL, H. NORDMEYER, 2020: Generierung von Unkrautverteilungskarten auf der Basis automatischer Annotierungen in Feldaufnahmen. *Julius-Kühn-Archiv* (464), 222, DOI: 10.5073/jka.2020.464.034.

WILES, L., E. SCHWEIZER, 2002: Spatial dependence of weed seed banks and strategies for sampling. *Weed Science* 50 (5), 595–606, DOI: 10.1614/0043-1745(2002)050[0595:SDOWSB]2.0.CO;2.

© 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>).