

TEXTE

177/2024

Pflanzenschutz im Wandel – Chancen der Digitalisierung und innovativer Verfahren im Pflanzenschutz und ihre Folgen für den Schutz der Umwelt

Abschlussbericht

von:

Udo Hommen, Elke Eilebrecht, Michael Klein, Kerstin Hund-Rinke, Lena Kosak, Christoph Schäfers

Fraunhofer IME, Schmallenberg
Matthias Trapp

RLP AgroScience, Neustadt a. d. Weinstraße

Herausgeber:

Umweltbundesamt

TEXTE 177/2024

Projektnummer 146659

FB001458

Pflanzenschutz im Wandel – Chancen der Digitalisierung und innovativer Verfahren im Pflanzenschutz und ihre Folgen für den Schutz der Umwelt

Abschlussbericht

von

Udo Hommen, Elke Eilebrecht, Michael Klein, Kerstin
Hund-Rinke, Lena Kosak, Christoph Schäfers
Fraunhofer IME, Schmallenberg

Matthias Trapp
RLP AgroScience, Neustadt a. d. Weinstraße

Im Auftrag des Umweltbundesamtes

Impressum

Herausgeber

Umweltbundesamt
Wörlitzer Platz 1
06844 Dessau-Roßlau
Tel: +49 340-2103-0
Fax: +49 340-2103-2285
buergerservice@uba.de
Internet: www.umweltbundesamt.de

Durchführung der Studie:

Fraunhofer-Institut für Molekularbiologie und Angewandte Oekologie
Auf dem Aberg 1
57392 Schmallenberg

RLP AgroScience GmbH
Breitenweg 71
67435 Neustadt an der Weinstraße

Abschlussdatum:

Februar 2024

Redaktion:

Fachgebiet IV 1.3 Pflanzenschutzmittel
Michael Heß, Cécile Périllon, Christina Pickl

Publikationen als pdf:

<http://www.umweltbundesamt.de/publikationen>

ISSN 1862-4804

Dessau-Roßlau, Dezember 2024

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autorinnen und Autoren. Recherchen erfolgten hauptsächlich in den Jahren 2020 / 2021.

Kurzbeschreibung: Pflanzenschutz im Wandel – Chancen der Digitalisierung und innovativer Verfahren im Pflanzenschutz und ihre Folgen für den Schutz der Umwelt

Pflanzenschutz ist ein notwendiger Bestandteil jeder landwirtschaftlichen Praxis, um Erträge zu sichern und eingesetzte Ressourcen effektiv zu nutzen. Grundlage des Integrierten Pflanzenschutzes sind vorbeugende Maßnahmen, bei Bedarf gefolgt von physikalischen, biologischen -biotechnischen und chemischen Maßnahmen. Im chemischen Pflanzenschutz wird es weiterhin neue Wirkstoffe und Formulierungen (z.B. Nanopestizide) geben, wenn auch voraussichtlich nicht mehr in dem Umfang wie bisher. Generell wird ein Trend zu biologischen Pflanzenschutzmitteln festgestellt, da hier oft eine höhere Spezifität bei geringer Persistenz in der Umwelt erreicht werden kann. Physikalische Verfahren werden vor allem in der Beikrautbekämpfung eine größere Rolle spielen. Die Sortenwahl stellt bisher schon eine wichtige Säule des vorbeugenden Pflanzenschutzes dar und Verfahren des *Smart Breeding* erlauben eine gezieltere und schnellere Bereitstellung von Pflanzen mit Resistenzen gegen bestimmte Krankheiten oder Schädlinge. Digitalisierung kann durch verbesserte Sensorik, Robotik, und Nutzung großer Datenmengen (*Big data*) zur deutlichen Reduzierung des Einsatzes von Pflanzenschutzmitteln führen, weil räumlich und zeitlich genauer appliziert werden kann (*Precision Farming*). Physikalische Maßnahmen können ebenso gezielter erfolgen. Kleinräumigerer Anbau (z.B. *spot farming*) und Mischkulturen als Alternative zu großen Schlägen und Fruchtfolgen mit nur wenigen Kulturpflanzen werden technisch vereinfacht und damit wirtschaftlich lohnender. Insgesamt werden durch die neuen Entwicklungen positive Effekte auf die Biodiversität in der Agrarlandschaft erwartet, da chemische Mittel verstärkt ersetzt oder gezielter eingesetzt werden können. Solche Anbauverfahren haben neben der vorbeugenden Wirkung gegen Schädlinge zusätzlich den Vorteil die Agrarbiodiversität und damit die Strukturvielfalt in der Agrarlandschaft direkt zu erhöhen. Voraussetzungen für die erfolgreiche Implementierung der Maßnahmen sind die Bereitstellung der notwendigen Infrastruktur, die angemessene Berücksichtigung in der Regulatorik, Anpassung von Fördermaßnahmen, sowie die Klärung von Fragen zu Datenhoheit, Datensicherheit und Datenschutz.

Abstract: Plant Protection in Transition - Opportunities of Digitalisation and Innovative Processes in Plant Protection and their Consequences for the Protection of the Environment

Plant protection is a necessary part of any agricultural practice to secure yields and to use applied resources effectively. The basis of integrated crop protection is preventive measures followed, if necessary, by physical, biological -biotechnical and chemical measures. In chemical crop protection, new active substances and formulations (e.g. nano-pesticides) will continue to be developed, although probably not to the same extent as before. In general, there is a trend towards biopesticides, due to their often higher specificity combined with low persistence in the environment. Physical methods will play a greater role, especially in weed control. Variety selection is already an important pillar of preventive plant protection, and new smart breeding methods allow a more targeted and faster supply of plants with resistance to certain diseases or pests. Digitalisation can lead to a significant reduction in the use of pesticides through improved sensor technology, robotics and the use of large amounts of data (*big data*), because application can be more precise in terms of space and time (*precision farming*). Physical measures can also be more targeted. Small-scale cultivation (e.g. *spot farming*) and mixed crops as an alternative to large fields with a close crop rotation are technically simplified and thus economically more profitable. Overall, the new developments are expected to have positive effects on biodiversity in the agricultural landscape, as chemical agents can increasingly be replaced or used in a more targeted manner. In addition to the preventive effect against pests, new diverse cultivation methods have the additional advantage of directly increasing agricultural biodiversity and thus structural diversity in the agricultural landscape. Prerequisites for the successful implementation of the measures are the provision of the necessary infrastructure, appropriate consideration in regulation, adaptation of funding measures, as well as the clarification of questions regarding data sovereignty, data security and data protection.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis.....	8
Tabellenverzeichnis	8
Abkürzungsverzeichnis.....	9
Zusammenfassung.....	10
Summary	24
1 Einleitung.....	37
2 Überblick über aktuelle Entwicklungen im Pflanzenschutz	40
2.1 Chemische Pflanzenschutzmaßnahmen	40
2.1.1 Nanopestizide	43
2.1.2 Reduzierung von Aufwandmengen durch herbizidresistente Pflanzen	45
2.2 Biologische oder biotechnische Pflanzenschutzmaßnahmen.....	45
2.2.1 Biopestizide.....	45
Protein-basierte Pestizide	46
RNA-Interferenz (RNAi)	47
<i>Plant incorporated protectants</i> (PIPs)	48
2.2.2 Einsatz von Nützlingen.....	48
2.3 Physikalische Pflanzenschutzmaßnahmen.....	49
2.4 Vorbeugende Maßnahmen	51
2.5 <i>Digital Farming</i>	52
2.5.1 <i>Digital Farming</i> und Chemischer Pflanzenschutz	54
2.5.2 <i>Digital Farming</i> und biologische / biotechnische Pflanzenschutzmaßnahmen.....	58
2.5.3 <i>Digital Farming</i> und physikalische Pflanzenschutzmaßnahmen	58
2.5.4 <i>Digital Farming</i> und vorbeugende Maßnahmen	60
2.5.5 Plattformbasierte Systeme	61
2.6 Zusammenfassung – Entwicklung des Pflanzenschutzes.....	63
3 Analyse	67
3.1 Chemische Maßnahmen	67
3.1.1 Chancen und Risiken aus der Sicht eines umweltgerechten Pflanzenschutzes.....	67
3.1.2 Treiber, Stakeholder, Profiteure der Entwicklungen	70
3.1.3 Hemmnisse	70
3.1.4 Vernetzung mit weiteren Entwicklungen im Pflanzenschutz	71
3.2 Biologische und biotechnische Maßnahmen.....	72
3.2.1 Chancen und Risiken aus der Sicht eines umweltgerechten Pflanzenschutzes.....	72

3.2.2	Treiber, Stakeholder, Profiteure der Entwicklungen	73
3.2.3	Hemmnisse	74
3.2.4	Vernetzung / Kopplung mit weiteren Entwicklungen im Pflanzenschutz.....	75
3.3	Physikalische Maßnahmen.....	75
3.3.1	Chancen und Risiken aus der Sicht eines umweltgerechten Pflanzenschutzes.....	75
3.3.2	Treiber, Stakeholder, Profiteure der Entwicklungen	77
3.3.3	Hemmnisse	77
3.3.4	Vernetzung / Kopplung mit weiteren Entwicklungen im Pflanzenschutz.....	78
3.4	Vorbeugende Maßnahmen	78
3.4.1	Chancen und Risiken aus der Sicht eines umweltgerechten Pflanzenschutzes.....	78
3.4.2	Treiber, Stakeholder, Profiteure der Entwicklungen	79
3.4.3	Hemmnisse	79
3.4.4	Vernetzung / Kopplung mit weiteren Entwicklungen im Pflanzenschutz.....	80
3.5	<i>Digital Farming</i>	81
3.5.1	Chancen und Risiken aus der Sicht eines umweltgerechten Pflanzenschutzes.....	81
3.5.2	Treiber, Stakeholder, Profiteure der Entwicklungen	83
3.5.3	Hemmnisse	84
3.5.4	Vernetzung / Kopplung mit weiteren Entwicklungen im Pflanzenschutz?.....	85
3.6	Zusammenfassung der Analyse.....	86
4	Bewertung und Empfehlungen	93
4.1	Am wenigsten ökologisch nachhaltig eingeschätzte Entwicklungen.....	93
4.2	Vielversprechendste Entwicklungen für einen verbesserten Schutz der Umwelt (Leuchttürme)	93
4.3	Voraussetzungen und Anforderungen für eine erfolgreiche Umsetzung umweltgerechter Neuerungen	95
5	Quellenverzeichnis	97

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Maßnahmenpyramide für den integrierten Pflanzenschutz38

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Überblick über als relevant angesehene Entwicklungen im Pflanzenschutz ohne Digitalisierung.....	11
Tabelle 2:	Überblick über als relevant angesehene Entwicklungen im Pflanzenschutz mit Hilfe von Digitalisierung (Sensorik, Robotik, <i>Big Data</i> , KI).....	12
Tabelle 3:	Überblick über Chancen und Risiken verschiedener Pflanzenschutzrends in Bezug auf den Umweltschutz in Relation zu konventionellem chemischem Pflanzenschutz	15
Tabelle 4:	Treiber, Stakeholder, Profiteure von Entwicklungen im Pflanzenschutz sowie Hemmnisse für weitere Entwicklungen und Implementierung.....	19
Table 5:	Overview of developments in crop protection relevant without digitalisation	25
Table 6:	Overview of developments considered relevant in crop protection with the help of digitalisation (sensor technology, robotics, <i>Big Data</i> , AI).....	26
Table 7:	Overview of opportunities and risks of various crop protection trends in relation to environmental protection in relation to conventional chemical crop protection.....	28
Table 8:	Drivers, stakeholders, beneficiaries of developments in crop protection and barriers to further developments and implementation.....	31
Tabelle 9:	Erfolgte und mögliche Zulassungsenden von nicht selektiven Herbiziden in Europa	42
Tabelle 10:	Beispiele und Vorteile von Nanoformulierungen (bei dem Nanoanteil handelt es sich nicht um den Wirkstoff).....	44
Tabelle 11:	Vor- und Nachteile der pfluglosen Bodenbearbeitung	50
Tabelle 12:	Als relevant angesehene Entwicklungen im Pflanzenschutz ohne Digitalisierung.....	64
Tabelle 13:	Als relevant angesehene Entwicklungen im Pflanzenschutz mit Digitalisierung.....	65
Tabelle 14:	Überblick über Chancen und Risiken verschiedener Pflanzenschutzrends in Bezug auf den Umweltschutz in Relation zu konventionellem chemischem Pflanzenschutz	87
Tabelle 15:	Treiber, Stakeholder, Profiteure von Entwicklungen im Pflanzenschutz sowie Hemmnisse für weitere Entwicklungen und Implementierung.....	91

Abkürzungsverzeichnis

AOP	Adverse Outcome Pathway
a.s.	Active substances
BMEL	Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft
CRISPR(/Cas)	Clustered Regularly Interspaced Short Palindromic Repeats (mit Hilfe von Cas-Proteinen)
DAP	Digitales Agrarportal
DBU	Deutsche Bundesstiftung Umwelt
DF	Digital Farming
dsRNA	Double stranded RNA
ECPA	European Crop Protection Association, seit 2021 CropLife Europe
EFSA	European Food Safety Authority
GAP	Good Agricultural Practice
GBI	Geobox Infrastruktur
GMO	Genetically modified organism
GMP	Genetically modified plant
IVA	Industrieverband Agrar
JKI	Julius Kühn-Institut
KI	Künstliche Intelligenz
LZH	Laser Zentrum Hannover
NAP	Nationalen Aktionsplan Pflanzenschutz
NGO	Non-Governmental Organization
NIR Sensor	Nah-Infrarot-Sensor
NZF	Nichtzielflächen
PEC	Predicted Environmental Concentration
PIP	Plant incorporated protectant
PSM	Pflanzenschutzmittel
PWM	Pulsweitenmodulation
RNAi	RNA (ribonucleic acid) -Interferenz
SDSS	Spatial Decision Support System
TWA	Time Weighted Average
UBA	Umweltbundesamt
UV	Ultraviolett

Zusammenfassung

Ziel dieses Gutachten ist es, einen Überblick über aktuelle Entwicklungen im Pflanzenschutz zu geben, eine erste Analyse der Chancen und Risiken in Bezug auf ihre Umweltverträglichkeit zu erstellen und abschließend Empfehlungen abzuleiten, wie diese Entwicklungen regulatorisch zu begleiten und zu beeinflussen sind. Besonderes Augenmerk wurde dabei auf die erwartete zunehmende Digitalisierung in der Landwirtschaft gelegt.

Das Gutachten orientiert sich im Aufbau an der Maßnahmenpyramide des integrierten Pflanzenschutzes, wie sie im Nationalen Aktionsplan Pflanzenschutz (NAP, BMEL 2021a) verwendet wird und als Leitbild im Pflanzenschutzgesetz (BMJ 2020) verankert ist. Dabei bilden vorbeugende Maßnahmen wie z. B. Standort- und Sortenwahl, Fruchtfolge, Bodenbearbeitung, Düngung und die Förderung von Nützlingen die Basis des Pflanzenschutzes. Auf der nächsten Stufe kommen physikalische und biologisch / biotechnologische Maßnahmen zum Einsatz. Chemische Maßnahmen (d. h. der Einsatz von synthetischen oder natürlichen Stoffen) sollen im Integrierten Pflanzenschutz auf das notwendige Maß beschränkt werden. Dieses generelle Prinzip wird durch die *Farm to Fork* Strategie im *Green Deal* der EU konkretisiert, indem bis 2030 der Einsatz von und das Risiko durch chemische Pestizide insgesamt um 50 % zu verringern sind (Europäische Kommission 2020). Neue Entwicklungen im Pflanzenschutz sind daher insbesondere unter dem Gesichtspunkt der Reduzierung chemischer Maßnahmen zu betrachten. *Digital Farming* wird in diesem Gutachten als Querschnittsthema angesehen und daher in Zusammenhang mit den einzelnen Komponenten des Integrierten Pflanzenschutzes diskutiert. Das Gutachten ist nach neun in der Leistungsbeschreibung gestellten Fragen strukturiert:

Überblick über aktuelle Entwicklungen im Pflanzenschutz

1. Welche Entwicklungen gibt es im Pflanzenschutz?
2. Wie weit fortgeschritten sind die Entwicklungen bzw. wie realistisch oder unter welchem Zeit-horizont sind die Entwicklungen zu betrachten?

Zunächst wurden Entwicklungen betrachtet, die auch ohne weitere Digitalisierung implementiert werden können (Tabelle 1). Im **chemischen Pflanzenschutz** wird es weiterhin neue Wirkstoffe und Formulierungen geben, wenn auch voraussichtlich nicht mehr in dem Umfang wie bisher. Herbizide mit neuen Wirkmechanismen sind z. B. seit ca. 20 Jahren nicht mehr auf den Markt gebracht worden (Umetsu und Shirai 2020). Die Verwendung von Nanomaterialien stellte eine relative neue Entwicklung dar. Als Formulierungshilfsstoffe sollen sie die Aufnahme in den Zielorganismus verbessern oder durch langsame Freisetzung den Schutz verlängern (DaBNaN 2021). Seltener werden Nanomaterialien bisher als Wirkstoffe genutzt (Quik *et al.* 2020).

Insgesamt wird ein Trend weg von chemischen Pflanzenschutzmitteln hin zu biologischen Mitteln erwartet (Olson 2015, zitiert in Umetsu und Shirai (2020)). Als **Biopestizide** bezeichnet man Pflanzenschutzmittel, die auf Mikroorganismen oder Produkten von Mikroorganismen, Pflanzen oder Tieren basieren. Sie zeichnen sich oft durch eine hohe Spezifität bezogen auf Zielorganismen und eine geringe Persistenz in der Umwelt aus, so dass in vielen Fällen die Auswirkungen auf Nicht-Zielorganismen im Vergleich zu chemischen Mitteln reduziert werden können. Ein bekanntes Beispiel für Protein-basierte Mittel bilden die Bt-Toxine von *Bacillus thuringiensis*. Unterschiedliche Stämme von *B. thuringiensis* bilden Toxine, die sehr spezifisch auf unterschiedliche Insekten wirken und die Entdeckung neuer art-spezifischer Toxine ist weiterhin möglich. Neben den Bt-Proteinen werden einige neue biologische Substanzen in der Literatur als geeignete neue Biopestizide beschrieben, z. B. Produkte des Pilzes *Trichoderma harzianum*, die gegen

die *Fusarium*-Wurzelfäule effektiv wirken sollen (Kirk & Schafer, 2015) und *Pseudomonas chlororaphis*, welches wie die Bt-Proteine gegen den Maiswurzelbohrer wirkt (Schellenberger *et al.*, 2016). Diese neuen protein-basierten Mittel befinden sich momentan noch in einem frühen Entwicklungsstadium und ihre Effektivität muss noch in Feldstudien bewiesen bzw. analysiert werden. Eine andere neue Entwicklung stellen RNA Interferenz (RNAi) basierte Pestizide dar, mit denen Gene gezielt abgeschaltet werden können und somit die Bildung bestimmter Proteine herabreguliert wird. Diese Zielproteine sind meist Teil von essentiellen Stoffwechselwegen des Zielorganismus, sodass dieser zunächst die Nahrungsaufnahme einstellt und anschließend stirbt. Das Erbgut der Pflanze oder der Zielorganismen wird durch die RNS-Mittel nicht verändert, die Anwendung entspricht eher einer Impfung der Pflanze (Pflanzenforschung.de 2018). Beispiele sind Mittel gegen den Maiswurzelbohrer (*Diabrotica virgifera virgifera*, Baum *et al.* 2007) oder den Pilz *Fusarium graminearum* (Werner *et al.*, 2020). Eine Herausforderung stellt noch die wirtschaftliche Herstellung der RNA dar, nach Kogel (2019) sind aber erste Produkte schon auf dem Markt. Sowohl Protein- als auch RNS-basierte Wirkstoffe können wie normale Pflanzenschutzmittel angewendet werden, können aber auch von transgenen Pflanzen als sogenannte PIPs (*Plant Incorporated Protectants*) selbst produziert werden.

Neben klassischen mechanischen Maßnahmen der Bodenbearbeitung stehen heute auch andere **physikalische Verfahren** der Beikrautbekämpfung zur Verfügung, z. B. mit Hilfe von Strom (elektrophysikalische Verfahren), Licht oder Hitze. Roboter zur Bekämpfung des Mehltaus in Erdbeeren und Wein mit UV Licht sind seit kurzem auf dem Markt (Thorvald 2021).

Die Sortenwahl stellt bisher schon eine wichtige Säule des **vorbeugenden Pflanzenschutzes** dar. Neue Verfahren des *Smart Breedings* und CRISPR/Cas-Techniken erlauben eine gezieltere und schnellere Bereitstellung von Pflanzen mit Resistenzen gegenüber bestimmten Pflanzenkrankheiten oder Schädlingen inklusive der Entwicklung von Nutzpflanzen mit PIPs (BLE 2021).

Tabelle 1: Überblick über als relevant angesehene Entwicklungen im Pflanzenschutz ohne Digitalisierung

Kategorie	Ansatz	Entwicklung	Beispiele für neue Entwicklungen
Chemisch	Neue synthetische Pflanzenschutzmittel	Verkleinerung der Wirkstoffpalette erwartet, weniger neue Wirkstoffe, eher neue Formulierungen	Nanopestizide
Biologisch	Biopestizide	Zunahme von Wirkstoffen erwartet als Alternative zu chem. Pflanzenschutz	RNAi, Bt-Toxine oder andere Protein-basierte Biopestizide
Physikalisch	Beikrautbekämpfung	Alternativen zu mechanischen Verfahren (Bodenbehandlung)	Strom, Laser, UV- Licht, mechanisch
Vorbeugung	Sortenwahl	Neue Sorten mit Resistenzen und Abwehrmechanismen durch gentechnische Verfahren	GMPs mit PIPs oder durch CRISPR/Cas-Technik

Quelle: Eigene Darstellung Fraunhofer IME und RLP AgroScience

Eine stärkere **Digitalisierung** der Landwirtschaft durch Sensorik, Robotik und der Verarbeitung großer Datenmengen (*Big data*) wird alle Bereiche des Pflanzenschutzes betreffen (Tabelle 2). Fortschritte in Sensorik und Robotik erlauben eine gezieltere Applikation von chemischen und

biologischen Pflanzenschutzmitteln (*Precision Farming*) für die Behandlung von Reihen, Teilflächen oder einzelnen Pflanzen und somit eine Verringerung der Aufwandmengen je Fläche. Der Einbezug von Landschaftsdaten, die Analyse großer Datenmengen und die Vernetzung von Datenbanken und Maschinen kann helfen, Einträge in gefährdete Nichtzielflächen wie Saumbiotope und Gewässer zu verhindern. Zum Beispiel werden im *Pesticide Application Manager* (PAM) Gelände-, Maschinen-, Hersteller- und Behördendaten in einem Software-System zusammengeführt, das eine Entscheidungshilfe im Sinn eines optimalen Pflanzenschutzmitteleinsatzes zur Planung und Ausführung der jeweiligen Maßnahme liefert (ZEPP 2021). PAM berücksichtigt Abstandsauflagen und hangneigungsbezogene Auflagen bei der Anwendung bis hin zu automatischem An- und Abschalten der Spritze. Ein ähnliches System, NatShield, beschreiben Böhrnsen (2015) und Deter (2017). Drohnen können die gezielte Ausbringung von Pflanzenschutzmitteln, aber auch von Nützlingen erleichtern (BayWa AG (2021)). Im gleichen Maße wird auch die gezieltere Anwendung physikalischer Methoden ermöglicht, im besten Fall bis hin zur artspezifischen Entfernung von Beikrautpflanzen und die Bekämpfung bestimmter Schädlinge wie z. B. Nacktschnecken (Höing 2020). Bessere Erfassung von Umweltfaktoren und Schädlingsbefall in Verbindung mit genaueren Prognosemodellen können einen gezielteren Einsatz von Pflanzenschutzmitteln, Nützlingen oder physikalischen Methoden unterstützen. Vorbeugende Maßnahmen können ebenfalls von einer stärkeren Digitalisierung der Landwirtschaft profitieren. *Precision Farming* umfasst nicht nur den gezielten Einsatz von Pflanzenschutzmitteln, sondern insgesamt die optimierte kleinräumige Versorgung der Nutzpflanzen, was sich in höherer Widerstandsfähigkeit gegenüber Stressoren inklusive Krankheiten und Schädlingen niederschlägt. Ebenso ist denkbar, dass im *Digital Farming* insbesondere durch Roboter auch kleinräumiger Anbau (*Spot Farming*) und Mischkulturen technisch und wirtschaftlich möglich werden, so dass Standortgegebenheiten und Synergien zwischen verschiedenen Pflanzen genutzt werden können (Wegener *et al.* 2019).

Tabelle 2: Überblick über als relevant angesehene Entwicklungen im Pflanzenschutz mit Hilfe von Digitalisierung (Sensorik, Robotik, Big Data, KI)

Kategorie	Ansatz	Entwicklung	Beispiele für neue Entwicklungen
Chemische und biologische Pflanzenschutzmittel	<i>Risk mitigation (emission reduction)</i>	Sensorik und Robotik zur Steuerung der Applikation, z. T. gekoppelt mit Felddaten	Automatische Düsenoperation je nach Wind
Chemische und biologische Pflanzenschutzmittel	<i>Precision Farming (input reduction)</i>	Sensorik und Robotik zur und automatisierten Applikation von Teilflächen bis hin zu Einzelpflanzen	Bandapplikation, Fahrinnenabschaltung, Spotapplikation, Stammapplikation
Chemische und biologische Pflanzenschutzmittel	Monitoring und Prognose (<i>input reduction</i>)	Bessere Modelle zur Vorhersage von Krankheits- und Schädlingsentwicklung	Optimierte Spritzzeiten und -häufigkeiten
Physikalisch	Mechanische Beikrautkontrolle, neue physikalische Kontrollmechanismen ohne Bodenbewegung	Sensorik und Robotik zur Differenzierung von Nutzpflanzen und Beikräutern zur gezielten Beikrautbehandlung	Hackroboter, Abtöten einzelner Pflanzen mit Laser Systemische Abtötung von Pflanzen mit Strom

Kategorie	Ansatz	Entwicklung	Beispiele für neue Entwicklungen
Vorsorgende Maßnahmen	<i>Precision Farming</i>	Sensorik, Robotik, Datenanalyse zur optimalen Versorgung der Nutzpflanze	Optimierte Nährstoff- und Wasserversorgung der Nutzpflanzen Dreieckssaat, Mischkulturen, <i>Spot farming</i>
Vorsorgende Maßnahmen	Landschaftsanalyse	Hotspot-Management z. B. für Drift oder Run-off-Einträge in Gewässer	GeoRisk: Landscape data analysis zur Hotspot-Identifikation
Vorsorgende Maßnahmen	Landschaftsanalyse und -management	Habitatoptimierung für Nützlings- und Diversitätsförderung	F.R.A.N.Z. (https://www.franz-projekt.de/) Eh da Projekt (http://www.hortipendium.de/Eh_da_Flächen) EFA- Projekt (http://efa-suedpfalz.de)
Kompensation	Landschaftsanalyse und -management	Flächenoptimierung für Diversitätserhöhung	F.R.A.N.Z., Eh da, EFA Projekte s.o.

Quelle: Eigene Darstellung Fraunhofer IME und RLP AgroScience

Analyse der Entwicklungen in Bezug auf die Umwelt

3. Wo liegen die Chancen und Risiken aus der Sicht eines ökologisch nachhaltigeren und umweltgerechten Pflanzenschutzes?

Zur Einschätzung von Chancen und Risiken neuer Entwicklungen hilft eine vereinfachte Kategorisierung, ob eher eine Verbesserung, Verschlechterung, oder keine Änderung der Umweltauswirkungen im Vergleich zum konventionellen chemischen Pflanzenschutz zu erwarten ist (Tabelle 3). Betrachtet wurden dabei Effekte auf Nichtzielorganismen im Feld und auf Nicht-Zielflächen (inkl. Gewässern) sowie vereinfacht Energie- und Ressourcenverbrauch.

Die **Entwicklung neuer Wirkstoffe** mit engerem Wirkspektrum und / oder geringerer Persistenz als Substitution älterer Stoffe sind unter Umweltgesichtspunkten zu begrüßen. Neue Formulierung von Pflanzenschutzmitteln z. B. mit Hilfe von Nanomaterialien, können eine verbesserte Aufnahme in die Pflanze zum Ziel haben und verringern damit die für die gewünschte Wirkung notwendige Aufwandmenge und somit auch die Aufwandmenge je Fläche und den Eintrag in Nichtzielflächen. Führt die Formulierung allerdings auch zu einer höheren Bioverfügbarkeit für Nichtzielorganismen oder zu langfristigerer Freisetzung des Wirkstoffs, sollten diese Eigenschaften der Formulierungsstoffe in der Bewertung berücksichtigt werden. Speziell für Nanoformen sind Anpassungen in der Risikobewertung notwendig, um deren spezifischen Eigenschaften angemessen beurteilen zu können (Quik *et al.* 2020).

Aufgrund ihrer höheren Spezifität und hohen biologischen Abbaubarkeit sind durch **Biopestizide** wie RNAi- oder Protein-basierte Mittel weniger Effekte auf Nicht-Zielorganismen zu erwarten als bei chemischen Mitteln. Ohne eine detaillierte Analyse wird bei der Herstellung und Anwendung von keinen relevanten Unterschieden in Bezug auf Energie- und Ressourcenverbrauch von neuen chemischen und biologischen Pflanzenschutzmitteln ausgegangen. Laut Noleppa & von Witzke (2013) hat der chemische Pflanzenschutz allerdings nur eine relative geringe Bedeutung im einstelligen Prozentbereich für den Energieverbrauch im Ackerbau. (Tuomisto *et al.* 2012) gehen im europäischen Pflanzenbau von ca. 5 % aus, im Vergleich zu durchschnittlich 37 % Energiebedarf für Mineraldünger.

Bei den **physikalischen Methoden** der Beikrautkontrolle kann dagegen je nach Methode ein hoher Energieverbrauch bei der Anwendung notwendig sein. Effekte auf Nicht-Zielflächen sind durch physikalische Verfahren nahezu auszuschließen, allerdings sind Effekte auf Nichtzielorganismen im Feld z. B. im Boden sehr stark von der angewandten Methode abhängig. Verfahren unter der Nutzung von Hitze oder Dampf betreffen die ganze Fläche und zumindest die obere Bodenschicht, andere können im besten Fall auf die einzelne Beikrautpflanze beschränkt werden, sei es mechanisch, mit Licht oder mit Strom. In der Regel ist dies aber nur durch hoch entwickelte Sensorik und Robotik möglich. Eine nächtliche Bestrahlung von Nutzpflanzen mit UV Licht als Ersatz für Fungizide ist schon auf dem Markt (Thorvald 2021). Die Behandlung bleibt auf die Kulturpflanzenreihen beschränkt und es gibt keine Belastung mit toxischen Substanzen. Zur möglichen Auswirkung auf nachtaktive Insekten liegen allerdings keine Informationen vor.

Vorbeugende Maßnahmen verringern die Notwendigkeit späterer Pflanzenschutzmaßnahmen und sind damit im Allgemeinen unter Umweltsichtspunkten positiv zu bewerten. Die Verwendung von resistenten Sorten inklusive von Pflanzen mit PIPs hat durch die Produktion von Wirkstoffen hoher Spezifität in der Nutzpflanze selbst geringere Umweltauswirkung als die Anwendung von Pflanzenschutzmitteln, da die Exposition von Nichtzielorganismen stark verringert wird. Auch in Bezug auf Energie- und Ressourceneffizienz fällt die Bilanz positiv aus, da keine (oder zumindest) weniger Pflanzenschutzmaßnahmen in der Kultur notwendig werden. Je nach Spezifität der gebildeten Toxine sind Effekte auf Nichtzielorganismen jedoch nicht komplett auszuschließen.

Die Auswirkung der **Digitalisierung** auf die Biodiversität im Feld und in Nichtzielflächen wird generell positiv gesehen. Effekte auf Nichtzielorganismen wären zu befürchten, wenn Digitalisierung zu vermehrtem Einsatz von Pflanzenschutzmitteln führen würde. Ein solches Szenario ist aber schwer vorstellbar. Im Gegenteil ist durch Digitalisierung eine Verringerung des Einsatzes von Pflanzenschutzmitteln aus mehreren Gründen zu erwarten: *Precision Farming* bei der Anwendung von Mitteln erlaubt genauere Applikation von Mitteln (Teilflächen- oder Einzelpflanzenbehandlung (Faupel *et al.* 2023) und die automatisierte Einhaltung von Risikominderungsmaßnahmen (ZEPP 2021, Böhrnsen 2015, Deter 2017). Ebenso würde die bessere Detektion oder Prognose von Schädlings- bzw. Krankheitsbefall gezieltere Maßnahmen ermöglichen. Alternativen zum chemischen Pflanzenschutz können durch Digitalisierung verbessert oder erst ermöglicht werden (z. B. Drohnen zur Ausbringung von Nützlingen (BayWa AG 2021), Hackroboter (Steketee 2020), Schneckenroboter (Höing 2020). Ebenso können vorbeugende Maßnahmen von der Digitalisierung profitieren. Bessere und umfangreichere Daten in Verbindung mit Modellen und KI-Anwendungen machen Wissen leichter verfügbar und können über Entscheidungshilfetools zu einer Verbesserung des Anbaus von widerstandsfähigeren Pflanzen führen und Maßnahmen zur Nützlingsförderung optimieren. Neue Anbausysteme wie Mischkulturen oder *Spot Farming* profitieren von den Möglichkeiten der Sensorik und Robotik und können schädlings- und krankheitsanfälliger große Schläge und Fruchtfolgen mit nur wenigen Kulturpflanzen ersetzen (Wegener *et al.* 2019, 2021). Führt eine Digitalisierung in der Landwirtschaft allgemein zu höherer Produktivität, können Flächen für die Förderung der Biodiversität frei werden. Andererseits könnte die Digitalisierung auch die Bewirtschaftung von weiteren Flächen rentabel machen.

In Bezug auf Ressourcen- und Energieverbrauch konnten keine tiefgreifende Analyse durchgeführt werden. Der zusätzliche Bedarf an z. B. seltenen Erden und anderen Rohstoffen und Energie für die Herstellung von digitalen Komponenten und Maschinen sollte im Verhältnis zum insgesamt hohen Verbrauch an solchen Rohstoffen gesetzt werden und mit dem möglichen Nutzen für die Umwelt abgewogen werden. Kleine, mobile, autonome Einheiten als Ersatz für schwere

dieselbetriebene Maschinen könnten die Energie- und CO₂ Bilanz verbessern, wobei auch Herstellung und Nutzungsdauer der Maschinen berücksichtigt werden sollten. Das Problem der Bodenverdichtung würde durch kleinere autonome Maschinen statt großer Schlepper deutlich verringert.

Tabelle 3: Überblick über Chancen und Risiken verschiedener Pflanzenschutzrends in Bezug auf den Umweltschutz in Relation zu konventionellem chemischem Pflanzenschutz

Kat.	Trend	Feld	NZF	En	Res	Chancen	Risiken
C	Nanopestizide	+/?	+/?	0	0	Bessere Aufnahme in die Pflanzen => geringere Aufwandmengen	<i>Slow release</i> , Bodenbelastung durch Nanomaterialien, z. B. Metalle
C+B	GMP mit Herbizidresistenz	-	-			-	Höherer Herbizideinsatz, Resistenzbildung
B	Protein und RNA Protein - basierte Biopestizide	+	+	0	0	Höhere Spezifität, höhere Abbaubarkeit	Je nach Spezifität Effekte auf Nichtzielorganismen
P	Beikrautkontrolle	+/?	+	0/-	0	Keine Exposition von NZF	Effekte im Feld z. B. auf Bodenfauna je nach Methode, teilweise hoher Energieverbrauch
P	Pilzkontrolle mit UV-Licht	+?	+?	?	?	Ersatz von Fungiziden	Effekte z. B. auf nachtaktive Insekten unklar
V	Resistente Pflanzen, Plant Incorporated Protectants (PIP)	+	+	+	+	Keine direkte Exposition von NZF und geringere Exposition von Nichtzielarten auf dem Feld, hohe Spezifität. Hohe Abbaubarkeit	Je nach Spezifität: Effekte auf nahverwandte Nicht-Zielorganismen
DF+ C/B	Gezieltere PSM Applikation im Rahmen von Precision Farming	+	+	+0	?	Reduzierung der Aufwandmengen möglich. Verringerung von Emissionen durch automatische Risikominderung, Autonome Systeme mit geringerem Energieverbrauch in der Anwendung	Ressourcen- und Energieverbrauch für neue Geräte, Entsorgung
DF+ P	Physikalische Beikrautkontrolle mit Precision Farming	+	+	+	?	Geringere Wirkungen auf Nichtzielorganismen., Erhöhung der Diversität, wenn Beikräuter unter Schadensschwelle geschont werden. Energieeinsparung	Effekte im Feld z. B. auf Bodenfauna je nach Methode, je nach Technik hoher Energieverbrauch
DF	<i>Precision Farming</i> generell (Sensorik, Robotik)	+	+	+	?	Erlaubt Alternativen zu großen Schlägen und Fruchtfolgen mit nur wenigen Kulturpflanzen und dadurch Erhöhung der Agrarbio-diversität. Verringerung von Pflanzenschutzmaßnahmen	Je nach Methode, Effekte auf Nicht-Ziel-Organismen. Rohstoffverbrauch bei Neuanschaffung

						durch höhere Widerstandsfähigkeit optimal versorgter Nutzpflanzen. Bei kleinen Maschinen weniger Bodenverdichtung, geringerer Energieaufwand	
DF	Big Data, KI, Landschaftsanalysen	+	+	?	?	Bessere Datenbasis für Entscheidungen. Optimierung des Pflanzenschutzes und der Bewirtschaftung insgesamt (z. B. Reduzierung des chem. PS, Düngung. Vermeidung von Fehlanwendungen, Unterstützung bei Kultur- und Sortenwahl, Management von Biodiversitätsmaßnahmen), Höhere Effizienz kann Flächen für Biodiversitätsförderung frei machen	Höhere Effizienz kann bisher nicht genutzte Flächen für Landwirtschaft rentabel machen. Energieverbrauch durch Cloud-Systeme, Rohstoffverbrauch für neue Geräte

C = chemische, B = biologische-biotechnologische, P = physikalische, V = vorbeugende Pflanzenschutzmaßnahme, DF = Digital Farming, Feld = Direkte Effekt auf Nichtzielorganismen im Feld, NZF = Direkte Effekte in Nichtzielflächen inkl. Gewässer, En = Energie und Klima, Res = Ressourcenverbrauch, + = positiver, - = negativer, 0 = geringer oder ? = unbekannter Einfluss auf Umweltverträglichkeit

Quelle: Eigene Darstellung. Fraunhofer IME und RLP AgroScience

4. Wer sind die Treiber, Stakeholder, Profiteure der Entwicklungen?

5. Was sind die entscheidenden Hemmnisse, die für eine weitere Entwicklung oder Implementierung überwunden werden müssen?

Treiber für neue **Entwicklungen chemischer Pflanzenschutzmittel** sind die Erschließung neuer Absatzmöglichkeiten für die Produzenten und der Bedarf der Landwirtschaft nach sicheren und effizienten Mitteln auch gegen neue Schädlinge und Krankheiten sowie als Ersatz für wegfallende Wirkstoffe und Mittel wegen Resistenzbildung oder nicht verlängerter Zulassung (Tabelle 4). Stakeholder in der Diskussion um chemische Pflanzenschutzmittel sind neben Produzenten, Vertrieb, Beratung, Maschinenherstellern und der Landwirtschaft als Anwendende der Produkte auch Entwickler und Anbieter alternativer Pflanzenschutzmaßnahmen. Die Politik setzt durch Zielvorgaben und Zulassungsbestimmungen den gesetzlichen Rahmen. Handelsketten, Verbraucher und Verbraucherinnen und NGOs nehmen durch die Nachfrage nach kostengünstigen und/oder „chemiefreien“ Lebensmitteln und umweltschonende Produktion Einfluss. Profiteure neuer Mittel sind, wenn sie sich auf dem Markt durchsetzen, die Hersteller. Die Landwirtschaft profitiert, indem ihr mehr Möglichkeiten zur Verfügung stehen und wenn die Produkte besser in Bezug auf Kosten, Wirkung und Anwendungssicherheit oder Umweltverträglichkeit sind. Verbraucher und Verbraucherinnen können von neuen Pflanzenschutzmitteln durch niedrige Lebensmittelpreise profitieren. Hemmnisse für die Neuentwicklung chemischer Mittel sind die hohen Entwicklungskosten und zumindest in der EU die kleiner werdenden Marktgrößen durch die Vorgabe den Einsatz chemischer Mittel in den nächsten Jahren deutlich zu senken

und den Ökolandbau auszubauen sowie die zunehmende Nachfrage nach „chemiefreien“ Lebensmitteln.

Entwicklungen im biologischen / biotechnischen Pflanzenschutz werden von der Suche nach Alternativen zu chemischen Mitteln und wirtschaftlichen Interessen der Entwickler und Hersteller getrieben. Stakeholder sind dieselben wie für chemische Pflanzenschutzmittel aufgelistet. Profiteure sind die Anbieter, wenn sich die Produkte oder Dienstleistungen auf dem Markt durchsetzen, und die Landwirtschaft, wenn ihr mehr ökonomisch und ökologisch sinnvolle Alternativen zum chemischen Pflanzenschutz zur Verfügung stehen. Neue effiziente biologische Pflanzenschutzmittel könnten die Erträge des Ökolandbaus erhöhen, dem chemische Pflanzenschutzmittel nicht zur Verfügung stehen. Verbraucher und Verbraucherinnen können durch ein größeres Angebot „chemiefreier“ Lebensmittel profitieren. Wirtschaftliche Hemmnisse ergeben sich insbesondere dadurch, dass eine höhere Spezifität der Wirkung auch die Marktgröße verringert. Im Extremfall wirkt ein Mittel nur auf einen Schädling. Unter Umweltgesichtspunkten ist dies zu begrüßen, aber dadurch sinkt die Gewinnmarge der Hersteller im Vergleich zu Mitteln, die bei gleichen Zulassungs- und Entwicklungskosten gegen mehrere Schädlinge wirken. Für kleine Anbieter und Start-ups kann der Aufwand für die Zulassung schwieriger zu stemmen sein als für größere Anbieter.

Treiber für die Weiter- oder **Neuentwicklung physikalischer Maßnahmen** sind wie für biologische Methoden der Bedarf nach Alternativen zum chemischen Pflanzenschutz und wirtschaftliche Interessen der Geräteentwickler und Dienstleister. Interessensgruppen und Profiteure sind ebenfalls die gleichen, auch wenn Anbieter und Dienstleister andere Firmen sein können. Physikalische Maßnahmen sind oft an spezielle Maschinen gebunden, während verschiedene chemische oder biologische Pflanzenschutzmittel auch mit demselben Gerät appliziert werden können. Investitionen für die Anwendung neuer physikalischer Maßnahmen sind daher höher als für neue Pflanzenschutzmittel, außer wenn die Maßnahme als Dienstleistung angeboten wird. Dass es für physikalische Maßnahmen keine systematische Umweltrisikobewertung wie bei Pflanzenschutzmitteln gibt, stellt an sich kein Hemmnis für ihre Weiterentwicklung dar, sollte aber im Sinne eines umweltverträglichen Pflanzenschutzes bei der Implementierung durch Empfehlungen oder Fördermaßnahmen berücksichtigt werden.

Vorbeugender Pflanzenschutz sollte im Integrierten Pflanzenschutz immer der Vorzug gegeben werden, da er die Wahrscheinlichkeit und Notwendigkeit späterer Maßnahmen verringert. Der wichtigste Treiber ist daher die Vermeidung späterer Maßnahmen, insbesondere der Druck den Einsatz chemischer Mittel zu verringern und wirtschaftliche Interessen z. B. von Anbietern resistenter Pflanzen oder von Geräten, die im vorbeugenden Pflanzenschutz eingesetzt werden. Stakeholder sind wiederum alle am Pflanzenschutz ökonomisch beteiligten Gruppen sowie Politik, Verbraucher und Verbraucherinnen und NGOs. Maßnahmen des vorbeugenden Pflanzenschutzes wie die Auflösung sehr enger Fruchtfolgen, kleinräumigere Felder, Mischkulturen und Nützlingsförderung haben direkten Einfluss auf die Agrarbiodiversität und die Struktur der Agrarlandschaft. Insofern kann die Öffentlichkeit nicht nur als Verbraucher und Verbraucherinnen von Lebensmitteln profitieren, sondern stark als „Verbraucher und Verbraucherinnen von Biodiversität“, im Sinne von Erholung in einer vielfältigeren Agrarlandschaft. Hemmnisse in der Weiterentwicklung vorbeugender Maßnahmen können in Bezug auf die Sortenwahl, die Langwierigkeit klassischer Züchtungsverfahren sein und die geringe Akzeptanz von gentechnisch veränderten Pflanzen. Wobei zum Teil die Einstufung verschiedener neuer Verfahren noch nicht

abschließend geklärt ist. Alternative Anbaumethoden, wie Mischkulturen oder *Spot Farming* verlangen andere Maschinen als zurzeit auf großen Schlägen und Fruchtfolgen mit nur wenigen Kulturpflanzen eingesetzt werden und damit Investitionen der Landwirtschaft, wenn Maschinen nicht gemietet oder direkt die Dienstleistung eingekauft wird. Es bleibt aber das Risiko, dass vorhandene Maschinen wahrscheinlich weniger genutzt werden können. Fehlende finanzielle Anreizsysteme für vorbeugende Maßnahmen stellen ein weiteres Hemmnis dar.

Die weitere **Digitalisierung der Landwirtschaft** wird nach De Witte *et al.* (2016) durch folgende Trends angetrieben: Allgemein fortschreitende Digitalisierung, Kostensenkung durch technischen Fortschritt im Bereich der Sensortechnik und Datenverarbeitung in anderen Industriezweigen, Erschließung neuer Märkte über neue Produkte und Dienstleistungen für IT-Firmen, steigender gesellschaftlicher Anforderungen an die landwirtschaftliche Produktion und Verschärfung der rechtlichen Rahmenbedingungen, Arbeitskräftemangel und letztendlich die Aussicht auf eine Steigerung der Produktivität der Landwirtschaft. Zusätzlich zu den schon genannten Stakeholdern im Pflanzenschutz kommen Anbietende von IT Lösungen und Cloud-Anbietende ins Spiel, die damit auch Profiteure der Entwicklung sind. Weitere Profiteure der Digitalisierung kann die Landwirtschaft durch die bessere Nutzung der Betriebsmittel sein. Welche Auswirkung die Digitalisierung auf den Strukturwandel in der Landwirtschaft hat, lässt sich kaum prognostizieren (De Witte *et al.* 2016) und wird hier auch nicht weiter betrachtet. Unter Umweltgesichtspunkten kann die Gesellschaft profitieren, da durch Digitalisierung eine nachhaltigere Produktion möglich wird. Viele Alternativen zum chemischen Pflanzenschutz sind heute ohne Digitalisierung kaum denkbar und auch alternative Anbaumethoden mit Hilfe von Sensorik, Robotik und Big Data können profitabler werden. Hemmnisse für weitere Digitalisierung im Pflanzenschutz und Landwirtschaft allgemein bilden Investitionskosten in neue Geräte und Vorbehalte in Bezug auf Datenhoheit, Datensicherheit und Datenschutz. Für manche Lösungen ist vermutlich auch die technische Infrastruktur, d.h. Internet- und Mobilfunkanbindung, noch nicht überall gegeben. Manche Möglichkeiten des *Precision Farming*, wie z. B. Teilflächenapplikation, sind in der Zulassung von Pflanzenschutzmitteln noch nicht berücksichtigt, so dass die Landwirtschaft noch nicht voll profitieren kann.

Tabelle 4: Treiber, Stakeholder, Profiteure von Entwicklungen im Pflanzenschutz sowie Hemmnisse für weitere Entwicklungen und Implementierung

Maßnahmen	Treiber	Stakeholder	Profiteure	Hemmnisse
Chemisch	Erschließung neuer Märkte, Bedarf nach effizienten Mitteln auch gegen neue Schädlinge und Krankheiten, Resistenzmanagement, Ersatz für wegfallende Wirkstoffe	Produzenten, Handel, Maschinenhersteller, Landwirtschaft, Politik / Regulation, Handelsketten, Verbrauchergruppen / NGOs, Auftragslabors, Consulting, Wissenschaft	Produzenten und nachgeordnete Kette, Landwirtschaft, Verbrauchergruppen (Lebensmittelpreise), Umwelt (Höhere Effizienz je Fläche), Auftragslabors, Consultants	Entwicklungs- und Zulassungskosten, Öffentliche Akzeptanz, Sinkende Marktgröße (in EU)
Biologisch	Reduktion von chem. PSM und Verlangen nach "chemiefreien" Lebensmitteln, Bedarf nach Pflanzenschutz im Ökolandbau, Marktchance für kleinere Unternehmen, Neuer Markt für Produzenten von chem. PSM	Entwickler, Produzenten, Landwirtschaft, Politik / Regulation, Verbrauchergruppen, Handelsketten, NGOs, Auftragslabors, Consulting, Wissenschaft	Entwickler & Produzenten, (Öko-) Landwirtschaft, Verbrauchergruppen, Auftragslabors, Consultants	Kleine Märkte für spezifische Mittel, Zulassungsverfahren z. T. zu unflexibel PIP: Geringe Akzeptanz von GMP in der Öffentlichkeit, keine Zulassung von GMP in den meisten EU-Ländern
Physikalisch	s. biologisch	Entwickler / Maschinenhersteller, Landwirtschaft, Politik / Regulation, Handelsketten, Verbrauchergruppen, NGOs, Wissenschaft	Maschinenhersteller, Dienstleister (Öko-)Landwirtschaft, Verbrauchergruppen	Maschinengebunden und daher relative hohe Investitionen falls nicht als Dienstleistung angeboten, Keine systematische Bewertung der Auswirkung auf Nichtzielorganismen
Vorbeugend	Basis des Integrierten Pflanzenschutzes, Vermeidung späterer Maßnahmen, Notwendigkeit der Reduktion des chemischen Pflanzenschutzes durch politische Vorgaben	Entwickler, Produzenten, Maschinenhersteller, Saatgutproduzenten, Landwirtschaft, Politik / Regulation, Handelsketten, Verbrauchergruppen, NGOs, Wissenschaft	Maschinenhersteller, Saatgutproduzenten, Landwirtschaft, Verbrauchergruppen, Öffentlichkeit	Langwierige klassische Züchtung, Akzeptanz / Zulassung von GMP, Alternative Anbaumethoden verlangen neue Maschinen und damit hohe Investitionen, fehlende Anreizsysteme für vorbeugende Maßnahme
Digitalisierung	Fortschreitende Digitalisierung allgemein, Kostensenkung durch technischen Fortschritt in anderen Industriezweigen, Erschließung neuer Märkte, Steigende gesellschaftliche Anforderungen an	Alle oben genannten Gruppen plus IT Branche	Entwickler, Anbieter und Nutzer (Landwirtschaft) digitaler Lösungen, Verbrauchergruppen, Gesellschaft	Technische Infrastruktur, Investitionsbedarf, Nicht-Berücksichtigung technischer Möglichkeiten in der PSM Regulation,

Maßnahmen	Treiber	Stakeholder	Profiteure	Hemmnisse
	landwirtschaftliche Produktion und Verschärfung der rechtlichen Rahmenbedingungen, Steigerung der Produktivität, Fachkräftemangel			Datenhoheit, Datensicherheit, Datenschutz

Quelle: Eigene Darstellung. Fraunhofer IME und RLP AgroScience

6. Welche Vernetzung gibt es mit weiteren Entwicklungen im Pflanzenschutz? Wie stark sind diese Entwicklungen gekoppelt?

Alle Pflanzenschutzmaßnahmen sind im integrierten Pflanzenschutz insofern gekoppelt, weil eine klare Priorisierung von Vorbeugung vor physikalischen / biologischen / biotechnischen und letztendlich chemischen Maßnahmen vorgegeben ist. Weiterhin können sich verschiedene Verfahren ergänzen: Biopestizide können in Nanoformulierungen eingesetzt werden, RNAi Insektizide können die Wirkung von chemischen Insektiziden verstärken. Die wichtigsten Kopplungen ergeben sich mit den Möglichkeiten der Digitalisierung (Sensorik, Robotik, *Big Data* und *KI*), zur Effizienzsteigerung verschiedener Pflanzenschutzmaßnahmen und der Möglichkeit, große Schläge und Fruchtfolgen mit nur wenigen Kulturpflanzen durch kleinräumigere und diversere Anbauarten abzulösen.

Bewertung und Empfehlungen

7. Welche drei Entwicklungen werden als am wenigsten ökologisch nachhaltig eingeschätzt und sollten daher als prioritäre Handlungsfelder für das Umweltressort betrachtet werden und wie begründet sich die Entscheidung?

Die analysierten Entwicklungen im Pflanzenschutz werden unter Umweltaspekten als weniger bedenklich im Vergleich zur aktuellen Situation eingeschätzt, sofern sie nach Guter Landwirtschaftlicher Praxis im Integrierten Pflanzenschutz umgesetzt werden. Eine Ausnahme bildet der **Einsatz von Pflanzen mit Herbizidresistenzen** und dem damit vereinfachten Einsatz von Breitbandpestiziden in der Fläche. Dies wird aber zumindest für Deutschland und die meisten Mitgliedsländer der EU als nicht relevant betrachtet.

Physikalische Maßnahmen zur Beikrautkontrolle stellen eine vielversprechende Alternative zu Herbiziden dar. Die Verfahren unterscheiden sich in Bezug auf die verwendete Technik und damit auf den Energiebedarf und auf die Selektivität indirekter Effekte auf die Nahrungskette im Feld. Z. B. durch den Wegfall an Nahrungspflanzen für Insekten und Vögel, sind aber dieselben wie bei einer Herbizidbehandlung mit derselben Selektivität und Effizienz. Daher ist auch eine physikalische Beikrautregulierung als umso umweltschonender zu bewerten, je selektiver unerwünschte Beikräuter behandelt werden können, je besser der Boden im Gesamtprozess geschützt wird und je geringer der Energieverbrauch durch die Maßnahme ist. Ein Beispiel für als nicht nachhaltig eingeschätzte physikalische Maßnahmen stellt das Behandeln der Flächen mit Heißwasser bzw. das im ökologischen Landbau verbreitete Abflämmen dar. In jedem Fall sollte auch bei physikalischen Verfahren nicht nur die Effizienz, sondern auch der Energieverbrauch und unerwünschte Effekte auf Nichtzielorganismen betrachtet werden. **Nichtselektive physikalische Maßnahmen** sind daher in Bezug auf die Effekte im Feld eher kritisch zu betrachten.

Bei **Nanopestiziden** besteht noch Unsicherheit, ob ihr Umweltrisiko in den aktuellen Bewertungsverfahren ausreichend sicher beurteilt werden kann. Quik *et al.* (2020) empfehlen daher Anpassungen um Verbleib in der Umwelt und Effekte dieser Substanzen besser abschätzen zu

können. Nanopestizide können daher nicht generell als eine wenig nachhaltige Entwicklung eingestuft werden.

8. Welche Entwicklungen werden als am vielversprechendsten eingeschätzt, um einen wesentlichen Beitrag für einen verbesserten Schutz der Umwelt zu leisten und wie begründet sich die Entscheidung?

Alle analysierten Beispiele für neue Entwicklungen im Pflanzenschutz führen wahrscheinlich eher zur Reduzierung der unerwünschten Effekte von Pflanzenschutzmitteln in der Umwelt. Die folgenden vier Entwicklungen halten wir für die vielversprechendsten:

1. Alle Ansätze, die es erlauben, eine höhere Agrarbiodiversität zu erreichen, indem große Schläge und Fruchtfolgen mit nur wenigen Kulturpflanzen durch andere kleinräumigere Anbauformen abgelöst werden
2. Durch innovative Techniken generierte neue Nutzpflanzensorten mit Resistenzen oder Abwehrmechanismen
3. Alternativen zu chemischen Pflanzenschutzmitteln wie z. B. Biopestizide als Insektizide und Fungizide und Verfahren der physikalischen Beikrautkontrolle
4. Gezieltere Anwendung von Pflanzenschutzmitteln durch Kombination verschiedener neuer Techniken und Technologien, insbesondere *Digital Farming*

Wir haben die Entwicklungen hier im Sinne des Integrierten Pflanzenschutzes geordnet, d. h. zunächst vorbeugende Maßnahmen, gefolgt von Alternativen zu chemischen Maßnahmen und zuletzt die verbesserte Anwendung chemischer Mittel.

Neben dem Einsatz von Pflanzenschutzmitteln gilt die strukturelle Verarmung durch große Schläge und Fruchtfolgen mit nur wenigen Kulturpflanzen in vielen Gebieten als wichtige Ursache für einen Rückgang der Biodiversität in der Agrarlandschaft (Nationale Akademie der Wissenschaften 2020). Im Hinblick darauf werden alle Maßnahmen, die direkt zu **Erhöhung der Agrarbiodiversität** (Vielfalt der Nutzpflanzen und -tiere) der Strukturvielfalt und damit auch der gesamten Biodiversität in der Agrarlandschaft beitragen, an erste Stelle gesetzt. Dies umfasst kleinere Schläge, Mischkulturen (Rueg 2021) oder kleinräumiger standortbezogener Anbau *Spot Farming* (Wegener *et al.* 2019, 2021). Solche Kulturen sowie abwechslungsreiche Fruchtfolgen bilden wichtige Faktoren eines vorbeugenden Pflanzenschutzes, da dadurch für die Ausbreitung von Krankheiten und Schädlingen schlechtere Bedingungen als auf großen Schlägen und Fruchtfolgen mit nur wenigen Kulturpflanzen n und bessere Möglichkeiten für Nützlinge geschaffen werden. In der Praxis sind sie jedoch noch die Ausnahmen, da die vorhandene Technik oft dafür nicht ausgelegt ist. Neue Technik wie kleine autonome Einheiten mit hochentwickelter Sensorik können hier die Bearbeitung auch ökonomisch lohnend machen (Wegener *et al.* 2019).

Als vorbeugende Maßnahme sind **resistente Nutzpflanzen** ökologisch eine gute Wahl, da sie im Idealfall spätere Maßnahmen überflüssig machen. Sorten mit Resistenzen gegenüber den wichtigsten Krankheiten oder Schädlingen wären daher wünschenswert und haben sich in der Praxis auch schon bewährt. Sorten mit höherer Toleranz gegenüber abiotischen Stressoren (Hitze, Trockenheit, usw.) können indirekt auch gegen Krankheiten und Schädlingsbefall schützen, indem sie die Widerstandsfähigkeit der Nutzpflanzen erhöhen. Neue Verfahren wie CRISPR erlauben eine schnellere und gezieltere Entwicklung als mit klassischen Züchtungsverfahren. Das Risiko ökologischer Nebenwirkungen durch von der Pflanze selbst produzierter Abwehrstoffe (PIPs) ist mit hoher Wahrscheinlichkeit geringer als beim Einsatz von chemischen Pflanzenschutzmitteln, da zum einen die gebildeten Toxine oft ein engeres Wirkspektrum haben und zum anderen als biologische Moleküle eine geringe Persistenz aufweisen.

Bei **physikalischen Maßnahmen** in Kombination mit pflanzenbaulichen Maßnahmen und *Digital Farming* wird großes Potential gesehen Herbizide oft ersetzen können. Bei Fungiziden und Insektiziden bieten spezifische und in der Umwelt schnell abbaubare Biopestizide Alternativen zu chemischen Mitteln. In einigen Fällen können auch physikalische Verfahren helfen, den Einsatz chemischer Pflanzenschutzmittel gegen Pilze oder tierische Schädlinge zu verringern.

Neben dem Ersatz von chemischen Pflanzenschutzmitteln durch andere Maßnahmen kann eine präzisere Anwendung von Mitteln wesentlich dazu beitragen das Ziel einer Halbierung des Einsatzes von chemischen Mitteln in der EU (Europäische Kommission 2020) zu erreichen.

9. Welche Voraussetzungen und Anforderungen gibt es für eine erfolgreiche Umsetzung umweltgerechter Neuerungen im Pflanzenschutz? Bestehen sie schon, oder müssen sie noch geschaffen werden?

Eine Abkehr von großen Schlägen und Fruchtfolgen mit nur wenigen Kulturpflanzen wäre für viele hochspezialisierte Betriebe eine grundlegende Umstellung ihrer Arbeitsweise. Das *Spot-Farming* Konzept von Wegener *et al.* (2019) beruht auf der Vision einer vollständigen Bewirtschaftung mit autonomen Robotern auf der Ebene der einzelnen Pflanzen. Technische Voraussetzung für die Umsetzung ist also die Entwicklung solcher Roboter und später ihre Verfügbarkeit für die Landwirtschaft zu wirtschaftlichen Kosten, sei es für Investitionen oder für eine Miete oder Dienstleistung. Robotersysteme sind zwar schon auf dem Markt, aber eher für heute übliche Kulturformen. Eine große Herausforderung stellt daher noch die Ableitung und Erprobung des Maschinenkonzepts dar (D. von Hörsten, JKI in Ökologisch Erfolgreich 2021). Auch die rechtlichen Rahmenbedingungen rund um das autonome Arbeiten müssten noch geregelt und die Energie- und Datenversorgung für die autonomen Kleinmaschinen müsse sichergestellt sein (Wegener *et al.* 2019). Letztendlich müsste die Landwirtschaft von solchen neuen Anbaumethoden überzeugt werden. Wegener *et al.* (2019) kommen aber in ihrer Bewertung zu dem Schluss, dass nach pflanzenbaulichen, technischen und ökonomischen Gesichtspunkten, eine „nachhaltige Intensivierung“ der Landwirtschaft erreicht werden kann.

Resistente Pflanzensorten sind mit neuen Verfahren wie CRISPR/Cas gezielter und schneller zu entwickeln als mit klassischer Züchtung und werden außerhalb Europas auch angewendet werden, wie die Erfahrung mit transgenen Mais-, Soja- und Baumwollsorten zeigt. Die Einstufung durch bestimmte Verfahren erzeugter Sorten ist nicht abschließend geklärt. Ein prinzipieller Verzicht auf die Möglichkeiten von PIPs aufgrund einer prinzipiellen Ablehnung von Gentechnik wäre aus Umweltgesichtspunkten zu bedauern. Eine sachliche Beurteilung der Vor- und Nachteile der Pflanzen wäre wünschenswert. Über die normale Bewertung der Risiken eines einzelnen Pflanzenschutzmittels bzw. einer transgenen Pflanze hinaus könnten vergleichende Kosten-Nutzenanalysen verschiedener Pflanzenschutzmaßnahmen für die Diskussion hilfreich sein.

Biopestizide werden in der Zulassung wie chemische Pflanzenschutzmittel behandelt. Das komplexe Verfahren ist für kleinere Firmen, die Biopestizide entwickeln, schwerer zu bewältigen und zu finanzieren als für große Entwickler von chemischen Pflanzenschutzmitteln. Um den Einsatz von Biopestiziden zu fördern, könnte geprüft werden, ob und wie das Zulassungsverfahren für solche Pflanzenschutzmittel vereinfacht und angepasst werden kann, ohne die Sicherheit in der Zulassung zu verringern. Im Rahmen der Überarbeitung der EU Verordnung Nr. 283/2013 vom 24.11.2022 ist dies bereits geschehen (<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/?uri=celex%3A32022R1439R%2801%29>).

Verschiedene Arten der physikalischen Beikrautregulierung scheinen marktreif zu werden und das Potential zu haben, Herbizide in vielen Fällen ersetzen zu können (z.B. Stekettee, Zasso, Crop.Zone). Eine Zulassungspflicht besteht nicht und systematische Studien zur Beurteilung der Effekte z. B. auf Bodenorganismen fehlen (M. Eberius, Crop.Zone, pers. Mitt. 2020). Die fehlende

öko- „toxikologische“ Bewertung ist ein relevanter, offener Punkt, falls die Verfahren als Herbizid-Alternativen in größerem Maßstab eingesetzt werden sollen. UV-Licht als Alternative zu Fungiziden erscheint unter Umweltgesichtspunkten zu begrüßen zu sein, es wäre aber wünschenswert, wenn auch eine Einschätzung der Gefährdung von nachtaktiven Insekten vorgenommen würde. Im Sinne eines umweltschonenden Pflanzenschutzes sollten derartige neue Risiken durch die neuen Verfahren frühzeitig adressiert werden, beispielsweise durch eine vergleichende Untersuchung der Effekte auf Nichtzielorganismen, um umweltverträglichere von weniger schonenden Verfahren unterschieden zu können.

Die technischen Voraussetzungen für die gezielte Applikation von PSM sind prinzipiell schon gegeben, wie Beispiele in Abschnitt 2.5 gezeigt haben. Weitere Entwicklungen, insbesondere bei der Erkennung von Zielorganismen, und Marktreifen sind wahrscheinlich. Vor Ort müssen jedoch auch die technischen Voraussetzungen erfüllt sein, da eine Abdeckung des ländlichen Raumes mit ausreichend schnellem Internet und Mobilfunk noch nicht flächendeckend gegeben ist. Dies betrifft nicht nur die Bereitstellung und Erzeugung von Daten für eine gezieltere Applikation von Pflanzenschutzmitteln, sondern alle Bereiche des *Digital Farming*.

Für verbreitete Anwendung von „digitalisierter Pflanzenschutzmittelapplikation“ in der Praxis ist aber auch eine Berücksichtigung in der Zulassung bzw. den Anwendungsbestimmungen notwendig, damit Landwirte in der Anwendung einen Vorteil sehen und in die Techniken investieren. Zurzeit geht die Risikoabschätzung und die Festlegung von Risikominderungsmaßnahmen von einer gleichmäßigen Behandlung des ganzen Felds unter *Realistic worst case* Bedingungen aus. *Precision Farming* reduziert die Aufwandmenge je Kulturfläche, ist aber bisher im Zulassungsverfahren nicht berücksichtigt (Faupel *et al.* 2023). Ebenso könnte Technik zur automatisierten situationsbedingten Risikominderung (Applikation in Abhängigkeit von u.a. Geländegegebenheiten und Wind) berücksichtigt werden.

Fazit

Aus Sicht der Gutachter bietet die Digitalisierung die Möglichkeit, die Prinzipien des Integrierten Pflanzenschutzes konsequenter umzusetzen und die Risiken von chemischen Pflanzenschutzmitteln durch präzisere Anwendung und alternative Maßnahmen deutlich zu reduzieren sowie im *Green Deal* der EU angestrebt. Um ökonomisch nachteilige Folgen der Umsetzung der *Farm to Fork*-Strategie für die EU und in Konsequenz eine höhere Umweltbelastung außerhalb der EU zu verhindern, besteht ein erhöhter Bedarf an Innovationen im Bereich der Pflanzenschutztechniken, wie z. B. Züchtung, Präzisionslandwirtschaft, Biostimulanzien und andere Techniken, und die Beseitigung rechtlicher Hürde z. B. für Züchtungstechniken (Bremmer *et al.* 2021). Durch die Fortschritte in Sensorik, Robotik, *Big Data* und KI scheint aber auch eine nachhaltige Intensivierung möglich, wenn der Ersatz von Fruchtfolgen mit nur wenigen Kulturpflanzen und großen Schlägen durch neue Anbauverfahren wieder zu mehr Strukturvielfalt und Biodiversität in Agrarlandschaft beiträgt (Wegener *et al.* 2019).

Summary

The aim of this report is to provide an overview of current developments in plant protection, to make an initial analysis of the opportunities and risks in terms of their environmental compatibility, and finally to derive recommendations on how these developments should be accompanied and influenced in regulatory terms. Special attention was paid to the expected increase in digitalization in agriculture.

The structure of the report is based on the pyramid of measures for integrated plant protection as used in the National Action Plan for Plant Protection (NAP, BMEL 2021a) and anchored as a guiding principle in the Plant Protection Act (BMJ 2020). Preventive measures such as site and variety selection, crop rotation, soil cultivation, fertilization and the promotion of beneficial organisms form the basis of plant protection. Physical and biological / biotechnological measures are used at the next stage. Chemical measures (i.e., the use of synthetic or natural substances) should be limited in Integrated Pest Management to what is necessary. This general principle is concretized by the Farm to Fork strategy in the EU's Green Deal, in which the use of and risk from chemical pesticides is to be reduced by 50% overall by 2030 (European Commission 2020). New developments in crop protection should therefore be considered in particular from the point of view of reducing chemical measures. *Digital farming* is considered a cross-cutting issue in this report and is therefore discussed in connection with the individual components of integrated pest management. The expert opinion is structured according to nine questions posed in the terms of reference:

Overview of current developments in crop protection

1. What are the current developments in crop protection?

2. How far advanced are the developments or how realistic or under which time horizon are the developments to be considered?

First, developments were considered that can also be implemented without further digitalisation (Table 5). In chemical crop protection, there will continue to be new active ingredients and formulations, although probably not to the same extent as before. Herbicides with new mechanisms of action, for example, have not been launched for about 20 years (Umetsu and Shirai 2020). The use of nanomaterials represented a relatively new development. As formulation adjuvants, they are intended to enhance uptake into the target organism or to prolong protection through slow release (DaBNaN 2021). Less frequently, nanomaterials have been used as active ingredients (Quik *et al.* 2020).

Overall, a trend away from chemical pesticides toward biopesticides is expected (Olson 2015, cited in Umetsu and Shirai (2020)). Biopesticides are plant protection products based on microorganisms or products of microorganisms, plants or animals. They are often characterized by high specificity related to target organisms and low persistence in the environment, so that in many cases the impact on non-target organisms can be reduced compared to chemical agents. A well-known example of protein-based agents are the B-t toxins of *Bacillus thuringiensis*. Different strains of *B. thuringiensis* produce toxins that are very specific for on different insects, and the discovery of new species-specific toxins remains possible. In addition to the Bt- proteins, several new biological substances are described in the literature as suitable new biopesticides, e.g., products of the fungus *Trichoderma harzianum*, which are reported to be effective against *Fusarium root rot* (Kirk & Schafer 2015) and *Pseudomonas chlororaphis*, which, like the Bt proteins, is effective against corn rootworm (Schellenberger *et al.* 2016).

These new protein-based agents are currently at a very early stage of development and their effectiveness has yet to be proven or analyzed in field studies. Another new development is RNA interference (RNAi)-based pesticides that can be used to target genes for silencing and thus down-regulate the formation of specific proteins. These target proteins are usually part of essential metabolic pathways of the target organism, so that it first stops feeding and then dies. The genetic material of the plant or target organism is not altered by the RNA agents, and the application is more like inoculation of the plant (Pflanzenforschung.de 2018). Examples are agents against the corn rootworm (*Diabrotica virgifera virgifera*, Baum *et al.* 2007) or the fungus *Fusarium graminearum* (Werner *et al.* 2020). The economic production of RNA is still a challenge, but according to Kogel (2019), first products are already on the market. Both protein- and RNA-based active ingredients can be applied like normal plant protection products, but can also be produced by transgenic plants themselves as so-called PIPs (Plant Incorporated Protectants).

Besides classical mechanical measures of soil cultivation, other physical methods of weed control are available today, e.g. with the help of electricity (electro physical methods), light or heat. Robots to control powdery mildew in strawberries and grapes with UV light have recently been introduced to the market (Thorvald 2021).

Variety selection has already been an important pillar of preventive crop protection. New methods of smart breeding and CRISPR/Cas techniques allow a more targeted and faster provision of plants with resistance to certain plant diseases or pests including the development of crops with PIPs (BLE 2021).

Table 5: Overview of developments in crop protection relevant without digitalisation

Category	Approach	Development	Examples of new developments
Chemical	New synthetic plant protection products	Reduction of the range of active ingredients, fewer new active ingredients, rather new formulations	Nanopesticides
Biological	Biopesticides	Increase in active substances expected as an alternative to chem. crop protection	RNAi, Bt-toxins or other protein-based biopesticides
Physical	Weed control	Alternatives to mechanical methods (soil treatment)	Electricity, laser, UV light, mechanical
Prevention	Variety selection	New varieties with resistances and defence mechanisms through genetic engineering techniques	GMPs with PIPs or through CRISPR/Cas-technology

Source: Own representation Fraunhofer IME und RLP AgroScience

Greater digitalisation of agriculture through sensor technology, robotics and the processing of large volumes of data (big data) will affect all areas of crop protection (Table 6). Advances in sensor technology and robotics allow a more targeted application of chemical and biological pesticides (precision farming) for the treatment of rows, subplots or individual plants and thus a reduction in the application rates per area. The inclusion of landscape data, the analysis of large amounts of data, and networking of databases and machines can help prevent inputs to vulnerable non-target areas such as fringing biotopes and water bodies. For example, the Pesticide Application Manager (PAM) combines terrain, machinery, manufacturer, and regulatory data into a software system that provides decision support in terms of optimal pesticide use for planning

and executing the particular action (ZEPP 2021). PAM considers spacing requirements and slope-related conditions during application, up to and including automatic switching on and off of the sprayer. A similar system, NatShield, is described by Böhrnsen (2015) and Deter (2017). Facilitate promotion of beneficial insects and biodiversity in general in agricultural landscapes. Drones can facilitate the application of beneficial insects (BayWa AG 2021). To the same extent, more targeted use of physical methods will also be made possible, in the best case up to species-specific removal of weeds and control of specific pests such as slugs (Höing 2020). Better detection of environmental factors and pest infestations, combined with more accurate forecasting models, can support more targeted use of pesticides, beneficial insects, or physical methods. Preventive measures can also benefit from greater digitization of agriculture. Precision farming involves not only the targeted use of crop protection products, but overall the optimized small-scale supply of crops, which translates into higher resistance to stressors including diseases and pests. It is also conceivable that small-scale cultivation (*spot farming*) and mixed crops will become technically and economically feasible in *digital farming*, particularly through robots, so that site conditions and synergies between different crops can be exploited (Wegener et al. 2019).

Table 6: Overview of developments considered relevant in crop protection with the help of digitalisation (sensor technology, robotics, Big Data, AI)

Category	Approach	Development	Examples of new developments
Chemical and biological plant protection products	Risk mitigation (emission reduction)	Sensors and robotics to control the application, partly coupled with field data	Automatic nozzle operation depending on wind
Chemical and biological plant protection products	<i>Precision Farming</i> (input reduction)	Sensor technology and robotics for and automated application of partial areas up to single plants	Band application, fairway shut-off, spot application, trunk application
Chemical and biological plant protection products	Monitoring and forecasting (input reduction)	Better models for predicting disease and pest development	Optimized spraying times and frequencies
Physical	Mechanical weed control, new physical control mechanisms without soil movement	Sensor technology and robotics for the differentiation of crops and weeds for targeted weed treatment.	Chopping robot, killing of individual plants with laser, systemic killing of plants with electricity
Precautionary measures	<i>Precision Farming</i>	Sensor technology, robotics, data analysis for optimal crop supply	Optimized nutrient and water supply for crops, triangular seeding, mixed crops, spot farming
Precautionary measures	Landscape analysis	Hotspot management, e.g. for drift or run-off inputs into waters	GeoRisk: Landscape data analysis for hotspot identification
Precautionary measures	Landscape analysis and -management	Habitat optimization for beneficial insect	F.R.A.N.Z. (https://www.franz-projekt.de), Eh-da project

Category	Approach	Development	Examples of new developments
		and diversity promotion	(http://www.hortipendium.de/Eh_da_Flaechen), EFA-project (http://efa-suedpfalz.de)
Compensation	Landscape analysis and -management	Space optimization for diversity increase	F.R.A.N.Z., Eh-da, EFA s. above

Source: Own representation Fraunhofer IME und RLP AgroScience

Analysis of developments in relation to the environment

3. What are the opportunities and risks from the perspective of more ecologically sustainable and environmentally sound crop protection?

In order to assess the opportunities and risks of new developments, a rough categorization was made as to whether an improvement, deterioration, or no change in environmental effects is to be expected compared to conventional chemical crop protection (Table 7). Effects on non-target organisms in the field and on non-target areas (incl. water bodies) as well as (roughly) energy and resource consumption were considered.

The development of **new active ingredients** with a narrower spectrum of activity and/or lower persistence as substitutes for older substances is to be welcomed from an environmental point of view. New formulations of plant protection products, e.g. with the aid of nanomaterials, can aim at improved uptake into the plant and thus reduce the application rate required for the desired effect and thus also the application rate per area and the input into non-target areas. However, if the formulation also leads to higher bioavailability for non-target organisms or to more long-term release of the active ingredient, these properties of the formulation materials should be considered in the evaluation. Especially for nanoforms, adjustments in the risk assessment are necessary to adequately assess their specific properties (Quik *et al.* 2020).

Due to their higher specificity and high biodegradability, **biopesticides** such as RNAi- or protein-based agents are expected to have fewer effects on non-target organisms than chemical agents. Without a detailed analysis, production and application are not assumed to differ much in terms of energy and resource consumption of new chemical and biological pesticides. According to Noleppa & von Witzke (2013), however, chemical pesticides have a relatively minor importance in the single-digit percentage range for energy consumption in arable farming. Tuomisto *et al.* (2012) assume about 5% in European crop production, compared to an average of 37% energy demand for mineral fertilizers.

In contrast, **physical methods** of weed control may require high energy consumption during application, depending on the method. Effects on non-target areas can be virtually eliminated by physical methods, but effects on non-target organisms in the field, e.g., in the soil, are highly dependent on the method used. Methods using heat or steam affect the whole area and at least the upper soil layer, others can at best limit the individual weed plant, be it mechanically, with light or with electricity. Generally, however, this is only possible with sophisticated sensor technology and robotics. Night time irradiation of crops with UV light as a substitute for fungicides is already on the market (Thorvald 2021). Treatment remains confined to crop rows and there is no exposure to toxic substances. However, no information is available on the possible impact on nocturnal insects.

Preventive measures reduce the need for later plant protection measures and are thus generally positive from an environmental point of view. The use of resistant varieties including plants with PIPs has less environmental impact than the application of pesticides due to the production

of high specificity active ingredients in the crop itself, as the exposure of non-target organisms is greatly reduced. The balance is also positive in terms of energy and resource efficiency, as no (or at least) fewer crop protection measures are required in the crop. However, depending on the specificity of the toxins formed, effects on non-target organisms cannot be completely ruled out.

The impact of **digitalisation** on biodiversity in the field and in non-target areas is generally viewed positively. Effects on non-target organisms would be feared if digitalisation led to increased use of plant protection products. However, such a scenario is difficult to imagine. On the contrary, digitalisation is expected to reduce the use of pesticides for several reasons: precision farming in the application of agents allows more accurate application of agents (subplot or single plant treatment (IEEAM 2022)) and automated compliance with risk mitigation measures (ZEPP 2021, Böhrnsen 2015, Deter 2017). Similarly, better detection or prediction of pest or disease infestations would enable more targeted interventions. Alternatives to chemical crop protection can be improved or made possible in the first place through digitalisation (e.g., drones for beneficial insect application (BayWa AG 2021)), chopping robots (Steketee 2020), slug robots (Höing 2020). Likewise, preventive measures can benefit from digitalisation. Better and more comprehensive data combined with models and AI applications make knowledge more readily available and, via decision support tools, can lead to improved cultivation of more resistant crops and optimize measures to promote beneficial insects. New cropping systems such as mixed cropping or spot farming benefit from the capabilities of sensors and robotics and can replace monocultures (large fields with a close crop rotation) that are more susceptible to pests and diseases (Wegener *et al.* 2019, 2021). If digitalisation in agriculture generally leads to higher productivity, land can be freed up to promote biodiversity. On the other hand, digitalisation could also make the cultivation of additional areas profitable.

No in-depth analysis could be carried out with regard to resource and energy consumption. The additional demand for e.g. rare earths and other raw materials and energy for the production of digital components and machines should be put in relation to the overall high consumption of such raw materials and weighed against the potential environmental benefits. Small, mobile, autonomous units to replace heavy diesel-powered machines could improve the energy and carbon footprint, while also considering the manufacture and useful life of the machines. The problem of soil compaction would be significantly reduced by smaller autonomous machines instead of large tractors.

Table 7: Overview of opportunities and risks of various crop protection trends in relation to environmental protection in relation to conventional chemical crop protection

Cat.	Trend	Fiel d	NT A	En	Res	Chances	Risks
C	Nanopesticides	+/?	+/?	0	0	Better absorption into the plants => lower application rate	<i>Slow release</i> , Soil contamination by nano-materials, e.g. metals
C+B	GMP with herbicide resistance	-	-			-	Higher use of herbicides, development of resistance
B	Protein and RNA Protein-based biopesticides	+	+	0	0	Higher specificity, higher degradability	
P	Weed control	+/?	+	0/-	0	No exposure of NTA	Effects in the field e.g. on soil fauna depending on method, partly high energy consumption.

P	Fungal disease control with UV light	+?	+?	?	?	Replacement of fungicides	Effects e.g. on nocturnal insects unclear
V	Resistant plants, <i>Plant Incorporated Protectants (PIP)</i>	+	+	+	+	Lower exposure of non-target species in the field, high specificity, high degradability	Depending on specificity, effects on closely related non-target organisms, 'pseudo-persistence'
DF+ C/B	More targeted PPP application in the context of <i>Precision Farming</i>	+	+	+0	?	Reduction of application rates possible, reduction of emissions through automatic risk reduction, autonomous systems with lower energy demand	Energy and resource demand for new equipment, disposal of old equipment
DF+ P	Physical weed control with <i>Precision Farming</i>	+	+	+	?	Reduced effects on non-target organisms Increase diversity when weeds below damage threshold are spared, energy savings	Energy and resource demand for new equipment, disposal of old equipment
DF	<i>Precision Farming</i> in general (sensor technology, robotics)	+	+	+	?	Allows alternatives to monocultures and thus, increase in agricultural biodiversity, reduction of crop protection measures due to higher resistance of optimally supplied crops, less soil compaction with small machines, lower energy consumption	Energy and resource demand for new equipment, disposal of old equipment
DF	<i>Big Data</i> , AI, landscape analysis	+	+	?	?	Better data for decision-making, optimization of crop protection and management overall (e.g. reduction of chem. PS, fertilization, avoidance of misapplication, crop and variety selection, management of biodiversity measures), higher efficiency can free up land for biodiversity enhancement	Higher efficiency can make previously unused land profitable for agriculture, energy consumption by cloud systems, raw material consumption for new equipment.

C = chemical, B = biological-biotechnological, P = physical, V = preventive plant protection measure, DF = Digital Farming, Field = Direct effect on non-target organisms in the field, NTA = Direct effects on non-target areas incl. water bodies, En = Energy und climate, Res = Resource consumption, + = positive, - = negative, 0 = lower or, ? = unknown influence on environmental compatibility

Source: Own representation Fraunhofer IME und RLP AgroScience

4. Who are the drivers, stakeholders, beneficiaries of the developments?

5. What are the key barriers that need to be overcome for further development or implementation?

The drivers for new developments in chemical crop protection products are the opening up of new sales opportunities for producers and the need in agriculture for safe and efficient products, also against new pests and diseases, and as replacements for active ingredients and products that are no longer available due to the development of resistance or non-renewal of approval (Table 8). Stakeholders in the discussion about chemical crop protection products are not only producers, distributors, consultants, machine manufacturers and farmers as users of the products, but also developers and suppliers of alternative crop protection measures. Politicians take advantage through targets and approval regulations, retail chains, consumers and NGOs through the demand for low-cost and/or chemical-free food and environmentally friendly production. Profiteers of new agents, if they succeed in the marketplace, are the manufacturers. Agriculture benefits by having more options and if the products are better in terms of cost, efficacy, and safety of use or environmental impact. Consumers can benefit from new crop protection products through low food prices. Barriers to the development of new chemical products are the high development costs and, at least in the EU, the shrinking market size due to the requirement to significantly reduce the use of chemical products in the coming years and to expand organic farming, as well as the increasing demand for "chemical-free" food.

Developments in biological / biotechnical crop protection are driven by the search for alternatives to chemical agents and economic interests of developers and manufacturers. Stakeholders are the same as listed for chemical pesticides. The beneficiaries are the suppliers, if the products or services become established on the market, and agriculture, if more economically and ecologically viable alternatives to chemical crop protection become available to it. New efficient biological pesticides could increase yields in organic farming, which lacks chemical pesticides. Consumers may benefit from a greater supply of chemical-free foods. Economic barriers arise especially for in that higher specificity of action also reduces market size. In extreme cases, an agent is only effective on one pest. From an environmental point of view, this is to be welcomed, but it reduces the profit margin compared to agents that are effective against several pests with the same approval and development costs. For small suppliers and start-ups, the cost of approval can be more difficult to manage than for larger suppliers.

Drivers for the further or new development of physical measures are, as for biological methods, the need for alternatives to chemical crop protection and economic interests of equipment developers and service providers. Stakeholders and profiteers are also the same, although suppliers and service providers may be different companies. Physical measures are often tied to specialized machinery, while different chemical or biological pesticides can also be applied with the same equipment. Investments for the application of new physical measures are therefore higher than for new plant protection products, unless the measure is offered as a service. The fact that there is no systematic environmental risk assessment for physical measures as there is for plant protection products is not in itself an obstacle to their further development, but should be considered in the sense of environmentally compatible plant protection during implementation through recommendations or promotional measures.

Preventive pest management should be the basis in Integrated Pest Management, as it reduces the likelihood and necessity of later measures. The most important driver is therefore the avoidance of later measures, especially the pressure to reduce the use of chemical agents and economic interests, e.g. of suppliers of resistant plants or of equipment used in preventive pest management. Stakeholders are in turn all groups economically involved in plant protection as

well as politicians, consumers and NGOs. Preventive crop protection measures, such as the replacement of large monocultures (large fields with a close crop rotation) by other cultivation methods, have a direct impact on agricultural biodiversity and the structure of the agricultural landscape. In this respect, the public can benefit not only as consumers of food, but strongly as "consumers of biodiversity", in the sense of recreation in a more diverse agricultural landscape. Obstacles in the further development of preventive measures can be with regard to the choice of varieties, the slowness of classical breeding procedures and the low acceptance of genetically modified plants. In some cases, the classification of various new methods has not yet been conclusively clarified. Alternative cultivation methods, such as mixed crops or spot farming, require different machinery than is currently used in monocultures (large fields with a close crop rotation) and thus investments by the agricultural sector, if machinery is not rented or the service is purchased directly. However, the risk remains that existing machinery is likely to be used less. Lack of incentive systems for preventive action is another barrier.

According to De Witte *et al.* (2016), the further digitalisation of agriculture is driven by the following trends: Generally advancing digitalisation, cost reduction through technical advances in sensor technology and data processing in other industries, opening up new markets via new products and services for IT companies, increasing societal demands on agricultural production and tightening of the legal framework, labour shortages, and ultimately the prospect of increasing agricultural productivity. In addition to the stakeholders in crop protection already mentioned, IT solution providers and cloud providers are coming into play, making them profiteers of the development as well. Other beneficiaries of digitalisation can be agriculture through better use of inputs. What impact digitalisation will have on structural change in agriculture is difficult to predict (De Witte *et al.* 2016) and will not be considered further here. From an environmental point of view, society can benefit because digitalisation makes more sustainable production possible. Many alternatives to chemical crop protection are hardly conceivable today without digitalisation, and alternative cultivation methods using sensors, robotics and Big Data can also become more profitable. Barriers to further digitalisation in crop protection and agriculture in general are investment costs in new equipment and reservations regarding data sovereignty, data security and data protection. For some solutions, the technical infrastructure, i.e. internet and mobile phone connections, is probably not yet available everywhere. Some possibilities of precision farming, such as sub-area application, are not yet included in the approval of plant protection products, so that agriculture cannot yet fully benefit.

Table 8: Drivers, stakeholders, beneficiaries of developments in crop protection and barriers to further developments and implementation.

Category	Drivers	Stakeholders	Profiteers	Obstacles
Chemical	Development of new markets, need for efficient agents also against new pests and diseases, resistance management, replacement for active ingredients that are no longer used.	Producers, trade, machine manufacturers, agriculture, politics / regulation, trade chains, consumers / NGOs, contract labs, consultants, scientific community	Producers and downstream chain, agriculture, consumers (food prices), environment (higher efficiency per area), contract labs, consultants I	Development and approval costs, Public acceptance, Decreasing market size (in EU)
Biological	Reduction of chem. PPP and demand for "chemical-free"	producers, agriculture, policy, regula-	Developers & producers, (organic) ag-	Small markets for specific products, approval procedures

Category	Drivers	Stakeholders	Profiteers	Obstacles
	food. Food, demand for plant protection in organic farming, market opportunity for smaller companies, new market for producers of chem. PPP	tion, consumers, retail chains, NGOs, contract labs, consultants, scientific community	riculture, consumers, contract labs, consultants	partly too inflexible PIP: Low public acceptance of GMP, no approval of GMP in most EU countries
Physical	see biological	Developers / machine manufacturers, agriculture, politics regulation, retail chains, consumers, NGOs, scientific community	Machine manufacturers, service providers (organic) agriculture, consumers	Machine-linked and therefore relatively high investment if not offered as a service, no systematic assessment of the impact on non-target organisms
Preventive	Basis of integrated pest management, avoidance of later measures, need for reduction of chemical PPP by political requirements.	Developers, producers, machinery manufacturers, seed producers, agriculture, policy / regulation, trade chains, consumers, NGOs, scientific community	machine producers, seed producers, agriculture, consumers, public	acceptance / approval of GMP, alternative cultivation methods require new machinery and thus high investments, lack of incentive systems for preventive measures
Digitalisation	Advancing digitalisation in general, cost reduction through technical progress in other industries, development of new markets, increasing social demands on agricultural production and tightening of legal framework conditions, increase in productivity, shortage of skilled workers	All of the above groups plus the IT sector	Developers, providers and users (agriculture) of digital solutions, consumers, society	Technical infrastructure, Investment needs, non-consideration of technical possibilities in PPP regulation, data sovereignty, data security, data protection

Source: Own representation Fraunhofer IME und RLP AgroScience

6. What are the links with other developments in crop protection? To what extent are these developments coupled?

All plant protection measures are coupled in integrated pest management in that there is a clear prioritization of prevention over physical / biological / biotechnical and ultimately chemical measures. Furthermore, different methods can complement each other: Biopesticides can be used in nano-formulations, RNAi insecticides can enhance the effect of chemical insecticides. The most important couplings arise with the possibilities of digitalisation (sensor technology, robot-

ics, *Big Data* and *AI*), to increase the efficiency of various crop protection measures and the possibility of replacing monocultures (large fields with a close crop rotation) with more small-scale and diverse cultivation methods.

Assessment and recommendations

7. Which three developments are judged to be the least environmentally sustainable and should therefore be considered priority areas for action for the Environment Department, and what is the rationale for this decision?

The analysed developments in crop protection are assessed as not questionable from an environmental point of view compared to the current situation, provided they are implemented according to Good Agricultural Practice in Integrated Pest Management. One exception is the use of plants with herbicide resistance and the resulting simplified use of broad-spectrum pesticides in the field. However, this is not considered relevant, at least for Germany and most EU member states.

Physical measures for weed control represent a promising alternative to herbicides. The methods differ in terms of the technology used and thus the energy requirements and in the selectivity of indirect effects on the food chain in the field. E.g. by eliminating food plants for insects and birds, but are the same as herbicide treatments with the same selectivity and efficiency. Therefore, the more selectively undesirable weeds can be treated, the better the soil is protected in the overall process, and the lower the energy consumption by the measure, the more environmentally friendly a physical weed control can be assessed. An example of physical measures that are assessed as unsustainable is the treatment of land with hot water or scorching, which is widespread in organic farming. In any case, not only efficiency but also energy consumption and undesirable effects on non-target organisms should be considered for physical methods as well. Non-selective physical measures should therefore be viewed rather critically in terms of effects in the field.

For nano-pesticides, there is still uncertainty as to whether their environmental risk can be assessed with sufficient certainty in current assessment procedures. Quik *et al.* (2020) therefore recommend adjustments to better assess environmental fate and effects of these substances. Nano-pesticides can therefore not generally be classified as an unsustainable development.

8. Which developments are considered most promising to make a significant contribution to improved environmental protection and what is the rationale for the decision?

All analysed examples of new developments in crop protection are more likely to reduce the undesirable effects of crop protection products in the environment. We consider the following four developments to be the most promising:

1. all approaches that allow achieving higher agricultural biodiversity by replacing large fields with a close crop rotation (monocultures) with other more small-scale cropping systems
2. new crop varieties with resistance or defence mechanisms generated by innovative techniques
3. alternatives to chemical pesticides such as biopesticides as insecticides and fungicides and physical weed control methods
4. more targeted use of pesticides by combining various new techniques and technologies, especially digital farming.

We have ordered the developments here in terms of integrated pest management, i.e., preventive measures first, followed by alternatives to chemical measures, and finally the improved use of chemical agents.

In addition to the use of pesticides, structural impoverishment caused by large monocultures (large fields with a close crop rotation) in many areas is considered an important cause of a decline in biodiversity in agricultural landscapes (National Academy of Sciences (2020)). In view of this, all measures that directly contribute to increasing agricultural biodiversity (diversity of crops and livestock) of structural diversity and thus overall diversity in the agricultural landscape are given first priority. This includes smaller plots, mixed crops (Rueg 2021) or small-scale site-specific cultivation spot farming (Wegener *et al.* 2019, 2021). Such crops, as well as diversified crop rotations, form important factors of preventive crop protection, as they create worse conditions for the spread of diseases and pests than in large fields with a close crop rotation (monocultures) and better opportunities for beneficial organisms. In practice, however, they are still the exceptions, as existing technology is often not designed for this. New technology such as small autonomous units with sophisticated sensor technology can also make cultivation economically worthwhile here (Wegener *et al.* 2019).

As a preventive measure, resistant crops are a good choice ecologically, as they ideally eliminate the need for later measures. Varieties with resistance to major diseases or pests would therefore be desirable and have already proven themselves in practice. Varieties with higher tolerance to abiotic stressors (heat, drought, etc.) can also indirectly protect against disease and pest infestation by increasing the resistance of crops. New techniques such as CRISPR allow faster and more targeted development than with classical breeding methods. The risk of ecological side effects from plant-produced repellents (PIPs) is very likely to be lower than with the use of chemical pesticides, firstly because the toxins formed often have a narrower spectrum of activity and secondly because, as biological molecules, they have low persistence.

Physical measures in combination with crop management measures and digital farming are seen to have great potential to often replace herbicides. For fungicides and insecticides, specific biopesticides that are rapidly degradable in the environment offer alternatives to chemical agents. In some cases, physical methods can also help reduce the use of chemical pesticides against fungi or animal pests.

In addition to replacing chemical pesticides with other measures, more precise application of agents can contribute significantly to achieving the goal of halving the use of chemical agents in the EU (European Commission 2020).

9. What are the conditions and requirements for successful implementation of environmentally sound innovations in plant protection? Do they already exist, or do they still need to be created?

A move away from large fields with a close crop rotation (monocultures) would be a fundamental change in the way many highly specialized farms operate. The spot-farming concept of Wegener *et al.* (2019) is based on the vision of complete management with autonomous robots at the level of individual plants. Thus, the technical prerequisite for implementation is the development of such robots and later their availability for farming at an economic cost, whether for investment or for a rental or service. Robotic systems are already on the market, but rather for crop types common today. Therefore, the derivation and testing of the machine concept is still a major challenge (von Hörsten, JKI in Ecologically Successful 2021). The legal framework around autonomous working would also still need to be regulated and the energy and data supply for the autonomous small machines would have to be ensured (Wegener *et al.* (2019)). Ultimately, agriculture would need to be convinced of such new farming methods. However, Wegener *et al.*

(2019) conclude in their assessment that according to crop management, technical and economic aspects, a "sustainable intensification" of agriculture can be achieved.

Resistant plant varieties can be developed more specifically and faster with new methods such as CRISPR/Cas than with classical breeding and will also be applied outside Europe, as experience with transgenic corn, soybean, and cotton varieties shows. The classification of varieties produced by certain methods has not been conclusively clarified. A principled renunciation of the possibilities of PIPs due to a principled rejection of genetic engineering would be regrettable from an environmental point of view. An objective assessment of the advantages and disadvantages of the plants would be desirable. Beyond the normal assessment of the risks of a single pesticide or transgenic plant, comparative cost-benefit analyses of different pest management measures could be helpful to the discussion.

Biopesticides are treated like chemical pesticides in the registration process. The complex process is more difficult for smaller companies developing biopesticides to manage and finance than for large developers of chemical pesticides. To encourage the use of biopesticides, consideration could be given to whether and how the approval process for biochemicals can be simplified and adapted without reducing the safety in the approval. This is already happening in the context of the revision of EU Regulation No. 283/2013 (M. Heß, personal communication 2022).

Several types of physical weed control seem to be becoming market-ready and have the potential to replace herbicides in many cases (e.g., Stekettee, Zasso, Crop.Zone). There is no registration requirement and systematic studies to assess effects, e.g. on soil organisms, are lacking (M. Eberius, Crop.Zone, pers. comm. 2020). The lack of eco-"toxicological" evaluation is a relevant open issue if the methods are to be used as herbicide alternatives on a larger scale. UV light as an alternative to fungicides appears to be welcome from an environmental point of view, but it would be desirable if an assessment of the risk to nocturnal insects were also made. In the interest of environmentally friendly plant protection, UBA could urge a comparative study of the effects on non-target organisms here, so that more environmentally friendly methods can be distinguished from less gentle ones.

The technical prerequisites for the targeted application of PPPs already exist in principle, as examples in section 2.5 have shown. Further developments, especially in the recognition of target organisms, and market maturation are likely. On site, however, the technical requirements must also be met, since coverage of rural areas with sufficiently fast Internet and mobile communications is not yet available nationwide. This applies not only to the provision and generation of data for more targeted application of crop protection products, but to all areas of digital farming.

For widespread use of "digitized pesticide application" in practice, however, consideration in the approval or application regulations is also necessary so that farmers see an advantage in the application and invest in the technologies. Currently, risk assessment and the determination of risk mitigation measures assume uniform treatment of the entire field under realistic worst-case conditions. Precision farming reduces application rates per crop area, but has not yet been considered in the approval process (Faupel *et al.* 2023). Likewise, technology for automated situational risk reduction (application depending on, among other things, terrain conditions and wind) could be considered.

Conclusion

From the point of view of the experts, digitalisation offers the opportunity to implement the principles of integrated pest management more consistently and to significantly reduce the risks of chemical pesticides through more precise application and alternative measures, as targeted in

the EU Green Deal. In order to avoid economically detrimental consequences of the implementation of the *Farm to Fork* strategy for the EU and consequently a higher environmental impact outside the EU, there is an increased need for innovation in crop protection techniques, such as biocontrol, breeding, precision agriculture, bio-stimulants and other techniques, and the removal of legal barriers e.g. for breeding techniques (Bremmer *et al.* 2021). However, advances in sensor technology, robotics, *Big Data* and *AI* seem to make sustainable intensification possible by a switch from monocultures (large fields with a close crop rotation) to cultivation methods contributing to more structural diversity and biodiversity in agricultural landscapes (Wegener *et al.* 2019).

1 Einleitung

Pflanzenschutz umfasst eine Vielfalt von Maßnahmen, um Schäden an Kulturpflanzen zu verhindern oder zumindest zu verringern und ist daher ein notwendiger Bestandteil einer leistungsfähigen und nachhaltigen Landwirtschaft (BMEL 2020). Insbesondere der chemische Pflanzenschutz steht dabei wegen seiner Risiken für die menschliche Gesundheit und die Umwelt verstärkt in der Kritik (z. B. Pestizidatlas, Maenel 2022) und die Europäische Union fordert in ihrer *Farm-to-Fork*-Strategie, den Einsatz von chemischen Pflanzenschutzmitteln bis 2030 zu halbieren (Europäische Kommission 2020). Eine aktuelle Folgenabschätzungsstudie kommt zu dem Schluss, dass alleine die Umsetzung der *Farm-to-Fork*-Ziele in Bezug auf den Pflanzenschutz durch sinkende Produktion und dadurch steigende Importe in die EU und sinkende Exporte aus der EU in ca. 2.6 Millionen Hektar Land außerhalb der EU die Landnutzung verändern wird (Bremmer *et al.* 2021). Um einen geringeren Einsatz chemischer Pflanzenschutzmittel in der EU nicht durch höhere Umweltbelastungen außerhalb der EU zu erkaufen, ist es daher entscheidend, dass es nicht zu den vorhergesagten Abnahmen der Produktivität kommt. Dies kann durch effizientere Anwendung von Pflanzenschutzmitteln und durch die verstärkte Anwendung alternativer Verfahren (biologisch, physikalisch, vorbeugend) geschehen. Insbesondere die fortschreitende Digitalisierung der Landwirtschaft (*Digital Farming*) durch den verstärkten Einsatz von Sensorik, Robotik, die Verarbeitung großer Datenmenge (*Big Data*) und künstlicher Intelligenz (KI) wird hier als Chance gesehen (BMEL 2021a). Zum einen erlaubt sie, Pflanzenschutzmittel gezielter einzusetzen und damit die verwendeten Mengen zu reduzieren. Zum anderen kann Digitalisierung aber auch alternative Pflanzenschutzmaßnahmen verbessern oder auch erst ermöglichen. Aber auch unabhängig von der Digitalisierung werden Pflanzenschutzmaßnahmen weiter erforscht und entwickelt. Stichworte sind Nanopestizide, Biopestizide RNA Interferenz, neue Sorten und verbesserte Anbauverfahren.

Das Ziel dieses Gutachtens ist die Identifizierung aktueller Entwicklungen im Pflanzenschutz, eine erste Analyse ihrer Chancen und Risiken in Bezug auf Umweltverträglichkeit, sowie die Ableitung von Handlungsempfehlungen für das UBA. Eine vertiefte Analyse erfolgt in einem umfangreicheren Folgeprojekt (GreenSurvey 2022). Im Einzelnen sollen im vorliegenden Gutachten die folgenden neun Fragen übersichtsartig beantwortet werden:

Bestandsaufnahme (Kapitel 2)

1. Welche Entwicklungen gibt es?
2. Wie weit fortgeschritten sind die Entwicklungen bzw. wie realistisch oder unter welchem Zeithorizont sind die Entwicklungen zu betrachten?

Analyse (Kapitel 3)

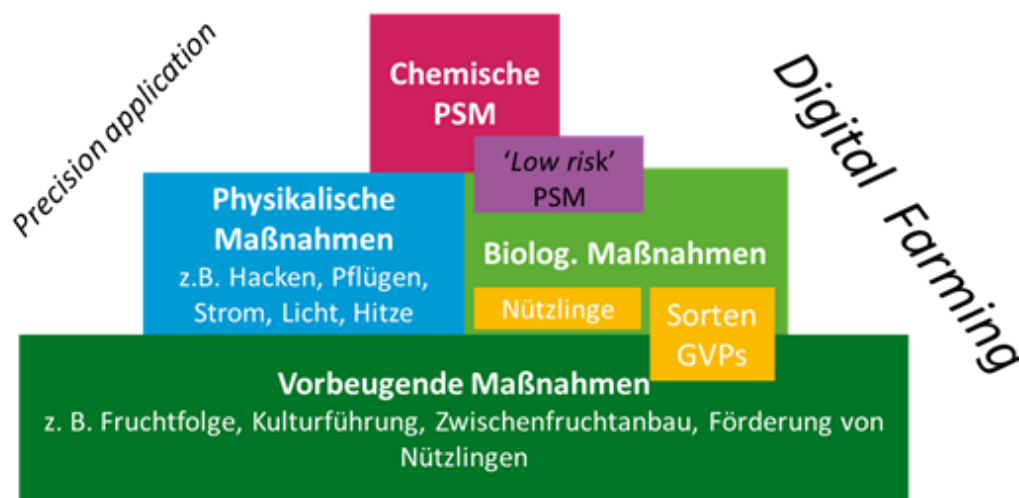
3. Wo liegen die Chancen und Risiken aus der Sicht eines ökologisch nachhaltigeren und umweltgerechten Pflanzenschutzes?
4. Wer sind die Treiber, Stakeholder, Profiteure der Entwicklungen?
5. Was sind die entscheidenden Hemmnisse, die für eine weitere Entwicklung oder Implementierung überwunden werden müssen?
6. Welche Vernetzung gibt es mit weiteren Entwicklungen im Pflanzenschutz? Wie stark sind diese Entwicklungen gekoppelt?

Empfehlungen (Kapitel 4)

7. Welche drei Entwicklungen werden als am wenigsten ökologisch nachhaltig eingeschätzt und sollten daher als prioritäre Handlungsfelder für das Umweltressort betrachtet werden und wie begründet sich die Entscheidung?
8. Welche Entwicklungen werden als am vielversprechendsten eingeschätzt, um einen wesentlichen Beitrag für einen verbesserten Schutz der Umwelt zu leisten (sogenannte Leuchttürme) und wie begründet sich die Entscheidung?
9. Welche Voraussetzungen und Anforderungen gibt es für eine erfolgreiche Umsetzung umweltgerechter Neuerungen im Pflanzenschutz? Bestehen sie schon, oder müssen sie noch geschaffen werden?

Das Pflanzenschutzgesetz definiert Integrierten Pflanzenschutz als „Kombination von Verfahren, bei denen unter vorrangiger Berücksichtigung biologischer, biotechnischer, pflanzenzüchterischer sowie anbau- und kulturtechnischer Maßnahmen die Anwendung chemischer Pflanzenschutzmittel auf das notwendige Maß beschränkt wurde“ (§ 2 Nr. 2 Pflanzenschutzgesetz vom 6. Februar 2012, zitiert nach BMEL 2022). In der Unterteilung von Pflanzenschutzmaßnahmen folgen wir der Maßnahmenpyramide für den integrierten Pflanzenschutz, wie sie auf der Internetseite des Nationalen Aktionsplans Pflanzenschutz dargestellt ist (BMEL 2022). Die Basis bilden vorbeugende Maßnahmen und es folgen bei Bedarf physikalische, biologische und biotechnische Maßnahmen und letztendlich chemische Maßnahmen (Abbildung 1).

Abbildung 1: Maßnahmenpyramide für den integrierten Pflanzenschutz



PSM = Pflanzenschutzmittel, GVP = Gentechnisch Veränderte Pflanze. Quelle: Eigene Darstellung.

Vorbeugende Maßnahmen umfassen z. B. Fruchtfolge, Sortenwahl, Kulturführung, Verwendung zertifizierten Saatguts, Zwischenfruchtanbau, Anwendung ausgewogener Dünge-, Kalkungs- und Bewässerungs- sowie Drainageverfahren, und die Förderung von Nützlingen.

Physikalische Maßnahmen sind z. B. Hacken und Pflügen zur Beikrautbekämpfung, umfassen aber auch Barrieren und andere Maßnahmen, um Schädlinge von Kulturpflanzen fern zu halten. Diese klassischen Kontrollmaßnahmen werden in diesem Projekt jedoch nicht weiter betrachtet, auch wenn sie Auswirkungen auf die Umwelt und die Biodiversität haben können. Der Schwerpunkt wird hier stattdessen auf neuen Möglichkeiten der physikalischen Beikrautregulierung als Alternative zu Herbiziden liegen. Erste Beispiele für Alternativen zu Fungiziden und Molluskiziden werden ebenfalls vorgestellt.

Biologische Maßnahmen umfassen den klassischen Einsatz von Nützlingen, aber auch von Pflanzenschutzmitteln biologischen Ursprungs (Biopestizide, z. B. Bt-Präparate, Neemöl, RNAi-basierter Pflanzenschutzmittel, in Abb. 1 in Low Risk Pflanzenschutzmittel enthalten). Konventionell gezüchtete Nutzpflanzen oder auch genetisch veränderte Nutzpflanzen, die aktive Substanzen gegen Schädlinge produzieren, könnten auch als biologische Maßnahme verstanden werden. Da sie aber schon vor einem Schädlingsbefall eingesetzt werden, sind sie auch als vorbeugende Maßnahme zu betrachten. Pflanzenschutzmittel (PSM), so wie sie unter der EG Verordnung 1107/2009 (EG 2019) reguliert werden, umfassen neben synthetischen Chemikalien auch anorganische Chemikalien (z. B. Schwefel und Kupferverbindungen) und Biopestizide (z. B. Pflanzenextrakte, Pheromone, mikrobielle Pflanzenschutzmittel, double-stranded RNA). Solche nicht-synthetischen Stoffe können als Low Risk Pestizide eingestuft werden (s. Annex II, Punkt 5 der EG (2009)). Die Methoden der Umweltrisikobewertung von PSM sind allerdings in erster Linie auf die synthetischen PSM und Mikroorganismen ausgerichtet. Es ist zu analysieren, inwieweit diese auch auf neuere PSM wie Nanopestizide und Biopestizide (z.B. RNAi-basierte PSM) anwendbar sind oder ob andere oder zusätzliche Methoden erforderlich sind (s. z. B. EU- Projekt RATION, <https://www.ration-lrp.eu/>).

Während Biopestizide inklusive Mikroorganismen auch unter die Zulassung von Pflanzenschutzmitteln fallen, ist die Anwendung von tierischen Nützlingen im biologischen Pflanzenschutz nicht zulassungspflichtig. Allerdings ist zu beachten, dass das Ausbringen von nichtheimischen, also gebietsfremden Pflanzen und Tieren in die freie Natur nach § 40 Absatz 4 Bundesnaturschutzgesetz (G) eingeschränkt ist (BLE 2021).

Nicht explizit in Abbildung 1 dargestellt sind Entscheidungshilfen wie Feldbegehungen, Bekämpfungsrichtwerte und Prognosemodelle, um optimierte Maßnahmen treffen zu können.

Digital Farming, also eine stärkere Digitalisierung in der Landwirtschaft, muss als Querschnittsthema gesehen werden, welches viele der oben genannten Pflanzenschutzmaßnahmen (und den Feldbau) betrifft. Verbesserte Sensorik erlaubt frühzeitiges und räumlich genaues Erkennen von Krankheiten oder Schädlingsbefall., Robotik wird z. B. eine gezieltere Anwendung von Pflanzenschutzmitteln oder eine automatisierte Beikrautbekämpfung erlauben.

Im Kapitel 2 werden zunächst für jede der vier Kategorien von Pflanzenschutzmaßnahmen aktuelle Entwicklungen dargestellt, die auch ohne *Digital Farming* realisierbar sind. Im zweiten Teil werden dann verschiedene Trends des *Digital Farming* vorgestellt und die Möglichkeiten in Verbindung mit verschiedenen Pflanzenschutzmaßnahmen dargestellt. Wenn Informationen bzw. Einschätzungen zum Stand der Entwicklung bzw. Erwartungen an die Umsetzung vorliegen, werden diese ebenfalls dargestellt, so dass die ersten beiden Fragen abgehandelt werden. In Kapitel 3 werden die Chancen und Risiken der neuen Entwicklungen analysiert (Fragen 3 – 6) bevor in Kapitel 4 erste Empfehlungen gegeben werden (Fragen 7 – 9).

2 Überblick über aktuelle Entwicklungen im Pflanzenschutz

In diesem Kapitel werden aktuelle Entwicklungen im Pflanzenschutz identifiziert und Beispiele zum aktuellen Stand gegeben (Fragen 1 und 2 der Einleitung). Dabei werden zunächst Entwicklungen, die auch ohne fortschreitende Digitalisierung möglich sind, in den Bereichen chemischer, biologischer, physikalischer und vorbeugender Pflanzenschutz behandelt (Abschnitt 2.1 – 2.4), bevor in Abschnitt 2.5 die durch Digitalisierung möglichen Entwicklungen aufgezeigt werden.

2.1 Chemische Pflanzenschutzmaßnahmen

Die meisten chemischen Pflanzenschutzmaßnahmen umfassen den Einsatz synthetischer organischer Substanzen. Die größte Rolle spielen dabei Herbizide, Fungizide und Insektizide. Hinzu kommen natürliche organische und anorganische Chemikalien wie z. B. Pyrethrine, Kupfer- und Schwefelverbindungen, die im Unterschied zu synthetischen organischen Verbindungen im ökologischen Landbau geduldet werden. Chemischer Pflanzenschutz hat – in Verbindung mit Düngung, ertragreicheren Sorten und verbesserter Technik – zu den heutigen hohen Erträgen der Landwirtschaft beigetragen. Nach Noleppa und von Witzke (2013) erzeugt der konventionelle Ackerbau in Deutschland im Vergleich zum ökologischen Ackerbau durchschnittlich nahezu den doppelten Ertrag. Dies ist sicher nicht nur auf den Einsatz von synthetischen Pflanzenschutzmitteln zurückzuführen. Der Blick auf den Ertrag lässt jedoch noch keine Aussage darüber zu, ob Anbauverfahren auch nachhaltig und damit umweltgerecht sind.

Im chemischen Pflanzenschutz werden biologisch aktive, für Zielorganismen schädliche Substanzen bewusst in die Umwelt ausgebracht. Daher verlangt das europäische Zulassungsverfahren, dass Pflanzenschutzmittel bei "Verwendung entsprechend der guten Pflanzenschutzpraxis und unter der Voraussetzung realistischer Verwendungsbedingungen ... keine unannehmbaren Auswirkungen auf die Umwelt haben" dürfen. Dabei sollen „Verbleib und die Ausbreitung in der Umwelt“, „Auswirkung auf Arten, die nicht bekämpft werden sollen, einschließlich des dauerhaften Verhaltens dieser Arten“ und „die biologische Vielfalt und das Ökosystem“ berücksichtigt werden (Verordnung (EG) Nr. 1107/2009, EG (2009)). Dieses generelle Schutzziel „keine unannehmbaren Auswirkungen auf die Umwelt“ impliziert, dass unerwünschte Nebeneffekte von Pflanzenschutzmitteln im Feld, auf Nicht-Zielflächen oder in Gewässern nicht ausgeschlossen werden können und dass es „annehmbare Auswirkungen“ geben kann. Was genau annehmbare bzw. unannehmbare Effekte sind, wird zurzeit in Form von Spezifischen Schutzzielen genauer definiert, indem festgelegt wird, was, wo und über welche Zeiträume geschützt werden soll (EFSA Scientific Committee 2016).

Insbesondere die Verwendung synthetischer Pflanzenschutzmittel ist für die Verluste an Biodiversität in der Agrarlandschaft mitverantwortlich (z. B. Schäffer *et al.* 2018 und dort zitierte Literatur). Der Einsatz von Pflanzenschutzmitteln ist aber nicht die alleinige Ursache für den Rückgang der Biodiversität, sondern auch etwa die Zunahme der Schlaggröße, Verluste der Strukturvielfalt, weniger Grünland, weniger Anbauvielfalt, und intensive Düngung sowie der Klimawandel. Im integrierten Pflanzenschutz wird nachhaltigen biologischen, physikalischen und anderen nicht-chemischen Methoden der Vorzug vor chemischen Methoden gegeben; eingesetzte Pestizide sollen so zielartenspezifisch wie möglich sein und die geringstmöglichen Nebenwirkungen auf die menschliche Gesundheit, Nichtzielorganismen und die Umwelt haben (BMEL 2022). Auch der Industrieverband Agrar und damit die Hersteller von Pflanzenschutzmitteln bekennen sich zu diesen Prinzipien (IVA 2010). So hat sich etwa Bayer verpflichtet, die Umweltbelastung durch Pflanzenschutzmittel in den nächsten 10 Jahren um 30 Prozent zu reduzieren. Dies soll durch digitale Präzisionsapplikationen, neue chemische und biologische Wirkstoffe mit

verbessertem Nebenwirkungsprofil, robustere Sorten und andere innovative Technologien gelingen (Bayer AG 2020). Diese Selbstverpflichtung bleibt allerdings noch deutlich hinter den Zielen der *Farm-to-Fork*-Strategie der Europäischen Kommission zurück, die als ein Leitziel die Verringerung der eingesetzten Menge und der Risiken chemischer Pflanzenschutzmittel um 50 % bis 2030 formuliert hat (Europäische Kommission 2020).

Ein vollständiger Ersatz chemischer Pflanzenschutzmittel erscheint in naher Zukunft nicht realistisch und ist auch weder in der *Farm-to-Fork*-Strategie der EU noch im Nationalen Aktionsplan vorgesehen, um der Landwirtschaft keine Managementoption vollständig zu nehmen. Bremmer *et al.* (2021) weisen allerdings auf die möglichen Folgen der Umsetzung der *Farm-to-Fork*-Strategie hin. Sie erwarten eine sinkende Produktion von Lebensmitteln in der EU, die, solange sich die Konsumansprüche nicht ändern, zu mehr Importen und weniger Exporten führt. Um dies zu kompensieren würden außerhalb der EU zusätzliche landwirtschaftliche Flächen benötigt. Umweltbelastungen werden so verlagert.

Die Anzahl der in der EU verfügbaren konventionellen Wirkstoffe hat sich von 1993 bis 2019 von 703 auf 267 verringert (Griffiths 2019). Die meisten Wirkstoffe fielen allerdings bis zur Einführung der VO (EG) Nr. 1107/2009 weg. Im Juni 2011 waren 372 konventionelle Wirkstoffe in der EU verfügbar während es im Mai 2019 noch 267 waren, von den 63 unter der VO 1107/2009 zugelassen wurden, darunter 1 neue Wirkstoffe (Griffiths 2019). Für 216 Wirkstoffe stand 2019 eine Bewertung unter der VO 1107/2009 noch aus. In Deutschland ist nach Daten des UBA die Anzahl zugelassener Wirkstoffe von 2000 bis 2021 nahezu gleichgeblieben (2000: 276, 2021: 281, UBA 2023). Für eine Abnahme der Anzahl chemischer Wirkstoffe in Zukunft sprechen mehrere Entwicklungen: Zum einen verlieren zugelassene Wirkstoffe etwa durch Resistenzbildung ihre Bedeutung und Zulassungswürdigkeit oder es wird auf der Basis neuer Erkenntnisse z. B. in Bezug auf die Toxizität für Menschen oder die Umweltrisiken die Zulassung entzogen bzw. eine Zulassungsverlängerung nicht möglich. Nach dem *International Survey of Herbicide Resistant Weed* hat sich die Anzahl der Resistenzfälle (Nutzpflanze x Wirkmechanismus) global von 2000 bis 2020 mit etwas über 500 ungefähr verdoppelt (Heap 2021). Andere Wirkstoffe oder Pflanzenschutzmittel erhalten wegen Hinweisen auf Humantoxikologie oder Umweltgefährdung keine Neuzulassung mehr. Die Anzahl an zugelassenen nichtselektiven Herbiziden wird sich zum Beispiel in den nächsten Jahren verringern (Tabelle 4). Da sich für manche Anwendungen keine chemischen Ausweichmöglichkeiten bietet (z.B. Kartoffelsikkation, gewinnen mechanische Maßnahmen wieder an Bedeutung (für Kartoffelsikkation: Krautschlagen, Abflammen und elektrophysikalische Behandlungen (myAgrar (2021))).

Tabelle 9: Erfolgte und mögliche Zulassungsenden von nicht selektiven Herbiziden in Europa

Wirkstoff (z. B. Produktname) Quelle	Zulassungsende/ Ende Aufbrauchfrist (Europa)	Verbotsgrund	Haupteinsatzbereich	Ersatzstoff zum Zeitpunkt des Einsatzendes
Paraquat Proplanta (2007)	2007	Sehr hohe Humantoxizität	Totalherbizid Sikkation,	Diquat, Glyphosat
Glufosinat (z. B. Basta) BVL (2021)	2015/2017 (endgültig 2018/2019)	Reproduktionstoxizität	Totalherbizid, Kartoffelsikkation	Glyphosat, Diquat
Diquat (Reglone) BVL (2021)	2019/2020	Hohe Humantoxizität	Totalherbizid, Kartoffelsikkation	Pelargonsäure Carfentrazone, Pyraflufen
Carfentrazone-Ethyl (Shark) BVL (2020a, 2021)	2022 (aktuelles Zulassungsende, dauerhafte Wiederzulassung unklar, teilweise Notfallzulassungen)	Diverse Toxizität	Kartoffelsikkation	Pelargonsäure
Pyraflufen (Quickdown) BVL (2020b)	2022 (aktuelles Zulassungsende dauerhafte Wiederzulassung unklar, teilweise Notfallzulassungen)	Diverse Ökotoxizität	Kartoffelsikkation	Pelargonsäure
Glyphosat (Roundup) Proplanta (2019), BVL (2021)	2021 - 2023 je nach Produkt(?)	Diskussion über Insektenschädigung, Krebsrisiko, Biodiversitätsreduktion, Resistenzen, Bodenanreicherung	Auflaufgetreide Vorauflauf-behandlung Nachauflauf-behandlung Obst/Weinberg Greeningkontrolle Getreidesikkation	wo möglich und ökonomisch: Pelargonsäure + selektive Herbizide

Quelle: Fraunhofer IME, erstellt nach Informationen von M. Eberius, Crop,Zone (pers. Mitt. 2020)

Auf der anderen Seite kommen immer weniger neue Wirkstoffe auf den Markt. Als ein Grund gibt der IVA (2020a) steigende Kosten an: „Bevor ein neuer Wirkstoff zur Marktreife gelangt, vergehen im Durchschnitt rund elf Jahre. Die Kosten für die Entwicklung eines neuen Produkts belaufen sich auf rund 250 Millionen Euro. Steigende Kosten für die Erforschung und Entwicklung neuer Pflanzenschutzmittel haben dazu geführt, dass heute weltweit nur noch sechs IVA-Mitgliedsunternehmen auf diesem Gebiet tätig sind.“ Bei den **Herbiziden** wurden beispielsweise seit den 90er Jahren keine Mittel mit neuen Wirkmechanismen mehr auf den Markt gebracht (Umetsu und Shirai (2020)).

Insektizide haben sich von Kupferpräparaten im 19. Jahrhundert über chlorierte Kohlenwasserstoffe wie DDT, Organophosphate, Carbamate und Pyrethroide zu Neonikotinoiden, Phenylpyrazole, Pyrethroiden der 4. Generation, Avermectinen, Diamidne und Spinosynen im 20. Jahrhundert entwickelt (Oberemok *et al.* 2015). In naher Zukunft soll die Insektizidproduktion

noch weiter ansteigen, verstärkt durch die Möglichkeiten neuer RNA oder DNA Wirkstoffe als „*intellectual insecticides that think before they act*“ (Oberemok *et al.* 2015, s. Kapitel 2.2.1). Im letzten Jahrzehnt wurden 34 neue Insektizide bzw. Akarizide auf den globalen Markt gebracht (Umetsu und Shirai, 2020).

In Bezug auf **Fungizide** hat sich das Spektrum der Pathogene in der Vergangenheit stark verändert, was wegen des globalen Handels auch in Zukunft zu erwarten ist (Morton und Staub 2008). Daher soll global die Fungizidanwendungen zunehmen, was durch besseren Befallsvorhersagen und insbesondere von Resistenzen der Nutzpflanzen durch Züchtung oder genetische Veränderung begrenzt wird. Allerdings verändert auch der globale Klimawandel mit Temperaturerhöhungen, häufigeren Starkregenereignissen und vermehrter Trockenheit das Pathogenspektrum und erschwert wiederum Befallsvorhersagen. Umetsu und Shirai (2020) geben an, dass in den letzten zehn Jahren 42 neue Fungizide auf den globalen Markt gebracht wurden, wobei viele davon auch auf neuen Wirkmechanismen beruhen.

Insgesamt zeichnet sich ab, dass auch in Zukunft neue chemische Wirkmechanismen und Wirkstoffe entwickelt werden. Die Situation bei den Herbiziden zeigt aber, dass dies immer schwieriger wird. Innovationen im chemischen Pflanzenschutz sind daher eher zu erwarten in neuen Formulierungen, z. B. Nanopestizide, die im folgenden Abschnitt betrachtet werden, und in neuen Möglichkeiten der gezielteren Anwendung von Pflanzenschutzmitteln, die im Kapitel über *Digital Farming* behandelt werden. Insgesamt wird ein Trend weg von chemischen Pflanzenschutzmitteln hin zu biologischen Mitteln, inklusive RNAi Pestiziden und genveränderten Pflanzen, erwartet. Laut einer Marktanalyse von Lux Research wird die globale Marktgröße von chemischen Pflanzenschutzmitteln um 2030 ihr Maximum erreichen und um 2050 von Biopestiziden übertroffen werden (Olson 2015, zitiert in Umetsu und Shirai (2020)).

2.1.1 Nanopestizide

Zur Abschätzung des Umweltrisikos von Nanomaterialien in Pflanzenschutzmitteln haben Quik *et al.* (2020) der EFSA verschiedene Kriterien vorgeschlagen. Die Kriterien basieren auf der EU-Nanodefinition (EC, 2015, EU, 2011), schließt aber auch größere Partikel ein, wenn sie Eigenschaften aufweisen, die charakteristisch für nanoskalige Materialien sind (z. B. große spezifische Oberfläche). Es werden auch Materialien berücksichtigt, deren Fraktion an nanoskaligen Materialien (1-100 nm) weniger als 50 % beträgt. Einbezogen werden auch nanoskalige natürliche Materialien, die gezielt im Hinblick auf nanotypische Eigenschaften hergestellt wurden oder die entsprechend modifiziert wurden, um andere nanoskaligen Materialien, (z. B. kapselbildende Komponenten) zu entwickeln. Bei Nanopestiziden lassen sich verschiedene Ansätze unterscheiden (Kah, Kookana, Gogos, & Bucheli, 2018).

Zum einen werden **Nanoformulierungen** angeboten. Dabei befindet sich der Wirkstoff in nanoskaligen Öltröpfchen, Kapseln oder ist in einem Gel aus nanoskaligen Bausteinen eingearbeitet. Auch die Verwendung von Nanofasern, Liposomen und Lipidnanopartikeln ist beschrieben. Ziel ist die gute Verteilung, eine langsame Freisetzung, leichtere Handhabung, der Schutz vor Abbau des Wirkstoffs oder eine erhöhte Verfügbarkeit für und Aufnahme in die Pflanze, sowie ein verbesserter und Transport in der Pflanze. Hierzu findet sich in der Wissensplattform DaNa4.0 folgende Aufstellung (Tabelle 10):

Tabelle 10: Beispiele und Vorteile von Nanoformulierungen (bei dem Nanoanteil handelt es sich nicht um den Wirkstoff)

Art	"Nano"-Anteil	Vorteile	Beispiele für Wirkstoffe (Schädlinge)
Nanoemulsion	Der Wirkstoff befindet sich in nanoskaligen Öltröpfchen, die in einer wässrigen Lösung schwimmen	Gute Verteilung und verstärkte Aufnahme durch Schädlinge	Neemöl (gegen Parasiten und Insekten) Permethrin (gegen Läuse und Mücken)
Nanokapsel	Der Wirkstoff wird in nanoskaligen Kapseln verpackt	Gute Aufnahme und dadurch verstärkte Wirksamkeit gegen Schädlinge	Lansiumamide B (gegen Bakterien, z.B. auf Tabakpflanzen)
<u>Nanogel</u>	Der Wirkstoff wird in einem Gel verteilt, welches aus nanoskaligen Bausteinen besteht	Leichtere Handhabung, keine Verdunstung des Wirkstoffes	Kupfer (gegen Pilze) Essentielle Öle (gegen verschiedene Schädlinge)
Nanofasern	Der Wirkstoff wird in Fasern eingearbeitet, die nanoskalig sind	Gute Verteilung des Wirkstoffes, langsame Freisetzung	Thiametoxam (gegen Insekten)
Liposomen	Liposomen sind nanoskalig	Langsame Freisetzung des Wirkstoffes	Etofenprox (gegen Insekten) Pyrifluquinazon (gegen Insekten)
Lipid-Nanopartikel	Die Nanopartikel bestehen aus Fetten, in denen sich der Wirkstoff befindet	Langsame Freisetzung des Wirkstoffes, Schutz vor Abbau des Wirkstoffes	Deltamethrin (gegen Insekten)
Anorganische Nanopartikel in Verbindung mit Wirkstoff	Die Nanopartikel wirken als Träger für den Wirkstoff	Langsame Freigabe des Wirkstoffes	Siliziumdioxid Titandioxid

Quelle: DaNa (2021). Verändert durch Fraunhofer IME

Als weitere Beispiele aus der Praxis werden die Insektizide AZteroid FC und Bifender FC von Vive Crop Protection, sowie Karate ZEON von Syngenta genannt (Kah *et al.* 2019; Prasad *et al.* 2017). Mit Dedalo Elite von Red Surcos ist auch ein Herbizid auf dem Markt (Kah *et al.* 2019). Bei keinem der genannten Mittel geht jedoch aus der Produktbeschreibung explizit hervor, dass es sich um Nanoformulierungen handelt, auch wenn beispielsweise bei den Produkten der Firma Vive Crop Protection auf ein neuartiges, patentiertes „Delivery System“ namens Vive Allosperse® hingewiesen wird (Ag News 2018). Vive Allosperse® wird dabei als erste nanotechnologische Anwendung, die in den USA für Pflanzenschutz registriert ist, beschrieben. Die Nanokomponenten sollte dabei Mischungseigenschaften des Produkts mit Flüssigdünger, anderen Pflanzenschutzmitteln, Mikronährstoffen und Wasser verbessern. Bei Karate ZEON handelt es sich um eine Kapselsuspension, wobei der Wirkstoff im Sonnenlicht stabil ist. Darüber hinaus ist der Einschluss von Wirkstoffen zusammen mit einer als Katalysator fungierender Substanz beschrieben, die den Abbau der aktiven Substanz in Boden oder Pflanzen fördern soll (Quik *et al.*, 2020)

Alternativ kann das **Nanomaterial als Wirkstoff** fungieren. Als geeignete Materialien werden auf der Wissensplattform nanopartiel.info (DaNA 2021) SiO₂, TiO₂, Ag, Cu und Nanoclay aufgeführt. Quik *et al.* (2020, nach Duhan *et al.* 2017) nennen beispielhaft in einem Bericht für die EFSA Ag, Cu, Zn, CuO und ZnO. Reale Produkte mit Nano-Wirkstoffen werden nicht genannt. Quik *et al.* (2020) weisen aber darauf hin, dass in Pflanzenschutzmitteln Nanoformen meist für die Formulierung verwendet werden, um z. B. eine verlangsamte Freisetzung und damit verlängerter Wirkdauer zu erreichen (*Nanocarrier for slow release*).

2.1.2 Reduzierung von Aufwandmengen durch herbizidresistente Pflanzen

Während in der Vergangenheit der Anbau Herbizid resistenter Pflanzen eher zu einem vermehrten Herbizideinsatz führte, ergeben sich aus der Anforderung einer generellen Reduktion von Pflanzenschutzmitteln auch Möglichkeiten, die Aufwandmengen zu reduzieren: Die Verwendung von Herbizid resistenten Pflanzen (GMP) oder gegen Herbizide geschütztem Saatgut (non-GMP) kann in Kombination mit *Precision Farming* (s. Abschnitt 2.5.1) auch den Einsatz von Aufläufherbizid auf die unmittelbare Umgebung der Einsaat erlauben, um der Saat einen Konkurrenzvorteil gegenüber den Beikräutern zu verschaffen. Nach Auflauf kann die Beikrautbekämpfung in den unbehandelten Flächen physikalisch erfolgen. Genehmigt ist aktuell das Fraunhofer PREPARE-Projekt SeedPLUS (*Improved crop yield through protective and supportive multifunctional coatings of seeds*. (Prüfer *et al.* 2021)), in dem eine mehrschichtige Pillierung das Saatgut vor dem bei der Einsaat simultan eingesetzten Herbizid schützen und gleichzeitig den Keimling durch Bereitstellung von Feuchtigkeit unterstützen soll. In dem Projekt wird Saatgut also physikalisch vor dem Herbizid geschützt. Vom Prinzip her könnten allerdings auch gentechnisch hergestellte Herbizid resistente Pflanzen eingesetzt werden. Die Pillierung schützt allerdings nicht nur vor einzelnen Herbiziden, so dass ein besseres Resistenzmanagement möglich ist.

2.2 Biologische oder biotechnische Pflanzenschutzmaßnahmen

Nach der Beschreibung auf der Internetseite zum Nationalen Aktionsplan Pflanzenschutz umfasst der biologische Pflanzenschutz „insbesondere die Anwendung von Nützlingen oder bestimmter Mikroorganismen zur Regulierung von Krankheiten und Schädlingen an Kulturpflanzen. Auch die Anwendung von Naturstoffen für Pflanzenschutz Zwecke kann zum biologischen Pflanzenschutz gezählt werden.“ (BMEL 2022).

2.2.1 Biopestizide

Biopestizide sind Pflanzenschutzmittel, die auf Mikroorganismen oder auf „natürlichen“ Produkten von Mikroorganismen, Pflanzen oder Tieren basieren. Sie fallen wie chemische Pflanzenschutzmittel unter die europäische Pflanzenschutzmittelregulierung 1107/2009 und das deutsche Pflanzenschutzgesetz (EG 2009, BMJ 2020).

Biopestizide sind nicht neu, da z. B. natürliche Substanzen wie Pyrethrum als Extrakt von Chrysanthemen-Pflanzen schon lange als Pflanzenschutzmittel eingesetzt werden. Die insektizide Wirkung wurde bereits in den 1920er Jahren von Staudinger und Ruzicka (Staudinger & Ruzicka 1924) nachgewiesen. Der von Blaualgen produzierte Zucker 7-Desoxy-Sedoheptulose wird aktuell als Ersatz für Glyphosat diskutiert und agiert wie Glyphosat über den gleichen Wirkmechanismus, nämlich der Hemmung des Shikimat-Syntheseweges von aromatischen Aminosäuren in Bakterien und Pflanzen (Brilisauer *et al.* 2019). Da diese Wirkung erst kürzlich publiziert wurde, können Aussagen über den Effekt von flächendeckendem Einsatz nicht getroffen werden. Auch Mikroorganismen werden schon seit langem als Pflanzenschutzmittel verwendet (z. B. *Bacillus thuringiensis* seit den 1930er Jahren). Ebenso werden schon lange Pheromone eingesetzt, entweder in Fallen oder auf größeren Flächen mittels Dispensern (z. B. Isonet LE mit den Wirkstoffen

(E,E/Z)-7,9-Dodecadienylacetat und (E/Z)-9-Dodecenylacetat gegen Traubenwickler, BVL 2014).

Die Entdeckung neuer natürlicher Wirkstoffe oder von geeigneten Mikroorganismen ist sicher auch in Zukunft noch möglich, aber die aktuellen Hoffnungen auf Biopestiziden (oder Biologicals) beruhen eher auf den relativ neuen Möglichkeiten wie z.B. *plant incorporated protectants* (PIPs) und RNAi, auf die daher im Folgenden näher eingegangen wird. 2015 wurde der Anteil von Biopestiziden am globalen Markt auf 3-4 Mrd. US\$ geschätzt. Dies macht einen Anteil von 6 % des gesamten Pestizid-Markts aus (Olson 2015). Diese Zahlen hatten auch noch 2019 Bestand (Marrone 2019). Dieser Anteil wird aber aller Voraussicht nach stark wachsen und mit konventionellen Pflanzenschutzmitteln gleichziehen. So postuliert Olson (2015), dass Biopestizide bis 2050 die Hälfte des Pflanzenschutzmittelmarktes ausmachen. Andere Analysen gehen von einem Biopestizidmarkt von einer Verdopplung des globalen Biopestizidmarkts von 2020 bis 2025 auf 8,6 Milliarden US \$ aus und sehen zunehmende Nachfrage nach ökologischen Lebensmitteln (*organic food*) (MarketsandMarkets 2021). Die größten Wachstumsraten werden dabei für Europa prognostiziert, wobei zunehmende Resistenzen von Schädlingen der Hauptkulturen, an den aktuellen Stand von Wissenschaft und Technik angepasste Regularien mit einem z. T. Wegfall aktuell wichtiger, aber dem Schutz von Mensch und Umwelt nicht genügenden Pflanzenschutzmitteln und die zunehmende Nachfrage nach Bio-Lebensmitteln (*organic food products*) als treibende Kräfte angesehen werden.

Biopestizide können wie chemische PSM angewandt werden oder sie können als PIPs von gentechnisch veränderten Nutzpflanzen (*genetically manufactured plants*, GMPs) synthetisiert werden. Letztere stellen wie durch klassische Züchtung entstandene Sorten eine vorbeugende Pflanzenschutzmaßnahme dar (Abschnitt 2.4), werden aber hier unter biologischen Maßnahmen vorgestellt, da hier die Wirkmechanismen im Vordergrund stehen und diese mit den entsprechenden Pflanzenschutzmitteln identisch sind.

Protein-basierte Pestizide

Protein-basierte Biopestizide bestehen bisher hauptsächlich aus der Gruppe der **Bt-Toxine**, die von dem im Boden lebenden Bakterium *Bacillus thuringiensis* (Bt) synthetisiert werden. „Nährstoffarme Substrate induzieren bei Sporulation, wobei *B. thuringiensis* kristalline Proteine synthetisiert, die sogenannten Cry-Proteine, welche eine insektizide Wirkung entfalten. Diese Proteine werden durch die *cry* Gene kodiert, die auf Megaplasmiden liegen.

Zunächst wird das Cry-Protein als Präprotein synthetisiert, das die toxische Wirkung erst im Darm des Insekts durch die Bildung des Protoxins entfaltet. Dieses Toxin bindet an spezifische Rezeptoren im Darm der Insekten und führt dadurch zu einer Permeabilität des Darms für Ionen und kleine Moleküle und dem Tod des Insekts.

Unterschiedliche Stämme von *B. thuringiensis* bilden Bt-Toxine, die sehr spezifisch für die unterschiedlichen Darmepithelien der Insekten sind. Durch Screening-Ansätze werden unter den Stämmen diejenigen ausgesucht, die spezifisch für das jeweilige Schadinsekt sind. Somit ist zwar das Prinzip der Bt-Toxine schon lange bekannt, aber es können trotzdem noch neue, artspezifische Bt-Toxine identifiziert werden. In Einzelfällen wurden mittlerweile auch Durchfallerkrankungen beim Menschen gefunden, die mit einzelnen Stämmen korreliert sein könnten (Donner 2014). Eine intensivere Prüfung dieser bisher als weitgehend unproblematisch geltenden Substanzklasse auf Nebenwirkungen kann deshalb angezeigt sein.

Neben den Bt-Proteinen werden einige neue biologische Substanzen in der Literatur als geeignete neue Biopestizide beschrieben. Diese befinden sich momentan noch in einem sehr frühen

Entwicklungsstadium und ihre Effektivität muss noch in Feldstudien bewiesen bzw. analysiert werden. Unter diesen Kandidaten befinden sich zum Beispiel Produkte des Pilzes *Trichoderma harzianum*, die gegen die *Fusarium*-Wurzelfäule effektiv wirken sollen (Kirk & Schafer 2015). Interessant ist auch die Entwicklung eines Biopestizids aus *Pseudomonas chlororaphis*, welches wie die Bt-Proteine gegen den Maiswurzelbohrer wirkt (Schellenberger *et al.*, 2016). Da durch die lange Nutzung der Bt-Proteine einige Insektenpopulationen Resistenzen gegen das spezifische Bt-Protein entwickelt haben, wird auch die Entwicklung eines PIPs auf Basis des insektiziden *Pseudomonas*-Proteins IPD072Aa vorangetrieben.

RNA-Interferenz (RNAi)

Eine relative neue Art von Biopestiziden sind **RNAi-basierte Pflanzenschutzmittel**. Wie oben beschrieben, können Biopestizide auf zwei Arten angewendet werden. Während bei den RNAi-GMPs von *host-induced gene silencing* (HIGS) gesprochen wird (Nowara *et al.* 2010), wird bei der externen Applikation von *spray-induced gene silencing* (SIGS) gesprochen (Werner *et al.* 2020).

Das Prinzip der Wirkung RNAi-basierter Pestizide beruht auf einer Reduktion der Expression spezifischer Gene des Zielorganismus, bzw. der daraus synthetisierten mRNA (Boten-RNA). Als Inhibitor fungiert hier eine Zielgen-spezifische doppelsträngige RNA (dsRNA), die durch folgenden Mechanismus zum Abbau der mRNA führt, unabhängig davon, welche Anwendung, PIP oder Spray, zum Tragen kommt: Die dsRNA wird vom Zielorganismus durch Fraß an der Nutzpflanze aufgenommen und durch das Enzym Dicer 2 (*Dcr2*) in kurze, 21-24 Nukleotide große RNA-Duplexe (*small interfering RNA*, siRNA) geschnitten. Diese siRNA wird durch das Protein Argonaut 2 (Ago2) zu dem sogenannten RISC (*RNA-induced silencing complex*) rekrutiert. In diesem Komplex werden die doppelsträngigen Fragmente in Einzelstränge dissoziiert. Ein RNA-Strang, der sogenannte *Passenger*-Strang, wird degradiert, während der andere Strang, der komplementär zu der mRNA-Sequenz des Zielproteins ist, zu dieser mRNA transportiert wird. Hier induziert die komplementäre Bindung an die mRNA deren Degradierung und damit die Herabregulation der Produktion des Zielproteins. Die Zielproteine sind meist Teil von essentiellen Stoffwechselwegen des Zielorganismus, sodass dieser zunächst die Nahrungsaufnahme einstellt und anschließend stirbt. Eine Grundvoraussetzung der Anwendung dieses Prinzips ist also das Vorhandensein des oben beschriebenen molekularen Mechanismus (Christiaens & Smaghe 2014).

Studien zeigen vielversprechende Ansätze, wie die Entwicklung eines Spray-Applikations-Ansatzes zum Einsatz gegen den Pilz *Fusarium graminearum* (Fg), bei dem die Genprodukte für die Proteine Argonaute und Dicer herabreguliert und somit der Pilzbefall in Gerste reduziert werden soll (Werner *et al.*, 2020). Dieser Fg-spezifische Ansatz bringt den Vorteil, den Einsatz von Sterol-Demethylase-Inhibitoren, den sog. DMI-Fungiziden, reduzieren zu können, die neben ihrer gewollten Wirkung auf die Ergosterol-Synthese der Pilze auch die Aromatase der Wirbeltiere hemmen können und je nach Affinität damit als endokrine Disruptoren eingestuft werden.

Jain *et al.* (2021) bieten eine detaillierte Zusammenfassung von RNAi-Studien mit Hemipteren, von denen einige zu den Schadinsekten zählen. Der Übersichtartikel beschreibt eine Vielzahl von spezifischen Zielgenen und deren Funktionen, die in unterschiedlichen Studien erwiesen wurden und die potentiell als RNAi-basiertes Biopestizid weiterentwickelt werden können. Interessant ist zum Beispiel das RNAi-basierte *gene silencing* von Cytochrom P450 in *Diaphorinia citri* (Asian citrus psyllid), dem Hauptschadinsekt in Zitrusfrüchten, das zu einer größeren Empfindlichkeit gegenüber Imidacloprid führt (Tian *et al.* 2019). In diesem Zusammenhang ist auch die Nutzung einer Kombination von RNAi-basierten und chemischen PSM denkbar.

So hat eine weitere Studie erwiesen, dass die Acetylcholinesterase in *Rhopalosiphum padi* (Haferblattlaus) zur Resistenz gegen Primicarb und Malathion beiträgt (Xiao *et al.* 2015). Durch RNAi-basierte Herabregulation dieses Enzyms könnte damit der Resistenz gegenüber diesen

PSM entgegengewirkt werden. Wenn diese initialen Studien zu einer Weiterentwicklung der RNAi-basierten Biopestizide führen, könnte ihre Applikation zusammen mit den bekannten synthetischen Pflanzenschutzmitteln zu einem verringerten Einsatz der Mittel beitragen. Allerdings ist bis zum jetzigen Zeitpunkt keine Studie bis zur Marktreife entwickelt (Mezzetti *et al.* 2020).

Spezifische und ggfs. auch an die Wirkungsweise angepasste ökotoxikologische Studien sind nicht bekannt. Allerdings wird davon ausgegangen, dass existierende Risikobewertungskonzepte für Pflanzenschutzmittel auf ektopisch applizierte RNAi-basierte Mittel angewendet werden können und dass Anpassungen nur in Einzelfällen nötig sind (Mezzetti *et al.* 2020).

Plant incorporated protectants (PIPs)

Als **PIPs** bezeichnet man nach einer Definition der US EPA pestizide Substanzen, die durch gentechnische Veränderungen in Pflanzen produziert werden, sowie das für diese Produktion notwendige genetische Material (US EPA 2021). Die Pflanzen werden dahingehend gentechnisch verändert, dass sie spezifische Gensequenzen im Erbgut beinhalten, die entweder die Information zur Generierung von z. B. Bt-Proteinen oder von doppelsträngiger RNA (dsRNA) enthalten. Die PIPs werden also direkt in der zu schützenden Pflanze produziert und schützen diese vor Schädlingsbefall. Durch diese spezifische Expression einzelner, auf den Schädling angepasste Gensequenzen werden die PIPs generell als sehr spezifisch definiert. Durch die kontinuierliche Produktion kann es bei PIPs zu einer sogenannten „Pseudopersistenz“ kommen, die nicht auf der Stabilität der Biomoleküle selbst, sondern auf der ständigen Nachproduktion durch die Pflanze beruht.

Auf diesem RNAi-basierten Prinzip sind die ersten Produkte in den USA bereits seit 2017 zugelassen (www.regulations.gov/docket/EPA-HQ-OPP-2014-0293). Dabei handelt es sich um das von Monsanto und Dow entwickelte Maissaatgut „SmartStax Pro“, das die DvSnf7 dsRNA gegen die Larven des Maiswurzelbohrers (*Diabrotica virgifera virgifera*) exprimiert. Die Wirksamkeit wurde demonstriert durch Baum *et al.* (2007). Der westliche Maiswurzelbohrer verursacht alleine in den USA jährliche Kosten von mehr als einer Milliarde Dollar durch Ernteauffälle und Kosten für Pflanzenschutzmittel (LfL 2022). Mit einer kommerziellen Markteinführung wird für 2022 gerechnet (Bayer AG 2021).

Da *B. thuringiensis* bereits lange als Biopestizid verwendet wird und ein breites Wissen über Effektivität und gentechnologische Herstellung vorhanden ist, werden verschiedene Bt-Proteine auch spezifisch in GMPs synthetisiert (erstes GMP-Bt-Getreide aus 1987). In der EU wird zurzeit nur eine genetisch veränderte Nutzpflanze angebaut, der Bt-Mais MON810, der ein Bt-Protein gegen den Maiszünsler produziert. Der Anbau erfolgt vor allem in Spanien und in geringem Ausmaß in Portugal (Forum Bio- und Gentechnologie e.V. 2020). Weltweit werden gentechnisch veränderte Pflanzen in größerem Maße angebaut, z. B. neben Mais auch Baumwolle und Soja.

Die ökotoxikologische Prüfung der PIPs findet im Verbund mit der Prüfung der freizusetzenden Pflanzen statt. Dabei wird der Einzelfall zumeist in Freilandstudien geprüft und eine Prüfung anhand hochnormierter Tests wie in der Pflanzenschutzmittelbewertung ist unüblich. Die US-EPA fordert für PIPs und deren Wirtspflanzen Studien, die das Risiko der gentechnisch veränderten Pflanzen für Menschen, Nicht-Ziel-Organismen und die Umwelt und des Genflusses untersuchen, und die Notwendigkeit der Bereitstellung eines Insekten-Resistenz-Managementplans ermitteln (US-EPA 2021).

2.2.2 Einsatz von Nützlingen

Laut Definition des Julius Kühn-Instituts sind Nützlinge im Sinne des biologischen Pflanzenschutzes Makroorganismen, „die im biologischen Pflanzenschutz kommerziell zu erwerben sind

und aktiv eingesetzt werden“ (Koch *et al.* 2019). Es handelt sich dabei in der Regel um Insekten, Spinnentiere oder Fadenwürmer. Die Anzahl der in Deutschland verfügbaren Arten liegt seit 2008 (bis 2016) bei ca. 80. Kommerzielle Nützlinge sind nicht zulassungspflichtig. Allerdings ist das Bundesnaturschutzgesetz (BM J 2022) zu beachten:

„§ 40 Ausbringen von Pflanzen und Tieren

1) Das Ausbringen von Pflanzen in der freien Natur, deren Art in dem betreffenden Gebiet in freier Natur nicht oder seit mehr als 100 Jahren nicht mehr vorkommt, sowie von Tieren bedarf der Genehmigung der zuständigen Behörde. Dies gilt nicht für künstlich vermehrte Pflanzen, wenn sie ihren genetischen Ursprung in dem betreffenden Gebiet haben. Die Genehmigung ist zu versagen, wenn eine Gefährdung von Ökosystemen, Biotopen oder Arten der Mitgliedstaaten nicht auszuschließen ist. Von dem Erfordernis einer Genehmigung sind ausgenommen

1. der Anbau von Pflanzen in der Land- und Forstwirtschaft,

2. der Einsatz von Tieren zum Zweck des biologischen Pflanzenschutzes

a) der Arten, die in dem betreffenden Gebiet in freier Natur in den letzten 100 Jahren vorkommen oder vorkamen,

b) anderer Arten, sofern der Einsatz einer pflanzenschutzrechtlichen Genehmigung bedarf, bei der die Belange des Artenschutzes berücksichtigt sind,

3. ...“

Im Rahmen dieses Gutachtens wurden keine Einschätzungen zur weiteren Entwicklung des Einsatzes von Nützlingen gefunden. Aufgrund der bisherigen Entwicklung und der Beschränkung auf heimische Arten rechnen die Gutachter nicht mit vielen neuen kommerziell vertriebenen Nützlingsarten in der Zukunft. Allerdings können neue Techniken die Anwendung von Nützlingen vereinfachen oder effizienter gestalten (s. 2.5.2 mit einem Beispiel für die Ausbringung von Nützlingen mit Drohnen).

Da der Einsatz von Nützlingen nicht zulassungspflichtig ist und keine bedeutenden neuen Entwicklungen erwartet werden, die grundsätzlich andere Fragen in Bezug auf die Umweltbewertung aufwerfen, wird im Folgenden nicht weiter auf den Einsatz von Nützlingen als Pflanzenschutzmaßnahme eingegangen.

Unabhängig von aktiv ausgebrachten Nützlingen ist eine Erhöhung der Biodiversität in den Agrarlandschaften und damit auch des natürlichen Vorkommens von Nützlingen als vorbeugende Pflanzenschutzmaßnahme zu beachten (s. Abschnitt 2.4).

2.3 Physikalische Pflanzenschutzmaßnahmen

Beikrautbekämpfung stellt zumindest bisher das wichtigste Gebiet der physikalischen Pflanzenschutzmaßnahmen ohne Digitalisierung dar. Physikalische Maßnahmen gegen tierische Schädlinge wie Netze, Zäune oder andere Barrieren, Fallen, Abschreckungen (Schreckschuss, Vogelscheuchen) oder händisches Absammeln werden hier nicht weiter behandelt. Grundsätzlich neue Verfahren sind nur in Verbindung mit Digitalisierung denkbar (Abschnitt 2.5.3).

Eine klassische Maßnahme (ohne Einsatz von Robotik, Sensorik oder anderen Möglichkeiten des *Digital Farming*) zur Beikrautbekämpfung ist die mechanische Bodenbearbeitung z. B. durch Pflügen. Allerdings hat Pflügen auch negative Umweltauswirkungen und daher wird oft eine pfluglose Bodenbearbeitung propagiert. Agrarheute (Mitteilung vom 05.10.2016) fasst Vor- und Nachteile der pfluglosen Bodenbearbeitung wie folgt zusammen.

Tabelle 11: Vor- und Nachteile der pfluglosen Bodenbearbeitung

Vorteile	Nachteile
Erosionsschutz	Böden verdichten sich stärker
Zeitersparnis bei der Bodenbearbeitung: damit können vor allem in der Erntezeit anfallende Arbeitsspitzen gebrochen werden	Probleme mit Mäusen und Schnecken
Kraftstoffverbrauch sinkt, da weniger Bearbeitungsgänge und größere Arbeitsbreiten gefahren werden können	bedingt häufig den nichtselektiven Einsatz von Herbiziden wie Glyphosat zur Kontrolle von Unkräutern und Ausfallpflanzen. Dies kann zu Unkrautresistenzen führen.
Geringerer Investitionsaufwand für Maschinen und Traktoren	Verunkrautung und Gründüngungsentfernung erfordert nach Glyphosatverbot alternative systemische Herbizide
bessere Befahrbarkeit aufgrund der verbesserten Struktur des Bodens, zum einen durch die höhere Tragfähigkeit und zum anderen durch das frühere Abtrocknen der Bodenoberfläche	durch die an der Oberfläche belassenen Ernterückstände kann auch der Druck an pilzlichen Schaderregern steigen.
höhere biologische Aktivität und Diversität in den Böden durch die weniger intensive Bodenbearbeitung	Verunkrautung und Gründüngungsentfernung erfordert nach Glyphosatverbot alternative systemische Herbizide
bessere Bodenstruktur durch die höhere biologische Vielfalt und höheren Humusgehalt	
Bestände überstehen Trockenphasen besser durch besseres Infiltrationsvermögen und Bodenbedeckung	
Die verringerte Bodenerwärmung reduziert CO ₂ -Emission aus Mineralisierung durch den klimawandelbedingten Temperaturanstieg. Die gesteigerte Wärmerückstrahlung verringert Temperaturspitzen an Hitzetagen	Die verspätete Bodenerwärmung ist für den schnellen Saataufgang von Nachteil und kann Erträge verringern
Kohlendioxidsenke durch Anreicherung von Kohlenstoff im Boden und bei Nutzung von Gründüngung und Zwischenfrüchten bei begrenzter Bodendurchmischung z.B. durch Erntevorgänge	

Quelle: Eigene Darstellung Fraunhofer IME auf der Basis von agrarheute (2016), LOP (2021), Davin *et al.* (2014)

In der pfluglosen Bodenbearbeitung werden oft Breitbandherbizide wie Glyphosat eingesetzt, da dadurch eine einfache und kosteneffiziente Methode zur Beseitigung unerwünschten Aufwuchses gegeben ist. Allerdings wird die Verfügbarkeit solcher Herbizide in Zukunft wahrscheinlich wegen möglicher Wirkungen auf die menschliche Gesundheit oder die Umwelt stark abnehmen (s. Tabelle 4). Es stehen aber mittlerweile auch andere physikalische Maßnahmen mit breiter herbizider Wirkung bereit, z. B. Strom, Dampf, Heißwasser, Hochdruckwasser, Heißluft, Mikrowellen oder Infrarotstrahlung. Als Beispiel sei hier nur die Beikrautkontrolle mit Hilfe von Strom kurz dargestellt.

Strom kann z. B. als einziger nicht chemischer Wirkmechanismus, bis in die Wurzel wirken (Zasso 2020). Hierbei geben spezielle Elektroden Starkstrom über die Blätter bis in die Wurzel

ab, der von dort über den Boden und weitere Elektroden zurückfließt, so dass der Stromkreis geschlossen wird. Die Schäden an der Pflanze, insbesondere im wasserleitenden Gewebe, treten sofort ein und die Pflanzen vertrocknen. Laut Angaben des Herstellers hat die Methode keine negativen Umwelteffekte und wird mit großem Erfolg schon in Brasilien eingesetzt (Zasso 2020, Product Electroherb™).

In einer anderen Anwendung mit Strom werden zusätzlich leitfähigkeitssteigernde und widerstandsreduzierende Sprühlösungen eingesetzt. Diese können bei Bedarf auch ausschließlich aus im biologischen Landbau zugelassenen Stoffen hergestellt werden. Dadurch kann der Energieaufwand und die benötigte Spannung reduziert und damit das Risiko von unerwünschten Nebenwirkungen auf Nutzpflanzen und Nichtzielorganismen noch weiter verringert werden (Hybrid Herbicide™, Crop.Zone GmbH 2021). Das Produkt wurde 2020 intensiv in der Kartoffelsikktion getestet, befindet sich aber noch in der Erprobungsphase. Ökotoxikologische Begleituntersuchungen sind ab 2021 geplant. Der Einsatz in Reihenkulturen unter Einbeziehung von breit angelegter Digitaltechnik läuft in Forschungsprojekten seit dem Jahr 2020 an (M. Eberius, crop.zone, pers. Mitteilung 2021).

Durch Sensorik und Robotik lassen sich auch weitere physikalische Methoden der Beikrautbekämpfung, wie z. B. Laser, selektiv anwenden. Diese Alternativen werden deshalb in Abschnitt 2.5.3 näher behandelt und später in Kapitel 3 analysiert werden.

2.4 Vorbeugende Maßnahmen

Vorbeugende Maßnahmen bilden die Basis des integrierten Pflanzenschutzes (s. Abb. 1) und dienen dazu, Boden und Pflanzen gesund zu erhalten und die Widerstandskraft der Pflanzen gegenüber Schaderregern zu stärken bzw. keine Schaderregerbefall begünstigende Bedingungen zu schaffen. Dies kann durch folgende Maßnahmen geschehen: Bodenbearbeitung zur Förderung der Bodengesundheit, Kulturführung, Sortenwahl, vielfältige Fruchtfolge, Hygienemaßnahmen, und Nützlingsförderung (BMEL 2022).

Auf die Vor- und Nachteile einer **Bodenbearbeitung** durch Pflügen ist im Zusammenhang mit physikalischen Pflanzenschutzmaßnahmen schon kurz eingegangen worden (Tabelle 11). Die Vorteile des Pflügens bei der Bekämpfung von Beikräutern, aber auch von Feldmäusen und der Vorbeugung von bestimmten Pilzkrankungen stehen Nachteile z. B. für andere Bodenorganismen oder die Erosionsvorbeugung gegenüber.

Eine Maßnahme zur Verringerung eines Befalls mit Maiszünslern ist die mechanische Stoppelzerkleinerung, für die verschiedene technische Lösungen verfügbar sind (Bockholt 2019). Wiederauflaufendes Getreide oder Raps können ebenfalls zu erhöhtem Schädlingsbefall in Folgekulturen führen. Ausfallgetreide wird häufig von Pilzen befallen, die dann auf die nächste Kultur übertragen werden können, und Ausfallraps zieht Wurzelnematoden an, die schädlich für Zuckerrüben werden können. Methoden zur **Feldhygiene** umfassen Grubbern, Abflämmen, händische Beikrautentfernung oder Herbizideinsatz und zukünftig auch die Behandlung mit elektrischem Strom (M. Eberius, Crop-Zone, pers. Mitteilung 2021). Frühzeitiges Entfernen von Beikräutern stellt ebenfalls eine Maßnahme der Feldhygiene dar, indem die Samenbank im Boden begrenzt und damit der Beikrautaufwuchs in späteren Jahren verringert wird.

Fruchtfolgen sind ein bewährtes Mittel, um das Auftreten von Krankheitserregern und Schädlingen zu verringern.

Die Wahl von standortgerechten und widerstandsfähigen **Sorten** ist eine klassische vorbeugende Maße. Alte lokale Sorten sind wegen geringerer Erträge jedoch nur noch selten genutzt, aber dennoch existiert teilweise eine große Sortenvielfalt. So bietet ein Saatgutproduzent alleine

15 Sorten von Zuckerrüben an, unter anderem auch solche mit großem Blattwerk und frühem Reihenschluss für bessere Beikrautunterdrückung (Strube D&S GmbH 2021). Klassische Züchtung zur Reaktion auf neue Krankheitserreger oder Schädlinge ist jedoch ein langwieriger Prozess.

Die in den 1990er Jahren verfeinerten Methoden der **Präzisionszüchtung** sind daher ein wesentlicher Baustein für die Landwirtschaft der Zukunft. Das sogenannte *SMART Breeding* (SMART = *Selection with Markers and Advanced Reproductive Technologies*) verwendet molekularbiologische Methoden, um Züchtungsprozesse zu beschleunigen. Mithilfe des Genome Editings (**CRISPR/Cas Technologie**, Clustered Regularly Interspaced Short Palindromic Repeats und CRISPR-associated proteins) zur gezielten Änderung des Genoms in Richtung spezifischer Resistenzen werden weitere innovative Methoden zur Revolutionierung der Pflanzenzucht eingesetzt (BLE 2021). CRISPR/Cas 9 ist die häufigste verwendete Form von CRISPR/Cas, bei dem das Cas9-Protein als "Schere" verwendet wird, um bestimmte DNA-Sequenzen zu schneiden und Gene zu verändern (z. B. Max -Planck -Gesellschaft 2023).

Allerdings steht es seit 2015 den EU-Mitgliedsstaaten frei, den Anbau gentechnisch veränderter Pflanzen zu verbieten. Im Jahr 2020 wurde in der EU nur der Bt-Mais MON810 angebaut und zwar in Spanien auf ca. 100 000 ha und in weit geringerem Umfang in Portugal (Forum Bio- und Gentechnologie e.V. 2020). Global sind verschiedene gentechnisch veränderte Pflanzen zugelassen, die Resistenzen gegenüber Schädlingen, Krankheitserregern oder auch Herbiziden aufweisen. Neben Hauptkulturen wie z. B. Mais gilt dies auch für Gemüse und Obstsorten. Zum Beispiel wurde in den 90er Jahren bereits eine virusresistente Papaya entwickelt (Tripathi *et al.* 2008) und seit 2014 wird in Bangladesch eine Bt-Aubergine angebaut (Shelton *et al.* 2019).

Auf das Potential von vorbeugenden Maßnahmen in der Kombination mit *Digital Farming* wird in Abschnitt 2.5.4 genauer eingegangen. Wegener *et al.* (2017) weisen beispielsweise darauf hin, dass sich bisher pflanzenbauliche Produktionssysteme an die für die Bewirtschaftung notwendige Technik angepasst haben. Mit neuen Entwicklungen wie *Digital Farming* sei es aber nun möglich, die Technik an die optimalen pflanzenbaulichen Erfordernisse anzupassen und gleichzeitig die Landschaft in die Gestaltung von nachhaltigen Produktionssystemen miteinzubeziehen“. Als ein Beispiel nennen die Autoren den Anbau im Dreiecksverband (mit gleichem Pflanzabstand in jeder Richtung) statt in Reihenkultur (Drillsaat). Neben der Maximierung des Standraums der Einzelpflanze ergäben sich dadurch auch verringerte Pflanzenschutzmaßnahmen: Indem weniger Saatgut je Fläche ausgebracht werden muss, wird auch weniger Beizmittel ausgebracht. Eine gleichmäßigere Bestandsentwicklung unterdrückt Beikräuter und eine mechanische Beikrautbekämpfung wird erleichtert, da in unterschiedlichen Richtungen um die Kulturpflanzen herum gearbeitet werden kann. Ein Beispiel aus der Praxis bildet GeoSeed für den Rübenanbau (Kverneland Group 2023).

2.5 Digital Farming

Digitalisierung bezeichnet einen durch Veränderungen hervorgerufenen Prozess, der auf der Einführung digitaler Technologien bzw. der darauf aufbauenden Anwendungssysteme basiert. Das BMEL beschreibt in seiner Broschüre „Digitalisierung in der Landwirtschaft. Chancen nutzen – Risiken minimieren“ (BMEL 2021a) *Precision Farming* und *Smart Farming* als technische Entwicklungen, die seit mehr als zwei Jahrzehnten in der Praxis der Landtechnik eingesetzt werden. Im Positionspapier „Digitale Landwirtschaft“ der DLG (DLG, 2018) werden die Begriffe *Precision Farming*, *Smart Farming* und *Digital Farming* wie folgt voneinander abgegrenzt. Das Ziel von *Precision Farming* ist die Optimierung von Wachstumsbedingungen mittels Sensorik und genauer Applikationstechnik, *Smart Farming* entwickelt dieses Konzept weiter bis hin zur automa-

tisierten Entscheidungsunterstützung durch Datenfusion. Die Konzepte des *Digital Farming* basieren auf der konsequenten Anwendung von *Precision* und *Smart Farming* und der internen und externen Vernetzung des Betriebes. „*Digital Farming*“ bzw. „digitalisierte Landwirtschaft“ wird in diesem Gutachten daher als Überbegriff verwendet.

Wichtige Komponenten der Digitalisierung sind **Sensorik**, **Robotik** und **Big Data** mit Methoden der künstlichen Intelligenz (KI) zur Erfassung und Analyse großer Datenmengen, der Weiterentwicklung von Prognosemodellen und der Maschinensteuerung bis hin zum Einsatz autonomer, schwarmintelligenter Systeme (**Internet of Things**).

Unter **Sensorik** in diesem Kontext wird berührungslose, aber auch berührende und invasive Messung und Analyse auf unterschiedlichen Skalenebenen und die Einbindung in ein Übertragungsnetzwerk verstanden. Sensoren können z. B. den Wasser- und Nährstoffbedarf oder den Krankheits- und Schädlingsbefall von Pflanzenbeständen oder einzelnen Pflanzen erfassen.

Weit verbreitet sind mittlerweile sensorunterstützte Technologien im Bereich der Düngung, wie der N-Sensor (Yara 2021) für die Stickstoffdüngung oder der Nah-Infrarot-Sensor (NIR-Sensor) bei der Gülleausbringung (Rubenschuh & Volz 2019). Durch eine optimierte Versorgung der Pflanzen sollte eine höhere Widerstandskraft gegen Konkurrenten, Krankheiten und Schädlinge entstehen und somit die Notwendigkeit von Pflanzenschutzmaßnahmen geringer werden. Eine Auswirkung auf den Einsatz von Pflanzenschutzmitteln kann auch dadurch erfolgen, dass bei einer gezielteren N-Düngung eine Verschiebung des Artenspektrums der Begleitflora zu erwarten ist, da die Restfläche deutlich weniger Stickstoffgaben erhalten wird.

Im Bereich Pflanzenschutz sind sensorbasierte Applikationen meistens im optischen und multispektralen Bereich zu finden (bisher noch eher selten auch im hyperspektralen Bereich), also z. B. bildbasierte Methoden zur Unterscheidung zwischen Nichtziel- und Zielpflanzen. Hier haben fast alle etablierten Landmaschinenanbieter Anwendungen im Portfolio. Insbesondere die Kombination mit einer auf künstlicher Intelligenz (KI) basierten Erkennungssoftware erlaubt die zielgenaue Steuerung von chemisch/technisch/mechanischen Applikationen am Schlepper. Ob physikalische Beikrautentfernung oder gezielte Applikationsdüsen, das Prinzip ist immer eine optische, automatisierte Unterscheidung zwischen Ziel- und Nichtzielpflanzen oder die Eingrenzung der Applikationen auf Teilflächen, um Abdrift und andere unerwünschte raumzeitliche Ungenauigkeiten zu minimieren. Rajmis *et al.* (2020) verweisen auf verschiedene Studien, die durch *Precision Farming* Einsparungen von Herbiziden von mindestens 30 % und im Einzelfall von bis zu knapp 90 % erreicht hätten. Im Schnitt lag die Einsparung bei ca. 50 %.

Nach Schätzungen (De Witte *et al.* 2017) können 30 bis 70 % der Herbizidanwendungen durch den sinnvollen Einsatz von **Kleinrobotern** für mechanische Beikrautbekämpfung ersetzt werden. Bei Fungiziden und Insektiziden kann die Aufwandmenge um bis zu 40% reduziert werden (Rajmis *et al.* 2020). Um die Vielzahl der zum Teil systemimmanenten Beschränkungen von Kleinrobotern (Energieversorgung, Feldgängigkeit, Kosten, Logistik, Arbeitsgeschwindigkeit, Diebstahlgefahr, Prozessüberwachung, Arbeitssicherheit) schlagen andere Autoren vor, die **robotischen Systeme** ähnlich großen Hacksystemen und Erntefliegern weiterhin an größere Trägersysteme zu koppeln, aber alle Vorteile der autonomen Robotiksteuerung nutzen zu können. Dabei können sich unterschiedliche Kontrolltechniken in der Flächenbehandlung (z. B. zwischen den Reihen) und Präzisionsbehandlungen (in der Reihe) sinnvoll ergänzen. Eine kombinierte Bearbeitung durch Großgeräte mit variablen Applikationsgeräten und kleinskalierten Robotersystemen wird zukünftig standortspezifische Lösungen ermöglichen. Das Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) fördert seit 2021 das Verbundvorhaben "Optimierung chemisch-mechanischer und mechanischer Unkrautbekämpfung in Reihenkulturen (Opti-

Kult)", in dem für den Rübenanbau untersucht wird wie praktikabel neue Verfahren, insbesondere autonome Feldrobotik unter Praxisbedingungen sind und welche Herbizideinsparungen tatsächlich realisiert werden können (BMEL 2021c).

Einzelne Landmaschinenhersteller haben die Einzelpflanzenbehandlung auf allen Anwendungsebenen zum Ziel, beginnend bei der zentimetergenauen Einmessung bei der Aussaat bis hin zur einzelpflanzenbezogenen Düngung (Dr.-Ing. Peter Pickel, John Deere GmbH & Co. KG, European Technology Innovation Center, pers. Mitteilung 2019). Die Einzelpflanzenenerkennung wird als zukunftsweisende Technologie eingeschätzt, in der es jedoch noch eine Weile dauern wird bis sie in größerem Ausmaß in der Praxis umsetzbar sein wird und auch viele Landwirte davon profitieren können (terraHORSCH 2020). Es stellt sich die Frage, inwieweit derartige Einzeloptimierungen in Agrarökosystemen mit Millionen von Pflanzen tatsächlich agrarökonomisch und ökologisch sinnvoll und wirtschaftlich umzusetzen sind. Sicherlich hängt dies vor allem von der Kultur ab und lässt sich beispielsweise bei Rüben leichter umsetzen als im Getreide.

Ein wichtiger Teil der Digitalisierung in der Landwirtschaft ist die Verbindung von Datenerfassung, Datenmanagement und Landtechnik (**Big Data**) mit den Möglichkeiten der Sensorik und das georeferenzierte Abspeichern dieser Daten in einer (oder mehreren) *Cloud(s)*. Zugang und Nutzung dieser Daten durch Feldroboter erlaubt Pflanzenschutzkonzepte, die bedarfsgerecht nur noch dort Pflanzenschutzmittel anwenden, wo sie notwendig sind. Besonders bei Pilzkrankungen, aber auch bei Schadinsekten ist jedoch zu beachten, dass der sichtbare Schadensbereich oft deutlich kleiner ist als der Befallsbereich. Dies wird künftig durch multispektrale oder hyperspektrale Erfassungssysteme kompensiert werden können. Erste vielversprechende Forschungsvorhaben in diesem Kontext laufen, z. B. Detektion von Apfeltriebsucht und Birnenverfall mit Hilfe von Satellitenbildern und Hyperspektralanalyse und ihrer Analyse mittels Methoden des Maschinellen Lernens (Maresch 2020).

Im Folgenden werden Beispiele für Anwendungen des *Digital Farming* auf oben aufgeführte chemische, biologische, physikalische und vorbeugende Pflanzenschutzmaßnahmen (2.1 – 2.4) gegeben, die voraussichtlich großen Einfluss auf den Pflanzenschutz der Zukunft haben werden. Es sei darauf hingewiesen, dass Sensorik, Robotik und *Big Data* selten isoliert angewendet werden, sondern in der Praxis immer mehr als Kombinationen und „Komplettpakete“ zum Einsatz kommen.

2.5.1 **Digital Farming** und Chemischer Pflanzenschutz

Digitalisierung bietet verschiedene Möglichkeiten, den Einsatz von Pflanzenschutzmittel zu optimieren, sei es, dass die Belastung von Nicht-Zielflächen oder Gewässern verringert wird (neue Methoden der Risikominderung), sei es, dass im *Precision Farming* die Anwendungsmengen direkt reduziert werden. Spritzventile können bereits heute schon einzeln angesteuert werden und ermöglichen damit, die Sprühmenge präzise zu bestimmen, z.B. mittels der CAN-Verteilerleitungen (Turck 2021)

Eine automatische **Reduktion von Spraydrift-Emissionen** ist durch die „Intelligente Spritze“ schon heute möglich. Auf der Maschine installierte Windsensoren steuern Applikationsdüsen, um dadurch windbasierte Abdrift auf Nichtzielflächen zu minimieren oder Abstände zu Nichtzielflächen automatisch einzuhalten. Es gibt verschiedene privat und öffentliche Projekte, z. B. das Projekt NatShield (von BASF und Helm), oder das Projekt PAM (Pesticide Application Manager von ISIP/Zepp), die beide später in diesem Kapitel genauer beschrieben werden.

Runoff-Einträge in Gewässer können vermieden werden, in dem bei der Behandlung das Bodengefälle, die Gewässernähe und das Vorhandensein *Run-off*-verstärkender und -verringender Strukturen automatisch berücksichtigt werden.

Im Idealfall erlaubt **Precision Farming** die artspezifische Erkennung einzelner Beikrautpflanzen oder von Schädlingen bzw. Krankheiten befallenen Nutzpflanzen und ermöglicht die Applikation von Pflanzenschutzmitteln auf einzelne Pflanzen. Durch die gezielte Applikation auf Teilflächen bis hin zu Einzelpflanzen lässt sich die Aufwandmenge von Pflanzenschutzmitteln je Fläche reduzieren und die somit die Effizienz steigern. Alle Verfahren zur spezifischen Erkennung von Beikraut- und Nutzpflanzen können jedoch problemlos auch gemeinsam mit robotisch basierten, nicht-chemischen Behandlungsverfahren eingesetzt werden.

Beispiele für technisch/mechanische Lösungen in Kombination mit chemischem Pflanzenschutz

Nachfolgend werden einige wenige Beispiele für technisch/mechanische Lösungen in Kombination mit chemischem Pflanzenschutz aufgelistet. Die Beispiele sind weitgehend aus Wegener (2020) entnommen. Dort wird ein detaillierter Überblick über verschiedene Ansätze zur Verringerung der Aufwandmengen von Herbiziden je Ackerfläche gegeben. Viele dieser mechanischen Lösungen „funktionieren“ auch ohne digitale Komponenten. Zunehmend werden aber zumindest Ortungsdienste zur Fahrspurunterstützung mit integriert, oft auch kartenbasierte Dienste (Schlagkarteien) integriert, weil dadurch die Effizienz der Systeme steigt und die Anwendung einfacher wird.

- ▶ **Bandspritzung** mit der Flächenspritze: Bandspritzen bestehen meist aus einem relativ kleinen 400 – 600 Liter fassenden Spritzbehälter. Druck wird mit einer Aufsteckpumpe erzeugt. In vielen Fällen kann auch eine bereits vorhandene Feldspritze verwendet und umgebaut werden. Diese Verfahren eignen sich für Pflanzen mit weiten Reihenabständen wie z.B. Zuckerrüben. Ob diese Variante sinnvoll ist, entscheidet eher eine grundsätzliche Systemfrage: in ökologisch sensiblen Gebieten bietet diese streifenweise Form der Beikrautregulierung den Vorteil eine Reduzierung der Wirkstoffmenge und -kosten. Allerdings überwiegen meist die Nachteile durch hohe Kosten für zusätzliche Technik und ein deutlich höherer Zeitaufwand für die Erledigung der einzelnen Anwendungen und für Wartungsarbeiten.
- ▶ **Pulsweitenmodulation (PWM)**: Nach Wegener (2020) ermöglicht PWM es, verschiedener Ausbringungsmengen bei annähernd gleichem Druck und gleicher Tropfengröße mit nur einem Düsenkaliber zu realisieren. Zusätzlich kann auch die **Anpassung der Ausbringungsmenge in Kurvenfahrten oder in Teilflächen** erfolgen. Nach Wegener (2020) hat das JKI mittlerweile mehrere Düsen/PWM-System Kombinationen geprüft und deren Funktionalität anerkannt (JKI 2019).
- ▶ **Teilflächenspezifische Behandlung von Ackerflächen**: Beispielsweise zielt das System *Smart Sprayer* (Entwicklung durch Amazone, Bosch und BASF) auf die teilflächenspezifische Applikation ab. Nach Wegener (2020) erfolgt „die Bilderfassung über eine Kombination aus LED- und Kamertechnik im Gestänge, die in definierten Abständen über die gesamte Arbeitsbreite angeordnet sind. Die Steuerung der Behandlung erfolgt durch einen Algorithmus, der erst bei Überschreitung einer vorgegebenen Anzahl an Unkräutern pro Flächeneinheit (Schadsschwellenprinzip) eine gezielte Applikation auslöst. Bei unsicherer Datenlage schaltet das System automatisch auf Flächenspritzen um.
- ▶ Einen weiteren Ansatz stellt das **Exact Apply Dual System** dar (Entwicklung durch John Deere). Dabei geht es um die unterschiedliche Behandlung der Flächen innerhalb von Reihenkulturen: zwischen den Reihen und in den Reihen. Während zwischen den Reihen beispielsweise ein Herbizid gespritzt wird, kann das System in den Reihen z. B. ein Fungizid oder Düngemittel ausbringen.“

- ▶ Neben diesen cloudbasierten Ansätzen, die eine Netzanbindung benötigen (online) zur teilflächenspezifischen Applikation werden nach Wegener (2020) „vermehrt auch *Unmanned Aerial Vehicle* (UAV, **Drohnen**) zur Erkennung von Unkräutern vor der eigentlichen Applikation eingesetzt. So arbeiten beispielsweise Amazone Dronelink oder Kuhn I-Spray auf Basis von Hyperspektralbildern sowie Bildanalyseverfahren mit selbstlernenden Algorithmen (*KI*) zwar ebenfalls cloudbasiert, um eine punktuelle Bekämpfung unerwünschter Unkräuter zu ermöglichen, aber im Vorfeld der eigentlichen Applikation (quasi offline). Dadurch entsteht zwar ein zusätzlicher Arbeitsschritt; die Problematik unkalkulierbarer Restmengen bei der online-Variante entfällt aber“.
- ▶ **Fahrgassenschaltung:** Wiederum nach Wegener (2020): „In vielen Betrieben werden Fahrgassen für spätere Pflegearbeiten bereits bei der Aussaat durch das Weglassen von Drillreihen gezielt angelegt, so dass dort keine Kulturpflanzen stehen. Allerdings ist dort die Gefahr des *Run-off* von Pflanzenschutzmitteln auf dem nackten Boden am größten. Um *Run-off* innerhalb der Fahrgassen zu reduzieren, stellt z.B. die Fahrgassenschaltung eine flexible Lösung für unterschiedliche Spur- und Reifenbreiten dar, (Bröring & von Hörsten 2019). Das System verspricht eine randscharfe Applikation zur Fahrgasse, so dass der Bestand gleichmäßig behandelt wird und die Fahrgasse gleichzeitig sauber ausgespart bleibt. Das System kann per Knopfdruck ein- und ausgeschaltet werden. Je nach praxisüblichen Reifen- und Arbeitsbreiten sind zudem Einsparungen an Pflanzenschutzmitteln in Höhe von etwa 3-5 % möglich“.

Für den **Fungizideinsatz** sind weitere erste serienreife Anwendungen erhältlich, insbesondere für eine teilflächenspezifischere Ausbringung der Fungizide, in Abhängigkeit vom Wachstumsverlauf der jeweiligen Bestände, erfasst durch die Blattmasse und den N- Gehalt (Agricon 2021). So wurden im Rahmen des Verbundprojektes "Zielflächenorientierte, präzise Echtzeit-Fungizidapplikation in Getreide" (Dammer *et al.* 2015) Echtzeit-Applikationstechnologien mit berührungssensoren für präzise Fungizidspritzungen in Getreide entwickelt wie z.B. das Entscheidungshilfe-System proPlant expert.classic bzw. die Internetversion proPlant expert.com, das geeignete Fungizide und Dosierungen für ein bestimmtes Infektionsszenario der acht wichtigsten Blatt- und Ährenkrankheiten von Winterweizen erlaubt.

Im Bereich **Insektizide** ist die Marktreife der Systeme noch deutlich weniger weit entwickelt. Hier wird meistens eine Kombination von Prognosemodellen gekoppelt mit Sensortechniken, die Schädlinge während der Überfahrt (*on the fly*) erkennen, oft auch kombiniert mit einer vorherigen oder zeitgleichen Drohnenbefliegung.

Eine bundesweite Entwicklung mit dem Ziel der Driftreduzierung ist das Projekt **PAM (Pesticide Application Manager)** der Zentralstelle der Länder für EDV-gestützte Entscheidungshilfen und Programme im Pflanzenschutz (ZEPP). Dieses wurde in mehreren aufeinanderfolgenden Teilprojekten von der Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung (BLE) und dem Projektträger Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung (PT BLE) gefördert und entwickelt (ZEPP 2021):

- ▶ PAM (Laufzeit 2013–2016): Die Planung und Umsetzung von Pflanzenschutzmittelanwendungen, die Einhaltung von Abstandsauflagen zu Fließgewässern und terrestrischen Saumstrukturen und deren Dokumentation liegen in der Zuständigkeit des Fahrers, der die Pflanzenschutzmaßnahme durchführt. Das Ziel des Projektes war es, Landwirte präzise, dynamisch und automatisch bei Entscheidungen zu Pflanzenschutzmaßnahmen zu unterstützen. Diese Zusammenarbeit von Industrie und öffentlicher Beratung (JKI, ZEPP, KTBL, John Deere und BASF) steht im Dienst der Interessen der praktischen Landwirtschaft, da mit PAM Ge-

lände-, Maschinen-, Hersteller- und Behördendaten in einem Software-System zusammengeführt werden, das dem Fahrer eine Entscheidungshilfe im Sinn eines optimalen Pflanzenschutzmitteleinsatzes zur Planung und Ausführung der jeweiligen Maßnahme liefert.

- ▶ Mit dem Nachfolgeprojekt PAMrobust (Laufzeit 2017–2018) entstand daraus ein Entscheidungshilfesystem, das schlag- und produktspezifische Abstandsauflagen in maschinenlesbaren Applikationskarten ausweist. Damit unterstützt PAM das Einhalten von Abstandsauflagen bei Pflanzenschutzmaßnahmen und entlastet durch automatisches An- und Abschalten der Spritze in Randbereichen den Fahrer.
- ▶ In PAM 3D werden zusätzlich hangneigungsbezogene Auflagen integriert.

Vergleichbare Leistungen bietet der Pflanzenschutz-Assistent *agrimentor* (Helm 2022): Die gekoppelte Software-Funktion **NatShield** ermöglicht seit September 2017 die automatische Einhaltung von Pflanzenschutzmittel-Abstandsauflagen beim Spritzvorgang. Das System erzeugt ISOBUS lesbare Schutzzonen, passend zu Tankmischung und Schlag. Die ISOBUS-Datentechnologie standardisiert die Kommunikation zwischen Traktoren und Anbaugeräten. NatShield berücksichtigt bis zu vier Schutzzonen-Typen in der damit verbundenen Ackerschlagkartei: Gewässer (Gewässerrandoberkante), Vegetation (terrestrische Saumstruktur), Siedlung und Habitat (Ausschlussflächen am Ackerrand oder innerhalb einer Ackerfläche wie Blühstreifen oder Feldlerchenfenster). Das notwendige Datenmanagement ist in der „Myfarm24-Schlagkartei“ (Helm 2022) integriert. Mit NatShield können Landwirte automatisiert Pflanzenschutzmittel-Abstandsauflagen einhalten und Habitate, die keine zulassungsrelevanten Abstandsauflagen haben, beim Spritzen auslassen (Böhrsen 2015, Deter 2017).

Weitere Möglichkeiten, Umweltauswirkungen von Pflanzenschutzmitteln zu reduzieren, können unter dem Begriff landschaftsbezogene Maßnahmen zusammengefasst werden und werden in Abschnitt 2.5.4 unter vorbeugende Maßnahmen behandelt.

Die Effizienz von *Digital Farming*, insbesondere *Precision Farming*, für die Reduzierung des Pflanzenschutzmitteleinsatzes wird teilweise sehr stark in Frage gestellt. Beste (2021) spricht von „Einsparungen in minimaler Größenordnung“, weil: „Präzisionstechnik liefert Einsparungen < 5 Prozent bei Pestiziden und Düngemitteln.“ Diese Aussage scheint jedoch auch einem Missverständnis zu beruhen, da in dem zu Grunde liegenden Bericht nur auf eine Schätzung von Landwirten verwiesen wird, dass durch Parallelfahrssysteme 1 - 6 % Kraftstoff und Pflanzenschutzmittel eingespart werden (De Witte *et al.* 2016). Die Ersparnis bezieht sich daher alleine auf den Vergleich manuelles Fahren und automatisiertes Parallelfahren bei der Applikation von Pflanzenschutzmitteln und umfasst nicht z. B. Applikation nur auf Teilflächen oder Einzelpflanzen sowie Möglichkeiten der Digitalisierung für alternative, nicht-chemische Maßnahmen s. Im Pestizidatlas wird auf Fachliteratur (allerdings ohne genaue Referenzen) hingewiesen, die von bis zu 90 % Reduktion des Einsatzes von Pflanzenschutzmitteln durch Digitalisierung ausgeht (Holdinhausen 2022). Hampe (2021) verglich unter anderem die Kosten verschiedener Optionen (Feldspritze, Feldspritze und Drohne, *Spotspraying* mit Traktor und *Spotspraying* autonom) für Herbizidanwendung in Zuckerrübe. Durch *Spotspraying* wurde die Kosten für Herbizide (und damit auch die Aufwandmenge) im Vergleich zur üblichen Praxis halbiert. Andere variable und fixe Kosten stiegen zwar, aber dennoch ergab sich ein ökonomischer Vorteil von 40 – 60 € je Hektar Unkrautmanagement. Für Raps wurde eine Reduzierung der Herbizidaufwendungen zwischen einem Viertel und einem Drittel geschätzt. Mit Einzelpflanzenerkennung ergeben sich weitere Möglichkeiten, z. B. noch gezielter nach Schadschwellen zu arbeiten. Einen rentablen Einsatz im Getreidebau hält Hampe (2021) jedoch noch nicht für absehbar, weil die Unterscheidung von Beigräsern und Getreidepflanzen im frühen Wachstumsstadium noch Probleme bereite. Eine solche Abschätzung für konkrete Anwendungen ist aus Sicht der Gutachter zielführender

als Abschätzung des Einsparpotentials an Pflanzenschutzmitteln durch Digitalisierung insgesamt, da die Einsparung beim Einsatz von Pflanzenschutzmitteln stark von der konkreten Anwendung (welche Mittel in welcher Kultur) abhängt und die Auswirkung der Digitalisierung insgesamt auf die Notwendigkeit des chemischen Pflanzenschutzes noch schwerer abzuschätzen ist.

2.5.2 *Digital Farming* und biologische / biotechnische Pflanzenschutzmaßnahmen

Die Möglichkeiten der Digitalisierung für die Anwendung von biologischen Pflanzenschutzmitteln, die wie chemische Mittel appliziert werden, sind prinzipiell dieselben wie für chemische Maßnahmen und werden daher hier nicht separat aufgeführt.

Aber auch der Einsatz von Nützlingen kann von neuen Techniken profitieren. Beispielsweise bietet ein Agrarhändler eine biologische Lösung zur Bekämpfung des Maiszünslers mit Schlupfwespen an (BayWa AG 2021). Mit Hilfe einer Drohne wird die betroffene Maisfläche während des Befallszeitraums befliegen und in regelmäßigen Abständen werden Kapseln mit Schlupfwespen (*Trichogramma*) auf dem Feld ausgebracht. Diese parasitieren die Eigelege des Maiszünslers, wobei nach Herstellerangaben eine Erfolgsquote von bis zu 70 % erreicht (BayWa AG 2021). Die Behandlung wird vom Landwirt als Dienstleistung gekauft und kann in Baden-Württemberg und Bayern mit 60 bzw. 50 € / ha gefördert werden.

Sensorik und *Big Data* zur genaueren Erkennung und Vorhersage von Krankheiten oder Schädlingsbefall erlauben unabhängig von der Art der angewandten Pflanzenschutzmaßnahme eine gezieltere Bekämpfung und würden daher auch die Effizienz von biologisch / biotechnischen Maßnahmen erhöhen.

2.5.3 *Digital Farming* und physikalische Pflanzenschutzmaßnahmen

Es existieren mittlerweile zahlreiche Lösungen der “digitalisierten” Bodenbearbeitung zur **Reduzierung von Beikräutern**. Nahezu alle Systeme beruhen dabei auf einer Kombination von optischer Erfassung mittels bildgebender Verfahren (Kamerasystem), einer zwischengeschalteten Erkennungssoftware (meistens auf KI- Basis) und der nachfolgenden zielgerichteten Bodenbearbeitung.

Weit verbreitete Systeme sind **automatische Hackgeräte**, die mithilfe von Kamerabildern die Position von Kulturpflanzen berechnen und sorgfältig und genau um diese herumhacken (z. B. IC-Weeder, Steketee 2020). Das Gerät kann laut Hersteller für alle in Reihen stehenden Grünpflanzen eingesetzt werden. Für andere Pflanzen wie z.B. Radicchio sind Erweiterungsmodule erhältlich. Damit unter allen Bedingungen gut gearbeitet werden kann, werden unterschiedliche Hackmesser angeboten. Außerdem kann eine Reihenspritzung und sogar eine pflanzenspezifische Spritzung eingerichtet werden. Für Aufnahmen, die beim Hacken gemacht werden, werden Module angeboten, mit denen Pflanzen gezählt werden können, die Oberfläche des Pflanzengrüns gemessen und die Verfärbung von Pflanzen bestimmt werden kann (Steketee 2020).

Ein weiteres Beispiel ist das Projekt „Zukunft live – Unkrautroboter im Feld“, in dem verschiedene **Robotersysteme zur Beikrautbekämpfung** in Zuckerrüben erfolgreich im Feld getestet wurden (KWS 2020). In diesem Projekt wurden Systeme unterschiedlicher Hersteller in ökologisch und konventionell bewirtschafteten Betrieben in Wiebrechtshausen und Wetze auf den Zuckerrübenschlägen im Einsatz verglichen. Ein Feldroboter erfasst bei der Aussaat den Ablageort des Saatgutes digital und entfernt die Unkräuter später mechanisch rund um die Zuckerrübenpflanze (FarmDroid). Das System von *farming revolution* unterscheidet Beikräuter von Zuckerrüben mit Hilfe eines Kamerasystems und steuert auf dieser Grundlage seine mechanischen Tools zur Beikrautentfernung. Allerdings seien aufgrund unterschiedlicher Feldbedingungen in

verschiedenen Jahren mehrjährige Versuche nötig. Ziel sei es, die Einsatzmöglichkeiten der einzelnen Systeme objektiv zu bewerten und Landwirten damit Perspektiven für eine nachhaltige Beikrautkontrolle bei Zuckerrüben aufzuzeigen (AgE 2020). Allerdings sind die meisten mechanischen Lösungen in Kombination mit Sensorik und Robotik nur für ausgewählte Kulturen verfügbar, insbesondere für Gemüsebau und bei Zuckerrüben (MASKOR Institut 2021, Eppenberger 2020).

Andere physikalische Beikraut- und Schädlingsbekämpfungsmaßnahmen beruhen auf dem Einsatz von **Licht, Hitze, Strom, UV-Licht, Laser oder Druck** (mechanisch). Auch hier ist eine Kombination einer optischen Erfassung mittels bildgebender Verfahren (Kamerasystem), einer zwischengeschalteten Erkennungssoftware (meistens auf KI-Basis) und der nachfolgenden zielgerichteten Behandlung die Regel. Als Beispiel sei hier ein von der DBU (Deutsche Bundesstiftung Umwelt) 2018 vergebenes Forschungsvorhaben für die Entwicklung eines laserbasierten Verfahrens erwähnt (DBU 2018): Die laserbasierte Beikrautbeseitigung zeichnet sich dadurch aus, dass die Strahlung schnell und präzise auf einzelne, ausgesuchte Pflanzen gerichtet werden könne, Kulturpflanzen oder Tiere aber nicht beeinflusst würden. Dabei werde das sensible Wachstumszentrum „verschmort“ (C. Marx, in DBU 2018). So könnten die Beikräuter einzeln und damit selektiv bekämpft und eingesetzte Ressourcen, in diesem Fall Strom, optimal dosiert werden. Gegenüber der Herbizidanwendung falle zudem der Einsatz von Hilfsstoffen, wie Wasser, Lösemitteln oder Emulgatoren, weg. Resistenzen wie bei chemischen Wirkstoffen bildeten sich nicht. Im Projekt soll zunächst ein prototypischer Demonstrator entwickelt und verschiedenen pflanzenbaulichen Unternehmen zur Verfügung gestellt werden. Es wird erwartet, dass diese zielgerichtete nicht-chemische Beikrautbekämpfung eine erfolgversprechende mittelfristige Marktrealisierung erwarten lässt (A. Bonde, DBU, in DBU 2018). Derartigen Laserverfahren werden interessante Einsatzoptionen eingeräumt, wenn ihre hohe Präzision in der Reihe (bei relativ geringer Flächenleistung) mit weiteren Systemen mit geringerer Präzision aber höherer Flächenleistung zwischen den Reihen kombiniert wird.

In Bezug auf die Weiterentwicklung von Verfahren mit Strom erklärt ein Hersteller, dass elektro-physikalische-Verfahren mit minimierten Spannungen eine hervorragende Basis bilden würden, um möglichst spät im Voraufbau noch sicher behandeln zu können. Damit könne man auch nach Aufgang der Saat möglichst dicht seitlich oder höhenselektiv von oben auch noch an leicht verholztes Beikraut wie weiße Melde und Gänsefuß herankommen und gleichzeitig die Kulturpflanzen schonen. Ob solche Anwendungen zwischen den Reihen dann mit Sensortechnik und Robotik auch in die Reihen übertragen wird oder ob es Kombinationen mit chemischen Methoden, Lasern oder Hackoptionen geben wird, würden dann die einzelnen Anwendungsfälle zeigen. Der Wegfall selektiver Herbizide und Herbizidmischungen erfordere speziell zugeschnittene innovative Ersatzlösungen. Während viele chemische Herbizide nur gegen kleine Beikräuter einsetzbar seien, ohne die Zuckerrüben zu schädigen, könnten Alternativverfahren deutlich weniger präventiv auch bei größeren Beikräutern eingesetzt werden. Orts- und höhenselektive Anwendungen und geeignete elektrohybride Flüssigkeiten seien bereits jetzt in der Lage, die Schwelle der bekämpfbaren Beikrautstadien deutlich nach oben zu verschieben (M. Eberius, Crop.Zone, pers. Mitt. 2020).

Physikalische Maßnahmen in Verbindung mit Sensorik, KI und Robotik sind auch als **Alternative zu Insektiziden, Molluskiziden oder Fungiziden** möglich. Durch bodenschonende Bearbeitung und Mulchen können Schnecken zu einem Problem werden. Im Forschungsprojekt Msr-Bot (Projekt des JKI, der Universität Kassel und der Firma KommTek) wurde ein „Schneckenroboter“ entwickelt, um Nacktschnecken zu erkennen und zu töten (FarmDemo 2017). Die Ergebnisse nach drei Jahren Entwicklungsarbeit sind vielversprechend, aber eine schnelle Serienreife

wird nicht erwartet (Böhrnsen 2019). Vor dem Einsatz in der Praxis ist eine Erprobung im Feldversuch und daraus folgende weitere Konstruktionsschritte notwendig und für einen Prototyp fehlen noch Sicherheitssysteme zur Umgebungsüberwachung, Programmierschnittstellen und eine Benutzerschnittstelle (Höing 2020). Ähnliche Verfahren zur Bekämpfung von Käfern oder Raupen sind denkbar, aber nicht bekannt.

Ein amerikanisches Start-up hat einen Roboter entwickelt, um echten und falschen Mehltau im Wein mit UV-Strahlung zu bekämpfen (Wein.plus 2020). Die Roboter fahren dazu nachts autonom durch die Rebstöcke und bestrahlen die Rebzeilen. Laut der Meldung in Wein.plus soll der Roboter Ende 2020 vom norwegischen Hersteller Thorvald produziert und vertrieben werden. Auf der Internetseite der Firma Saga Robotics wird die Anwendung gegen Mehltau in Erdbeeren und Wein in Folientunneln, offenen Feldern und Weingärten beworben (Thorvald 2021). Der Roboter wird nicht verkauft, sondern gemietet (*farming-as-a-service*). Das Verfahren habe auf einem Weingut in Oregon Schwefelbehandlungen ersetzt und werde auf einem Weingut in Italien erprobt. Der Hersteller sieht das Potential Fungizide im Weinbau zu ersetzen und ca. 50 % der heutigen Fungizidkosten einzusparen (Thorvald 2021).

UV C Licht wurde auch als Mittel gegen Grauschimmelfäule (*Botrytis cinerea*) im Wein untersucht. Klärner *et al.* (2015) konnten Wirkungsgrade von bis zu 82 % erzielen. Bei den eingesetzten Geräten handelte es sich um Prototypen auf der Basis konventioneller Technik.

2.5.4 Digital Farming und vorbeugende Maßnahmen

Precision Farming erlaubt eine **optimale Versorgung der Nutzpflanzen** mit Wasser und Nährstoffen bei geringerer Förderung der Beikräuter als bei Flächenbehandlung und könnte so zu einer **höheren Resistenz** gegenüber Krankheiten und Schädlingen sowie zu geringerem Konkurrenzdruck durch Beikräuter führen.

Mischkulturen können auch im Ackerbau zu deutlich höheren Erträgen führen als Monokulturen wie in einem Projekt der ETH Zürich gezeigt wurde (Chen *et al.* 2021). Dabei können synergistische Effekte zwischen verschiedenen Nutzpflanzen oder Beipflanzen genutzt werden. Die höhere Vielfalt erlaubt eine bessere Ausnutzung der Ressourcen und Schädlingskontrolle (Rueg 2021). Ein klassisches Beispiel aus dem Gemüseanbau ist die Mischkultur von Möhren und Zwiebeln oder besser Lauch, welche den Befall mit Möhren oder Zwiebelnfliegen verringert (Jaksch 2018). Ein anderes Beispiel bildet Rainfarn, der Kartoffelkäfer vertreibt (Panasiuk 1984). Die meisten heutigen Maschinen sind allerdings für Monokulturen optimiert. Für Mischkulturen werden aber unter anderem Maschinen benötigt, die gleichzeitig verschiedene Nutzpflanzen ernten und das Erntegut trennen können (Rueg 2021). Sensorik und Robotik könnten nach Ansicht der Gutachter daher in Zukunft den Anbau von Mischkulturen erleichtern, sei es durch den Einsatz kleinskalierter und autonom agierender Roboter oder auch durch flexible robotische Werkzeuge an großen Trägerplattformen.

Monitoring, *Big Data* und landschaftsbezogene Analysen erlauben ein besseres **Management von Fruchtfolgen**, aber auch **von Nicht-Agrar-Habitaten** in der Agrarlandschaft, welche zur Nützlingsförderung beitragen können. Zudem können bessere **Landschaftsanalysen** und daraus abgeleitetes lokales Management auch zu **Milderung der Nebenwirkungen von Pflanzenschutzmaßnahmen** dienen. Zum einen erlauben sie die Identifikation und den Schutz von Hotspots im Sinne von Nichtzielflächen, die besonders durch PSM-Einträge wie *Spraydrift* oder *Run-off* gefährdet sind (UBA-Vorhaben *Georisk*, Kubiak *et al.* 2014) oder die oben erwähnten Möglichkeiten der „Intelligenten Spritze“. Durch Landschaftsmanagement (z. B. Heckenpflanzung, Gewässerrandstreifen) können die *Hotspots* dann gezielt entschärft werden. Zum anderen können Flächen identifiziert und im Hinblick auf höhere Diversität der Agrarlandschaft aufgewertet

werden, die ohne große wirtschaftliche Einbußen aus der Nutzung genommen werden können oder nicht in Nutzung sind, aber als Flächenressource zur Verfügung stehen, wie z. B.: die Projekte F.R.A.N.Z, EfA oder die „Eh da“ Initiative zeigen (Deubert *et al.* 2016, Merck 2021, Künast *et al.* 2019, Thomas und Ullrich 2022, DLR Rheinpfalz 2022). Zusätzlich können die Effekte einer Aufwertung auf Landschaftsebene bewertet werden, wie im Projekt *RiskMin* (Trapp *et al.* 2020) beispielhaft gezeigt wurde. Auch das Kleinstrukturverzeichnis des JKI kann als Beispiel einer solchen landschaftsbezogenen Betrachtung dienen (JKI 2021).

Kleinskalierte Anbausysteme können die Entstehung und das Ausmaß von *Run-off* reduzieren helfen. Wenn dort, wo *Run-off* entsteht, anders bewirtschaftet wird, als auf der Restfläche und dadurch konzentrierter Abfluss verhindert wird, stellt sich die Frage, ob dann die bisherige Bewertung verändert werden muss (Beispiel UBA-Vorhaben *GERDA*, Kopplung der bisherigen Modelle mit VFSMod: Bach *et al.* 2016, 2017a, 2017b).

Teilschlagspezifische Vorhersagen des Auftretens von Schaderregern und Pilzerkrankungen werden zukünftig von verbesserten raumzeitlich hochauflösenden Prognosemodellen, auch in Kopplung mit *Big Data*, geleistet, und damit Zeitpunkt und Menge der zu applizierenden Substanzen verringert. Ein Beispiel liefert das Projekt *DapaPlant* zur frühzeitigen Erkennung der Blattfleckenkrankheit der Zuckerrübe mithilfe von Licht, Sensoren, Wetterdaten und künstlicher Intelligenz (KWS 2022). Entwicklung zur Detektion von Krankheiten im Obstbau mit Hilfe von Satellitenbildern und Hyperspektralanalyse und ihrer Analyse mittels Methoden des Maschinellen Lernens beschreibt Maresch (2020).

2.5.5 Plattformbasierte Systeme

Nahezu alle großen Firmen im Bereich Pflanzenschutz vollziehen aktuell eine Entwicklung weg von der reinen Zurverfügungstellung von Pflanzenschutzmitteln hin zu einer plattformbasierten Dienstleistung, die vom Verkauf von Pflanzenschutzmitteln über die Nutzung ganzheitlicher, cloudbasierter Pflanzenschutzberatung bis hin zu einer garantierten Erntemenge reicht, wenn alle Arbeiten und Anwendungen nach den Regeln der jeweiligen Anbieter erfolgen. Weit fortgeschritten ist hier die Entwicklung der Firma Bayer, die nach der Übernahme von Monsanto beim Saatgut beginnt und bei der Vermarktung der Ernte endet (Anwendungen vorwiegend in den USA und Südamerika, basierend auf den Entwicklungen der Firma Monsanto, Baumann 2017).

Diese Entwicklung ist geprägt von einer enorm hohen Innovationsgeschwindigkeit und sich ständig ändernden Randbedingungen und Kooperationen, die eine Bewertung erschweren und teilweise unmöglich machen. Nachfolgend werden einige bereits etablierte Plattformen näher beschrieben. Die Liste ist nicht vollständig, soll aber das Potential im Bereich *Digital Farming* und Pflanzenschutz aufzeigen.

Nach Horstmann (2020) war 2019 das Jahr der Vernetzung landwirtschaftlicher Lösungen. Nahezu alle Marktteilnehmer haben erkannt, dass Vernetzung und die Digitalisierung der Landwirtschaft ein Türöffner für Innovationen sind. Maschinen mit Telemetrie-Modulen, Terminals mit *Online-Connectivity* und moderne webbasierte landwirtschaftliche Anwendungssoftware ermöglichen die effiziente Planung, Steuerung und Nachkalkulation landwirtschaftlicher Arbeiten. Viele Maschinenhersteller haben sich durch eigene Portale (z. B. „my-NAME“, mykrone.green) im Hinblick auf die Digitalisierung, Geschäftsmodelle und das eigene Dienstleistungsangebot deutlich aufgestellt. Maschinendaten, Telemetrie, Dokumentation, Service und digitale maschinenbezogene Dienste wachsen ständig und entwickeln sich zum gewohnten Funktionsumfang einer Landmaschine. Die Forderung nach offenen, einfachen und übergreifenden Lösungen weitet sich

permanent aus. Zudem verschärfen sich gesetzliche Anforderungen für den Datenschutz; die Dokumentationsauflagen in der Landwirtschaft werden immer größer und Arbeitsprozesse komplexer (Horstmann 2020).

Die Nutzung und Akzeptanz der oben aufgeführten Technologien bei Landwirten und Lohnunternehmern bzw. Maschinenringern ist abhängig von der Akzeptanz der digitalen Infrastruktur und hängt von der jeweiligen Marktdurchdringung ab. Gleichzeitig haben derartige Plattformen direkte Auswirkungen auf den Einsatz von Pflanzenschutzmitteln und deren Umweltrisiko, indem z.B. Abstandsaufgaben dem Landwirt direkt vorgeblendet werden (Beispiel Geoboxviewer in Rheinland-Pfalz, DAP (2021)) und damit weiteren digitalen Bearbeitungen zur Verfügung stehen (z. B. PAM oder NatShield, wie oben aufgeführt). Zukünftig können damit auch schlagübergreifende Anwendungen, z.B. das Management in einem Wassereinzugsgebiet, infrastrukturell unterstützt werden, was die Umweltgefährdung beim Einsatz von Pflanzenschutzmitteln weiter reduzieren kann.

Es folgt eine beispielhafte Kurzvorstellung einiger bereits operativer industrieller und öffentlicher Plattformen.

Im September 2019 öffneten Claas, John Deere und 365FarmNet ihre *Clouds* für die jeweils anderen, was als bemerkenswerter und für viele Marktbeobachter unerwarteter Paradigmenwechsel zu bewerten ist. Damit können Landwirte und Lohnunternehmer mit gemischten Fahrzeugflotten per DataConnect von einer Plattform oder einem Portal auch die Daten von Maschinen der jeweils anderen Datenplattform aufzeichnen, verarbeiten und dokumentieren. So müssen sie nicht mehr zwischen den verschiedenen Plattformen der Hersteller wechseln. Die Daten werden weiterhin auf der jeweiligen *Cloud* abgelegt, also im John Deere Operations Center, bei Claas Telematics oder bei 365FarmNet. DataConnect nutzt eine direkte *Cloud-to-Cloud*-Verbindung zwischen der John Deere Einsatzzentrale und den Plattformen Claas Telematics und 365FarmNet, um die Verwaltung für die Präzisionslandwirtschaft mit gemischten Flotten zu vereinfachen. Weil Landwirte dank DataConnect keine Daten mehr manuell per USB-Datenspeicher übertragen müssen, können Sie alle Ihre Maschinen in Echtzeit über eine einzige Plattform verwalten, die John Deere Einsatzzentrale (Feuerborn 2019).

Eine weitere herstellerübergreifende Entwicklung aus der Wirtschaft ist die neue Datenaustauschplattform AgriRouter (DKE-Data GmbH & Co KG, 2021). Sie ermöglicht Landwirten und Lohnunternehmern den Austausch von Daten zwischen Maschinen- und Agrarsoftware-Anwendungen unterschiedlicher Hersteller. Die Anwendenden können sich ihre persönlichen AgriRouter Account kostenfrei anlegen und individuell zusammenstellen. Nur der Anwender oder die Anwenderin legt die Routen im Einstellcenter fest, auf denen seine Daten transportiert werden. Auch Bestandsmaschinen können durch am Markt verfügbare Telemetrie-Verbindungen mit einem AgriRouter Account verbunden werden. Auch die Software NEXT Farming^{LIVE} mit Karten von Talking Fields stellt eine branchenübergreifende Plattform mit Anwendungen dar, die dem Landwirt wesentliche Entscheidungsunterstützung liefert und damit zu einem ressourcenschonenderen Einsatz von Betriebsmitteln bis hin zur teilschlagspezifischen Applikation von Pflanzenschutzmitteln führen kann (FarmFacts GmbH, 2021).

Neben den Entwicklungen der Wirtschaft sind auch Verwaltung und Staat am weiteren Ausbau der Infrastruktur hinsichtlich Datennetze, *cloud*-basierter Lösungen und hybrider Systeme beteiligt. Hintergrund der Entwicklung staatlich betriebener Portale und Dienste ist, dass Landwirtschaft als Teil der kritischen Infrastruktur definiert ist und deshalb besonderer Betrachtung bedarf, wenn es um die Anwendung neuer Technologien geht. Im Gesetz über die Sicherstellung der Grundversorgung mit Lebensmitteln in einer Versorgungskrise und Maßnahmen zur Vor-

sorge für eine Versorgungskrise (BMJ 2020) wurde Landwirtschaft als krisenrelevante Infrastruktur definiert. Somit fällt im Falle einer Krise dem Staat die Aufgabe zu, für die Versorgung der Bevölkerung zu sorgen.

Die *GeoBox*-Infrastruktur (GBI) dient als Beispiel staatlicher Plattformen und wird nachfolgend genauer beschrieben, da dieses Projekt im Auftrag der Agrarministerkonferenz den offiziellen Auftrag bekommen hat, eine solche staatliche Plattform bundesweit zu entwickeln und umzusetzen. Eine Ländervereinbarung zum gemeinsamen Betrieb der GBI wurde aktuell von sechs Bundesländern unterschrieben (Stand 02/2021). Dabei ist die *GeoBox*-Infrastruktur ein essentieller Baustein des Digitalen Agrarportals, der es den landwirtschaftlichen Betrieben ermöglichen wird, herstellerunabhängig die für den Betrieb notwendigen digitalen Daten mit den beteiligten Akteuren auszutauschen (DAP 2021). In den Forschungsvorhaben *GeoBox* I und II (gefördert durch BMEL) geht es deshalb auch um die grundsätzliche Fragestellung, wie die Resilienz der Landwirtschaft durch gebrauchstaugliche und interaktive Systeme gestärkt werden kann. Etwa sollte die Offlinefähigkeit, also die Möglichkeit des Datenaustausches während eines Infrastrukturausfalles, gewährleistet sein, um die Resilienz branchenweit zu stärken. Mit der *GeoBox*-Infrastruktur soll dies erfüllt werden und zudem Wert auf eine Akzeptanz seitens der Anwendenden gelegt werden, beispielsweise durch sinnvolle Nutzerinnenführung und transparente Funktionsweise. Konkret wird damit für die Betriebe in Rheinland-Pfalz eine zentrale Informations-, Kommunikations- und Datenaustauschplattform aufgebaut, das Digitale Agrarportal Rheinland-Pfalz (RLP), damit die Betriebe über eine einzige Webadresse alle vorhandenen Informationen und Daten der Behörden und Institutionen der Agrarverwaltung erhalten können. Über das Portal www.dap.rlp.de erfahren die Betriebe eine Entlastung von verwaltungstechnischen Prozessen und ein verbessertes Beratungsangebot der Agrarverwaltung. Werden die Möglichkeiten derartiger staatlicher Plattformen sowohl als Beitrag zur technischen Infrastruktur als auch als Verbesserung der Dateninfrastruktur zukünftig genutzt, ergeben sich im Kontext des *Precision Farming* und *Digital Farming* weitreichende Einsatzmöglichkeiten und Synergien die zur Ressourcenoptimierung im Bereich des Pflanzenschutzes führen.

Generell werden neue technische Möglichkeiten den Einsatz von Pflanzenschutzmitteln stark verändern, sowohl in Bezug auf Aufwandsmengen als auch auf Emissionen in Nicht-Zielflächen. Hierzu zählen feldspezifische Betrachtungen in Verbindungen mit einer *regulatory cloud*, die einen flexibleren Einsatz von PSM bei gleichzeitiger automatisierter Dokumentation und damit Kontrollierbarkeit erlauben. Vorstellbar ist, dass zukünftig eine standortspezifische Auswahl der zugelassenen Mittel und deren Auflagen direkt nach Eingabe aller Standortdaten und Maschinendaten als Entscheidungsunterstützung den Anwendenden zeitnah vorgeblendet wird und so die Kampagnenplanung unterstützt.

2.6 Zusammenfassung – Entwicklung des Pflanzenschutzes

Erste Aufgabe des Gutachtens war es, aktuelle Entwicklungen im Pflanzenschutz zu identifizieren und den Stand der Entwicklung darzustellen (Fragen 1 und 2 der Einleitung). Tabelle 12 fasst die als relevant erachteten Entwicklungen im Pflanzenschutz zusammen. Im chemischen Pflanzenschutz wird es weiterhin neue Wirkstoffe und Formulierungen geben, wenn auch voraussichtlich nicht mehr in dem Umfang wie bisher. Herbizide mit neuen Wirkmechanismen sind z. B. seit ca. 20 Jahren nicht mehr auf den Markt gebracht worden (Umetsu und Shirai 2020). Im Bereich der Formulierungen stellt die Verwendung von Nanomaterialien eine relativ neue Entwicklung dar. Des Weiteren wird ein Trend zu biologischen und biotechnologischen Pflanzenschutzmitteln prognostiziert (Olson 2015, zitiert in Umetsu und Shirai (2020)), da hier oft eine höhere Spezifität als bei chemischen Mitteln erzielt werden kann und zumindest in der

EU eine deutliche Reduzierung des Einsatzes chemischer Mittel angestrebt wird (Europäische Kommission 2020). Insbesondere RNAi-Pestizide stehen hier im Fokus neuer Entwicklungen.

Neben klassischen mechanischen Maßnahmen der Bodenbearbeitung stehen heute auch schon andere physikalische Verfahren der Beikrautbekämpfung zur Verfügung, z. B. mit Hilfe von Strom. Eine wichtige Säule des vorbeugenden Pflanzenschutzes stellt seit je her die Sortenwahl dar. Neue Verfahren des *Smart Breedings* und CRISPR/Cas-Techniken versprechen hier eine gezieltere und schnellere Bereitstellung von Pflanzen mit Resistenzen gegenüber bestimmten Pflanzenkrankheiten oder Schädlingen. GMPs mit PIPs (*Plant Incorporated Protectants*) gegen bestimmte Krankheiten oder Schädlinge sind ebenfalls eine vorbeugende Maßnahme.

Tabelle 12: Als relevant angesehene Entwicklungen im Pflanzenschutz ohne Digitalisierung

Kategorie	Ansatz	Entwicklung	Beispiele für neue Entwicklungen
Chemisch	Neue synthetische Pflanzenschutzmittel	Verkleinerung der Wirkstoffpalette Weniger neue Wirkstoffe, eher neue Formulierungen	Nanopestizide
Biologisch	Biopestizide	Zunahme von Biopestizide erwartet als Alternative zu chem. Pflanzenschutz	RNAi, Bt-Toxine oder andere Protein-basierte Biopestizide
Physikalisch	Beikrautbekämpfung	Alternativen zu mechanischen Verfahren (Bodenbehandlung)	Strom, Laser
	Pilzbehandlung	Alternative zu Fungiziden	UV-Licht
Vorbeugung	Sortenwahl	Neue Sorten mit Resistenzen und Abwehrmechanismen	GMPs mit PIPs oder durch CRISPR/Cas-Technik
	Anbauverfahren	Alternativen zu großen Schlägen und Fruchtfolgen mit nur wenigen Kulturpflanzen	Mischkulturen, <i>Spot-Farming</i>

Quelle: Eigene Darstellung Fraunhofer IME und RLP AgroScience

Eine stärkere Digitalisierung der Landwirtschaft durch Sensorik, Robotik und der Verarbeitung großer Datenmengen (*Big data*) wird alle Bereiche des Pflanzenschutzes betreffen (Tabelle 13). Gezieltere Applikation von chemischen und biologischen Pflanzenschutzmitteln durch Sensorik und Robotik ermöglicht zum einen die Reduzierung von Einträgen in Nichtzielflächen inklusive Gewässern und zum anderen auch die Behandlung von Reihen, Teilflächen oder einzelnen Pflanzen und somit eine Verringerung der Aufwandmengen je Fläche. Im gleichen Maße wird auch die gezieltere Anwendung von Biopestiziden und physikalischen Methoden als Alternativen zum chemischen Pflanzenschutz ermöglicht.

Bessere Erfassung von Umweltfaktoren und Schädlingsbefall in Verbindung mit genaueren Prognosemodellen ermöglicht ebenfalls einen gezielteren Einsatz von Pflanzenschutzmitteln, Nützlingen oder physikalischen Methoden.

Vorbeugende Maßnahmen können ebenfalls von einer stärkeren Digitalisierung der Landwirtschaft profitieren. *Precision Farming* umfasst nicht nur den gezielten Einsatz von Pflanzenschutzmitteln, sondern insgesamt die optimierte kleinräumige Versorgung der Nutzpflanzen,

was sich in höherer Widerstandsfähigkeit gegenüber Konkurrenten und Stressoren inklusive Krankheiten und Schädlingen niederschlagen wird. Ebenso ist denkbar, dass im *Digital Farming* auch kleinräumigerer Anbau (*Spot Farming*) und Mischkulturen technisch und wirtschaftlich möglich werden, so dass kleinräumige Unterschiede des Standortes berücksichtigt, Synergien zwischen verschiedenen Pflanzen genutzt werden können und die Agrarbiodiversität erhöht werden kann.

Auf der Landschaftsebene könnte eine stärkere Digitalisierung ein Management von Hot Spots für Drift- und Run-off-Einträge, sowie von wertvollen Habitaten für die Förderung von Nützlingen und allgemein der Biodiversität in der Agrarlandschaft erleichtern.

Tabelle 13: Als relevant angesehene Entwicklungen im Pflanzenschutz mit Digitalisierung

Kategorie	Ansatz	Entwicklung	Beispiele für neue Entwicklungen
Chemische und biologische Pflanzenschutzmittel	Automatisches Risikomanagement	Sensorik und Robotik zur Steuerung der Applikation, z.T. gekoppelt mit Felddaten	„Intelligente Spritze“
Chemische und biologische Pflanzenschutzmittel	<i>Precision Farming</i>	Sensorik und Robotik zur und automatisierten Applikation von Teilflächen bis hin zu Einzelpflanzen	Bandapplikation, Fahrinnenabschaltung, Spotapplikation, Stammapplikation
Chemische und biologische Pflanzenschutzmittel	Monitoring und Prognose	Bessere Modelle zur Vorhersage von Krankheits- und Schädlingsentwicklung	Optimierte Anwendungsempfehlungen
Physikalische Maßnahmen	Mechanische Beikrautkontrolle, neue physikalische Kontrollmechanismen ohne Bodenbewegung	Sensorik und Robotik zur Differenzierung von Nutzpflanzen und Beikräutern zur gezielten Beikrautbehandlung	Hackroboter, Abtöten einzelner Pflanzen mit Laser Systemische Abtötung von Pflanzen mit Strom
Physikalische Maßnahmen	Pilzbehandlung mit UV-Licht	Modulare autonome Roboter	Nächtliche Mehлтаubekämpfung mit UV-Licht
Vorsorgende Maßnahmen	<i>Precision Farming</i>	Sensorik, Robotik, Datenanalyse zur optimalen Versorgung der Nutzpflanzen	Optimierte Nährstoff- und Wasserversorgung der Nutzpflanzen, Dreieckssaat
Vorsorgende Maßnahmen	Neue Anbausysteme	Sensorik und Robotik zur ökonomischen Bewirtschaftung	Mischkulturen, <i>Spotfarming</i>
Vorsorgende Maßnahmen	Landschaftsanalyse	Hotspot-Management z. B. für Drift oder Run-off-Einträge in Gewässer	GeoRisk: <i>Landscape data analysis</i> zur Hotspot-Identifikation
Vorsorgende Maßnahmen	Landschaftsanalyse und -management	Habitatoptimierung für Nützlings- und Diversitätsförderung	F.R.A.N.Z. (https://www.franz-projekt.de/)

Kategorie	Ansatz	Entwicklung	Beispiele für neue Entwicklungen
Kompensation	Landschaftsanalyse und -management	Flächenoptimierung für Diversitätserhöhung	Eh da Projekt (http://www.hortipendium.de/Eh_da_Flaechen) EFA- Projekt (http://efa-suedpfalz.de) F.R.A.N.Z. (https://www.franz-projekt.de/), Eh da Projekt (http://www.hortipendium.de/Eh_da_Flaechen), EFA- Projekt (http://efa-suedpfalz.de)

Quelle: Eigene Darstellung Fraunhofer IME und RLP AgroScience

3 Analyse

In diesem Kapitel werden aufbauend auf die in Abschnitt 2 als relevant identifizierten Entwicklungen der Fragen 3 bis 6 der Einleitung beantwortet, soweit es im Rahmen des Gutachtens möglich war.

3. Wo liegen die **Chancen und Risiken** aus der Sicht eines ökologisch nachhaltigeren und umweltgerechten Pflanzenschutzes?
4. Wer sind die **Treiber, Stakeholder, Profiteure** der Entwicklungen?
5. Was sind die entscheidenden **Hemmnisse** (z.B. Wirtschaftlichkeit, Investitionen, Ethik, öffentliche Meinung, Regulatorik), die für eine weitere Entwicklung oder Implementierung überwunden werden müssen?
6. Welche **Vernetzung** gibt es mit weiteren Entwicklungen im Pflanzenschutz? Wie stark sind diese Entwicklungen gekoppelt?

Für die Bewertung der Chancen und Risiken wurde die aktuelle Anwendung von chemischen Pflanzenschutzmitteln als Referenz für die Beurteilung neuer Entwicklungen angesehen. Auswirkungen auf die Umwelt wurde dabei so wie sie in der Zulassungspraxis erfolgt verstanden, also in Bezug auf Grundwasser, Gewässer, Bodenorganismen, Nicht-Ziel-Arthropoden inkl. Bienen, Nicht-Zielpflanzen, Säuger und Vögel. Wenn möglich, werden Hinweise auf andere relevante Aspekte für eine komplette Bewertung der Umweltauswirkungen qualitativ aufgeführt, wie z. B. andere Effekte der Behandlung (z. B. Bodenverdichtung, Störung), Ressourcen und Energieverbrauch, sowie CO₂-Bilanz. Eine quantitative *Life-Cycle*-Analyse von Ansätzen war nicht Gegenstand dieses Gutachtens und könnte in Folgevorhaben aufgegriffen werden. Es werden wie in Kapitel 2 zunächst Weiterentwicklungen ohne Digitalisierung betrachtet, bevor in 3.5. *Digital Farming* diskutiert wird.

3.1 Chemische Maßnahmen

In diesem Abschnitt werden nur neue chemische Pflanzenschutzmittel (s. Abschnitt 2.1) behandelt. Technische Weiterentwicklung der Anwendung sind in Zukunft ohne Digitalisierung kaum vorstellbar und werden daher im Abschnitt 3.4 über *Digital Farming* und Pflanzenschutz behandelt.

3.1.1 Chancen und Risiken aus der Sicht eines umweltgerechten Pflanzenschutzes

Die Umweltrisiken neuer chemischer Pflanzenschutzmittel oder Formulierungen schätzt das Gutachterteam tendenziell geringer ein als für ältere Wirkstoffe, weil das Wissen um mögliche Umweltwirkungen stetig zunimmt und dementsprechend die Zulassungsbedingungen angepasst werden. Gänzlich auszuschließen sind nicht erfasste Expositionspfade oder Wirkmechanismen aber nicht. Verstärktes Nachzulassungsmonitoring könnte helfen, solche Fälle eher zu entdecken und so die Zulassungsverfahren zu überprüfen (Vijver *et al.* 2017, Müller & Hitzfeld 2020).

Als Beispiel für eine Entwicklung neuer chemischer Pflanzenschutzmittel werden hier **Nanopestizide** betrachtet. Möglichkeiten der Reduktion der Risiken von chemischen Pflanzenschutzmitteln durch neue Techniken werden in 3.5 in Verbindung mit den Möglichkeiten der Digitalisierung diskutiert.

Im DaNa Projekt (DaNa 2021) werden die Chancen von Nanomaterialien in Pflanzenschutzmitteln wie folgt zusammengefasst: "Häufig sind die Wirkstoffe in Pestiziden schlecht wasserlöslich, was ihre Anwendung erschwert. Nanomaterialien können als Begleitstoffe die Wasserlöslichkeit der aktiven Wirkstoffe erhöhen. So können die Freisetzung und die Verteilung besser kontrolliert

und darüber der Wirkstoff besser vor vorzeitigem Abbau geschützt werden. Dadurch verbessert sich nicht nur die Aufnahme und Wirksamkeit des Wirkstoffs zur Schädlingsbekämpfung, auch die eingesetzte Pestizid-Menge kann wesentlich verringert werden. Weiterhin sollen alternative Wirkstoffe und Produkte die Umwelt weniger schädigen und möglicherweise der Resistenzentwicklung von Schädlingen gegen Pestizide entgegenwirken. Derzeit gibt es aber noch keine genauen Angaben, wie gut die Wirksamkeit von Nanopestiziden gegenüber herkömmlichen Pestiziden ist." Andererseits kann eine kontrollierte Freisetzung eine längere Wirksamkeit bedeuten, was die Zeitdauer für eine Resistenzbildung und damit deren Wahrscheinlichkeit wiederum erhöht. Eine erhöhte Wasserlöslichkeit kann auch die Verfügbarkeit und damit Toxizität für Nicht-Zielorganismen erhöhen, sodass der aufgeführte Aspekt „Potentiell geringeres Risiko für die Umwelt“ nur eingeschränkt gilt. Dies macht deutlich, dass eine Bewertung nicht generell erfolgen kann, und bei gegenläufigen Effekten, wie im letzten Beispiel sind die positiven und negativen Effekte unter Umständen nicht eindeutig zu gewichten.

In Bezug auf die Zulassungspraxis von Formulierungen mit Nanoformen sollten folgende Punkte geprüft werden:

1. Wie ist bei der Zulassung zu berücksichtigen, dass zu Nanopestiziden sowohl Nanoformulierungen als auch als „Nanowirkstoff“ gehören?
Da Formulierungsbestandteile nicht wie Wirkstoffe geprüft werden, bräuchte es eine für die Regulation geeignete Neudefinition.
2. Sollten Nanoformen in Formulierungen deklariert werden und ist eine Abschätzung der Umweltbelastung und des sich daraus ergebenden Risikos notwendig?
Nanomaterialien als Formulierungsbestandteile können die Expositionsmuster signifikant verändern (s. Punkt 3.). Deshalb sollten sie ausgewiesen werden.
Gerade die erwünschte erhebliche Wirkungssteigerung der Nanoformulierung, die eine Verringerung der einzusetzenden Wirkstoffmengen ermöglicht, macht eine Bewertung der Produkte auf der Basis der Reinstoffe (*active substances*), wie sie üblicherweise durchgeführt wird, deutlich weniger aussagekräftig.
Aufgrund der fehlenden Deklarierungspflicht bestehen Unsicherheiten hinsichtlich der chemischen Identitäten. Eine Betrachtung des Risikos sollte daher auch für die Nanoformen als Formulierungsbestandteile unabhängig vom Wirkstoff erfolgen. Für Pflanzenschutzmittel stellt der Boden ein relevantes Umweltkompartiment dar, was eine verstärkte Betrachtung rechtfertigt. Eine Bewertung analog der Chemikalienbewertung nach REACH Verordnung erscheint daher als nicht ausreichend, da hierbei das terrestrische Kompartiment erst bei höheren Jahrestonnagemengen betrachtet wird.
3. Führen Nanoformulierungen zu Expositionsmustern, die mit den aktuellen Verfahren nicht angemessen abgebildet werden können?
Eine langsame Freisetzung von Wirkstoffen aus Kapseln oder andern Formen im Boden oder auf der Pflanze führt zu einer anderen Expositionsdynamik als Formulierungen mit schneller Freisetzung der Wirkstoffe. Derzeit liegt der Fokus bei den Expositionsmustern - sowohl für das Kompartiment Boden als auch für Oberflächengewässer - auf der Berechnung von maximalen PECs (PEC_{max}) oder verschiedenen *time weighted average* (TWA) Konzentrationen (FOCUS 2001). Dabei wird im Sinne einer *Worst Case*-Abschätzung eine mögliche langsame Freisetzung nicht berücksichtigt. Es ist davon auszugehen, dass Expositionsberechnungen für Nanoformulierungen mit den aktuellen Modellen deshalb stets zu deutlich höheren Konzentrationen hinsichtlich dieser beiden Endpunkte (also PEC_{max} und TWA über relativ kurze Zeiträume) führen, als man in der Umwelt beobachtet. Die klassische Berechnung von PECs ist daher bei einer langsamen Freisetzung nicht gerechtfertigt. Vor diesem Hintergrund sollte eine Diskussion über eine Anpassung der Berechnung von Konzentrationen geführt

werden, die die spezielle Exposition dieser Produkte berücksichtigt. Das könnte zum Beispiel dadurch erfolgen, dass die langsame Freisetzung des Wirkstoffs vergleichbar der Bildung eines klassischen Metaboliten, berechnet wird. Wenn die Formulierungen zu einer verzögerten Freisetzung der PSM führen, verschiebt sich der Betrachtungsfokus auf längere Expositionen mit niedrigeren Konzentrationen. Dadurch kann eine verstärkte Produkttestung mit chronischen Tests notwendig sein.

Für Nanomaterialien als Wirkstoff ist aufgrund der erwarteten höheren Effektivität der Anwendung im Vergleich zur Nicht-Nanoform von einer Reduktion der Aufwandmenge auszugehen. Dies würde sie dann nicht von einer Weiterentwicklung bei herkömmlichen Pflanzenschutzmitteln unterscheiden, die zu einer verbesserten Wirksamkeit führt. Diesbezüglich wäre keine Modifikation in der bisherigen Praxis der Pflanzenschutzmittelbewertung notwendig. Allerdings zeigten sich im Rahmen der Untersuchung von metallischen Nanoformen auf Bodenorganismen Effekte bisweilen nicht in der ersten, sondern erst in späteren Generationen, was zur Empfehlung von Mehrgenerationentests führt (Bicho *et al.* 2017). Ob dieses Verhalten verallgemeinert werden kann oder spezifisch für (einige) Nanoformen ist und welche Wirkprinzipien hier zugrunde liegen, ist unbekannt. Weitergehende Kenntnisse sind notwendig, bevor Konsequenzen für die Regulation gezogen werden können. Dabei ist zu berücksichtigen, dass eine derartige Prüfung aufwändig und langwierig ist, was die Anwendung derartiger experimenteller Ansätze auf Forschungsprojekte beschränken könnte. Das Auftreten von Effekten erst in späteren Generationen wird beispielsweise auch für das konventionelle Pflanzenschutzmittel Teflubenzuron berichtet (Guimarães *et al.* 2019), so dass es sich nicht um ein spezifisches Verhalten bei Nanopestiziden zu handeln scheint, sondern generell die Testung von Pflanzenschutzmitteln betreffen würde. Hier ist mit zunehmendem Wissen über *Adverse Outcome Pathways* (AOP) eine mechanistische Aufklärung über *Omic*-Methoden ein vielversprechender Weg. Ein solcher Ansatz ermöglicht eine frühe Identifizierung von adversen Effekten auf molekularer Ebene und die Extrapolation auf höhere Organisationsebene (z.B. Organismus/Population, je nach Schutzziel) auch in Vertebraten, sodass aufwändige, kostenintensive, und u.U. Tierzahl-intensive Studien reduziert werden können. Darüber hinaus, ist bei metallischen Wirkstoffen, unabhängig von der Form, die Persistenz und damit die Anreicherung im Boden zu berücksichtigen. Die langjährige Anwendung von Kupfer-basierten Pflanzenschutzmitteln hat z. B. schon zu deutlichen Bodenbelastungen in Weinbergen geführt (Trapp *et al.* 2011).

Während für Nanomaterialien im Hinblick auf deren Registrierung unter REACH spezifische Leitfäden zur Umweltrisikobeurteilung erarbeitet wurden, liegen noch keine entsprechenden Dokumente für den Einsatz im Pflanzenschutz vor. In einem Bericht für die EFSA führen Quik *et al.* (2020) zu einem Aspekt auf, die unabhängig sind von dem Verwendungszweck und damit der zu Grunde liegenden Gesetzgebung grundsätzlich in der Risikobewertung von Nanomaterialien zu berücksichtigen sind. Dies sind beispielsweise die Entwicklung von standardisierten Ansätzen zur Beurteilung der benthischen und terrestrischen Ökotoxizität, die bislang im Vergleich zur aquatische Ökotoxizität weniger betrachtet wurden. Zum anderen gibt es Aspekte, die spezifisch für den Einsatz von Nanomaterialien im Rahmen von Pflanzenschutzmitteln sind. Hier nennen Quik *et al.* (2020) zwei Hauptaspekte:

1. Die Adaptation der Expositionsszenarien und Modelle. So werden bei dem häufig angewendeten Programm FOCUS spezifische Eigenschaften von Nanomaterialien nicht berücksichtigt. Die Annahme einer Gleichgewichtsverteilung trifft nicht auf Nanomaterialien zu. In den Modellen werden verschiedene *Fate*-Prozesse wie beispielsweise Agglomeration und Anlagerungsprozesse nicht in geeigneter Form berücksichtigt. Dies bedeutet, dass entweder existierende Modelle adaptiert oder neue Modelle zu entwickeln sind. Dabei sind die in FOCUS hinterlegten Expositionsszenarien zu berücksichtigen.

2. Die Untersuchung von Nanoformulierungen. Der Einsatz von Nanomaterialien wird primär als Formulierung und nicht als Wirkstoff erfolgen. Nanomaterialien als Formulierungsbeistoffe könnten aber das Umweltverhalten der Pflanzenschutzmittel und unter Umständen auch deren PBT-Einstufung (Persistenz, Bioakkumulation, Toxizität) betreffen.

3.1.2 Treiber, Stakeholder, Profiteure der Entwicklungen

Ein Treiber für die Entwicklung neuer chemischer Pflanzenschutzmittel ist die Nachfrage der Landwirtschaft nach effizienteren, spezifischeren, leichter anzuwendenden, sichereren oder auch kostengünstigeren Mitteln. Zum anderen können durch Resistenzbildungen Mittel unwirksam werden oder neue Krankheiten oder Schädlinge neue Mittel erfordern, um Kulturen noch wirtschaftlich anbauen zu können. Regulatorische Auflagen zur Substitution von Wirkstoffen mit hohen Risiken erzeugen aber auch den Bedarf nach neuen, umweltverträglicheren Wirkstoffen. Neue Produkte erlauben den Herstellern neue Absatzmöglichkeiten und dadurch einen Marktvorteil gegenüber Konkurrenten.

Stakeholder im Bereich chemischer Pflanzenschutz sind, neben den Produzenten und Anwendenden der Produkte auch der Vertrieb und die Hersteller von Geräten zur Anwendung der Mittel. Hinzu kommen Verbraucher und Verbraucherinnen und NGOs, wie die zunehmende Diskussion um chemische Pflanzenschutzmittel in der Öffentlichkeit zeigt. Viele Verbraucher und Verbraucherinnen wünschen sich umweltfreundliche Produktionsmethoden und sind teilweise bereit, dafür mehr zu bezahlen. Dementsprechend sind dann auch die Großhandelsverbände, welche mit eigenen Umweltauflagen als Marketinginstrument arbeiten, Profiteure oder sogar Treiber von Innovationen. Ebenso spielen die Politik durch die Vorgabe von Zielen und die Regulatorischen Behörden durch ihre Aufgabe, die Ziele umzusetzen, eine wichtige Rolle in der Diskussion um chemische Pflanzenschutzmittel. Die Wissenschaft ist in alle Bereiche des Pflanzenschutzes eingebunden, indem sie die Auswirkungen von Maßnahmen oder Mitteln erforscht und neuen Methoden entwickelt.

Profiteure sind, neben Herstellern, Vertrieb, Maschinenbauern und Landwirtschaft, Auftragslabore und Beratungsbüros, die in die Zulassung von Pflanzenschutzmitteln eingebunden sind. Verbraucher und Verbraucherinnen profitieren von sicheren und kostengünstigen Lebensmitteln. In gewisser Weise kann auch die Umwelt vom chemischen Pflanzenschutz profitieren, wenn durch höhere Erträge weniger Flächen für die Nutzpflanzenproduktion bereitgestellt werden müssen. In Bezug auf Ressourcen- und Energieverbrauch inkl. CO₂ Bilanz wurde hier keine tiefgehenden Recherchen durchgeführt. Nollepa und Witzke (2013) errechneten aber z. B. eine jährliche Ersparnis von 2.25 Millionen t CO₂-Äquivalente jährlich im deutschen Ackerbau, allein durch die Anwendung von Fungiziden.

3.1.3 Hemmnisse

Die Entwicklung neuer chemischer Pflanzenschutzmittel wird durch verschiedene Faktoren gehemmt. Die Kosten für Entwicklung und Zulassung steigen, gleichzeitig sind die zu erwartenden Gewinne unsicherer, wenn der Einsatz chemischer Pflanzenschutzmittel zunehmend kritisch gesehen wird und durch politische Vorgaben, zumindest in der EU (Europäische Kommission 2020), deutlich gesenkt werden soll. Zudem erlaubt verbesserte Anwendungstechnik (*Precision Farming*, s. Abschnitt 2.5.1) in Zukunft wahrscheinlich die gleiche Wirkung mit geringeren Aufwandmengen je Feld.

Es wird immer schwieriger, neue synthetische Pflanzenschutzmittel zu entwickeln, da Kosten und Anforderungen steigen, während diese bei Biopestiziden oft wesentlich geringer sind. Marrone (2014) zum Beispiel berechnet die Kosten zur Neuentwicklung eines synthetischen

Pestizids auf 250 Millionen \$, während die Entwicklung eines Biopestizids nur 3–7 Millionen \$ kostet. Der Zeitrahmen zur Entwicklung beträgt laut Marrone (2014) zehn Jahre für ein synthetisches Pestizid und etwa drei Jahre für ein Biopestizid. Aus diesem Grund setzen auch Hersteller von chemischen Pflanzenschutzmitteln verstärkt auf Biopestizide. Bei den Anforderungen handelt es sich insbesondere um die Erfüllung der Zulassungskriterien. Mit zunehmendem Erkenntnisgewinn um die Risiken von Pflanzenschutzmitteln und das Schließen von Lücken in der Bewertungsmethodik zu den Umweltrisiken erfüllen neue Wirkstoffe und Pflanzenschutzmittel häufig nicht mehr die Anforderungen, um unannehmbare Risiken für den Naturhaushalt auszuschließen.

Ein grundlegendes Kommunikationshemmnis zwischen allen Beteiligten ist das oft ungenügende Wissen der allgemeinen Öffentlichkeit über Landwirtschaft generell und insbesondere über Pflanzenschutz, wenn nur von der Grundüberzeugung, dass Chemie generell schlecht und andere Maßnahmen generell gut sind, ausgegangen wird. Informationen über bekannt gewordene unerwünschte Belastungen tragen jedoch auch nicht zu einer Vertrauensbildung der Öffentlichkeit bei.

Ein zusätzlicher Unsicherheitsfaktor tritt bei neuen Pflanzenschutzmitteln auf, wenn diese durch neuartige Technologien erzeugt werden. Während zu Beginn der Nanotechnologie der Begriff „Nano“ positiv besetzt war, kippte die Akzeptanz, nachdem bekannt wurde, dass mit Nanoformen durchaus auch Risiken verbunden sein könnten (Stiftung Warentest 2019). So ist der Begriff „Nano“ in der Öffentlichkeit nicht mehr nur positiv besetzt. Eine Aussage darüber, wie die Akzeptanz von Nanopestiziden derzeit ist, kann nicht getroffen werden. Noch problematischer ist die Situation bei gentechnisch erzeugten oder über genetische Mechanismen wirkenden Biopestiziden (. siehe Abschnitt 3.2).

3.1.4 Vernetzung mit weiteren Entwicklungen im Pflanzenschutz

Nach dem Prinzip des Integrierten Pflanzenschutzes sind chemische Pflanzenschutzmittel ein Mittel, das zur Anwendung kommen soll, wenn andere Pflanzenschutzmaßnahmen nicht ausreichen oder nicht zur Verfügung stehen. Unter diesem Gesichtspunkt werden chemische Mittel auch weiterhin von Landwirten bei Abwägung von Nutzen und Risiken mit anderen Maßnahmen gekoppelt werden. Die Zukunft des chemischen Pflanzenschutzes liegt in neuen Mitteln und neuen Techniken der Anwendung, die negative Auswirkungen auf Nicht-Zielorganismen verringern. In der Anwendungstechnik kann dies geschehen, indem genauer und damit weniger appliziert wird (*input reduction*, z. B. Applikation nur auf Teilflächen) oder indem Flächen mit einem hohen Risiko von Einträgen in Nicht-Zielflächen oder Gewässer automatisch nicht behandelt werden (*emission reduction, risk mitigation*). Beides wird insbesondere durch eine zunehmende Digitalisierung ermöglicht wie sie in Abschnitt 2.5.1 vorgestellt wurde und in Abschnitt 3.5 analysiert wird.

Nano-Formulierungen als eine relative neue Entwicklung zur Verbesserung der gewünschten Wirkung können auch für Biopestizide verwendet werden; so können etwa RNAi Sprühmittel Nanoformen zur besseren Verteilung auf der Pflanze und somit Aufnahme in die Pflanze enthalten. Nach ersten Hinweisen können RNAi basierte Verfahren die Resistenzbildung gegenüber chemischen Pflanzenschutzmitteln verringern und so die Wirksamkeit der Mittel erhöhen (Xiao *et al.* 2015). Eine weitere, jedoch kritisch zu sehende Vernetzung betrifft die genetische Veränderung von Pflanzen, um Resistenzen gegenüber bestimmten Herbiziden zu erzeugen und damit Breitbandherbizide wie Glyphosat großflächig einsetzen zu können.

3.2 Biologische und biotechnische Maßnahmen

Die Chancen und Risiken, sowie Hemmnisse des Einsatzes von Biopestiziden, also Pflanzenschutzmitteln, die auf Mikroorganismen, Pflanzenstoffen oder Semiochemikalien (Botenstoffe, z. B. Pheromone) beruhen, wie in Abschnitt 2.2.1 dargestellt, werden als direkte Alternative zum chemischen Pflanzenschutz betrachtet. Der Einsatz von Nützlingen wird hier nicht weiter analysiert, da dabei keine grundlegend neuen Entwicklungen erwartet werden, abgesehen von Verbesserungen in der Anwendung durch Digitalisierung (s. Abschnitt 3.5).

3.2.1 Chancen und Risiken aus der Sicht eines umweltgerechten Pflanzenschutzes

Generell gelten Biopestizide als spezifischer wirkender als chemische PSM. Für Substanzen wie Pyrethrum oder Öle stimmt dies nur bedingt. Verschiedene Unterarten von *B. thuringiensis* produzieren aber z. B. über 200 unterschiedliche Bt-Toxine, die jeweils spezifisch bei bestimmten Insekten wirken. Bei RNAi Pestiziden ist eine noch höhere Spezifität möglich. Diese hohe Spezifität verringert erheblich das Risiko, Nicht-Zielarten zu schädigen. In Konsequenz sind Biopestizide wie andere Pflanzenschutzmittel als umso umweltschonender zu bewerten, je höher ihre Spezifität gegenüber bestimmten Krankheiten oder Schädlingen ist.

Ein weiterer Vorteil von Biopestiziden wird in ihrem oft schnellen Abbau in der Umwelt gesehen. Dadurch ist bei dem Einsatz von Biopestiziden mit konventionellen Methoden wie der Spray-Applikation keine Langzeit-Exposition zu erwarten. Allerdings könnte eine geringe Stabilität in der Umwelt auch eine wiederholte Anwendung erforderlich machen, um die gewünschte Wirkung zu erzielen.

Es sei darauf hingewiesen, dass die in diesem Gutachten als biologische Pflanzenschutzmaßnahmen behandelten Ansätze nicht mit Maßnahmen des biologischen oder ökologischen Pflanzenbaus gleichzusetzen sind, da auch dort chemische, biologische, physikalische und vorbeugende Maßnahmen eingesetzt werden. Die Zulässigkeit von Pflanzenschutzmaßnahmen im biologischen Landbau bedeutet nicht grundsätzlich eine bessere Umweltbilanz. Ein Beispiel bildet die Anwendung von Kupfer-Verbindungen zur Pilzbekämpfung im Vergleich zu synthetischen Fungiziden, Bodenbearbeitung durch Pflügen im Vergleich zu pflugloser Bewirtschaftung oder auch der höhere Flächenbedarf des rein biologischen Landbaus. Eine aktuelle Zusammenstellung des aktuellen Wissensstands zur ökologischen Landwirtschaft bieten Haller *et al.* (2020). Laut dieses Gutachtens kann die Belastung von Gewässern mit Pflanzenschutzmitteln (PSM) aufgrund des umfassenden Verbots von chemisch-synthetischen PSM im ökologischen Landbau weitgehend ausgeschlossen werden. Die Autoren schränken ein, dass dabei Kupfer und biologische Pflanzenschutzmittel nicht berücksichtigt wurden, und weisen auf eine Studie (Wettstein *et al.* 2016) hin, in der gezeigt wurde, dass „aufgrund der potentiellen Einträge von Kupfer-Präparaten ökologisch produzierter Wein in Bezug auf die Umweltgefährdung schlechter abschneiden kann als konventionell erzeugter Wein“. In Bezug auf Pflanzenschutz (im ökologischen Landbau) wird folgende Schlussfolgerung gezogen: „Die notwendige Innovation besteht in der Entwicklung von effektiveren und umweltverträglicheren biologischen Pflanzenschutzmaßnahmen (z. B. Pflanzenschutzmittel auf Basis neu entdeckter Natursubstanzen, neue Biocontrol-Organismen). Da Einblicke in die komplexen mikrobiellen Gemeinschaften eine effektive biologische Kontrolle von Pflanzenschädlingen fördern, birgt die Mikrobiomforschung und die Entwicklung neuer molekularer und digitaler Techniken ein erhebliches Potential für den ökologischen Pflanzenschutz.“ (Haller *et al.* 2020). Pflanzenschutz ist auch im ökologischen Landbau notwendig und teilweise können auch dort Mittel mit vorhandenem Umweltrisiko eingesetzt werden, für die in Zukunft Alternativen benötigt werden. Generell könnte der ökologische Landbau von der Ent-

wicklung zulassungsfähiger Biopestizide profitieren, wenn dadurch umweltschonend höhere Erträge erwirtschaftet werden können. Dies gilt insbesondere, wenn der Anteil an ökologisch bewirtschafteten Flächen in der EU bis 2030 auf 25 % zunehmen soll (Europäische Kommission 2020).

Die Risiken von Biopestizide für Nicht-Zielorganismen werden wie bei chemischen Mitteln durch die Spezifität des Wirkmechanismus bestimmt. Oft versprechen Biopestizide jedoch eine hohe Spezifität. Allerdings birgt der Einsatz von RNAi und Bt-Proteinen das Risiko, dass nah verwandte Arten potentiell stärker durch das Biopestizid geschädigt werden als angenommen. Diese Effekte können nicht durch ökotoxikologische Standardmethoden erfasst werden, da nah verwandte Nicht-Ziel-Organismen nicht zum Standard-Testrepertoire gehören. Durch einen vorgeschalteten Sequenzvergleich (Docking-Studien, 3D-Modellierungen bei Proteinen (US EPA 2018) bzw. last-Suche bei RNAi (*Basic Local Alignment Search Tool*, National Center for Biotechnology Information (2021)) können nahe Verwandtschaftsbeziehungen ermittelt werden und die Testspezies nach Möglichkeit besser ausgesucht werden.

Neben den Sequenz-spezifischen Gefahren durch nahe Verwandtschaftsverhältnisse birgt die Verwendung von RNAi aber auch Sequenz-unabhängige Gefahren für Nicht-Ziel-Organismen. So besteht die Gefahr, dass die intrinsisch notwendige *gene silencing*-Maschinerie des Organismus überlastet ist, sodass sie für die Aufrechterhaltung der notwendigen Mechanismen nicht zur Verfügung steht. Diese Sättigung der RNAi-Maschinerie ist für Säuger beschrieben (US EPA, 2014), für Arthropoden allerdings noch nicht. Bei Arthropoden ist die RNAi ein Bestandteil der innaten antiviralen Immunantwort, und eine dsRNA-getriggerte Steigerung der Immunantwort kann zu adversen Effekten in einer Zahl von Nutzinsekten wie z. B. der Hummel führen (Piot *et al.* 2015).

Der Einsatz von Nützlingen birgt das Risiko von Faunenverfälschung und massiven Auswirkungen auf die heimische Artengemeinschaft, wenn gebietsfremde Arten verwendet werden. Der Ansiedlung der Aga-Kröte zur Bekämpfung von Mäusen, Ratten und Käfern in Australien und anderen Ländern ist ein klassisches Beispiel für eine nicht geglückte biologische Schädlingsbekämpfung mit unerwünschten Folgen auf heimische Nicht-Zielarten (Wikipedia 2021). In Deutschland ist die Verwendung gebietsfremder Arten als Nützlinge daher genehmigungspflichtig (s. Abschnitt 2.2.2).

3.2.2 Treiber, Stakeholder, Profiteure der Entwicklungen

Treiber der Entwicklung von Biopestiziden sind wirtschaftliche Interessen der Entwickler und Produzenten sowie der Bedarf der Landwirtschaft nach Pflanzenschutz. Ein zusätzlicher Treiber ist der steigende Bedarf nach Alternativen zu chemischen Pflanzenschutzmitteln, sowohl durch politische Zielsetzungen als auch durch die steigende Nachfrage nach „chemiefreien“ Lebensmitteln. Ein weiterer Treiber für die Entwicklung von Biopestiziden sind höheren Entwicklungskosten für chemische Pflanzenschutzmittel wie unter in Abschnitt 3.1.3 schon erwähnt. Marrone (2014) geben die Kosten zur Neuentwicklung eines synthetischen Pestizids auf 250 Millionen \$, während die Entwicklung eines Biopestizids nur 3–7 Millionen \$ kostet. Während für ca. 140 000 Chemikalien für ein kommerziell verwertbares Produkt gescreent werden müssen und die Entwicklung eines neuen chemischen Pflanzenschutzmittels ca. zehn Jahre dauert, müssen für die Entwicklung eines Biopestizids deutlich weniger Mikroorganismen geprüft werden, so dass ca. drei Jahre Entwicklungszeit benötigt werden (Marrone 2014).

Die Stakeholdergruppen im Bereich Biologischer Pflanzenschutzmaßnahmen sind ähnlich denen im chemischen Pflanzenschutz, wobei die beteiligten Firmen sich unterscheiden können. Hersteller sind bei Biopestiziden oft kleinere Unternehmen, allerdings haben die großen Produzenten von chemischen Mitteln aufgrund ihrer größeren Ressourcen hier langfristig Vorteile. Die

Interessen einiger Stakeholder sind invers zum chemischen Pflanzenschutz (gegen chemische aber für biologische PSM). Konsumenten und in Konsequenz Handelsketten treiben einen umweltverträglicheren und verbrauchersicheren Pflanzenschutz im Sinne von „chemiefrei“ voran.

Profiteure von verstärktem biologischem Pflanzenschutz sind die entsprechenden Firmen und die Landwirtschaft, der Alternativen zum chemischen Pflanzenschutz zur Verfügung gestellt werden. Hier würde insbesondere der Ökolandbau von neuen Entwicklungen profitieren, da ihm synthetisch-chemische Mittel nicht zur Verfügung stehen. Bei höherer Spezifität und geringerer Persistenz im Vergleich zu chemischen PSM profitiert die Umwelt durch die zu erwartenden geringeren Nebenwirkungen von Biopestiziden im Vergleich zu chemischen Wirkstoffen.

3.2.3 Hemmnisse

Der Begriff „Bio“ ist in der Öffentlichkeit positiv besetzt, so dass hier ein Vorteil von Biopestiziden gegenüber chemischen Pflanzenschutzmitteln besteht. Allerdings besteht in der EU kaum Akzeptanz gegenüber Gentechnik. Die Anwendung von GMP, die PIPs produzieren, um sich vor Schädlingen oder Krankheiten zu schützen, ist daher in der EU zunächst wahrscheinlich sehr eingeschränkt. Diese Hemmnisse beziehen sich allerdings auf die gentechnisch veränderte Pflanze und nicht auf das generierte Biopestizid. Die Hemmnisse, die aufgrund der Wirkstoffe selbst zu erwarten sind, können im Folgenden nur abgeschätzt werden, da es sich hier um neuartige Wirkstoffe und Entwicklungen handelt, die noch nicht großflächig eingesetzt werden.

Biopestizide, die wie herkömmliche PSM appliziert werden (z. B. Spray-Applikation) unterliegen dem gleichen Zulassungsverfahren wie chemische PSM. Es wird diskutiert, ob dies in allen Fällen angemessen ist, da wie oben beschrieben die Risiken der Biopestizide als geringer eingeschätzt werden und die Datenanforderungen und Testrichtlinien für Chemikalien oft nicht angemessen sind (Melin 2017, Whittaker 2017). Entwicklungsfirmen beklagen überzogene Anforderungen, die sich aus dem Verfahren für chemische PSM ergeben. Insbesondere kleinere Firmen stehen hier vor Problemen in Bezug auf das notwendige Wissen und die Mittel für eine Zulassung. Je spezifischer die Produkte sind z. B. für nur einzelne Zielarten, desto kleiner ist der potentielle Markt und desto stärker fallen die Zulassungskosten ins Gewicht (Meier 2017).

Die Anforderungen, die diese neuen Wirkstoffklassen an die regulatorische Risikobewertung stellen, werden sowohl von der US EPA als auch von der EFSA erkannt, die entsprechende beratende Gremien im Jahr 2014 und 2016 zusammengestellt haben, um den Stand der Wissenschaft zur Umweltrisikobewertung miteinzubeziehen (US EPA, 2014, 2016; Papadopoulou *et al.* 2020).

Generell können die bestehenden Methoden zur Bestimmung des Umweltverhaltens bei Biopestiziden zu kurz greifen. Den Biopestiziden wird eine bessere Abbaubarkeit und geringere Persistenz nachgesagt. Aus Sicht der Wirksamkeit kann dies ein Hemmnis bzw. eine Herausforderung für Formulierung darstellen. Allerdings gilt dies auch nicht generell und ist abhängig von der Natur des Biomoleküls (Protein-basierter vs. RNA-basierter Wirkstoff). So können Bt-Proteine in der Umwelt sehr stabil sein. In einigen Feldstudien war das Cry1Ab-Protein von Bt-Mais noch Monate oder sogar vier Jahre nach der Ernte im Boden nachweisbar, während andere Studien einen schnelleren Abbau der Bt-Proteine im Boden zeigten, so dass Halbwertszeiten von 1 bis 141 Tage schwanken (Liu *et al.* 2021). RNA-basierte Biopestizide werden an Bodenpartikel adsorbiert und vergleichsweise schnell chemisch und biologisch abgebaut (Parker *et al.* 2019). Der Abbau erfolgt mikrobiologisch durch in der Umwelt vorhandene zum Teil bis auf Nukleotid-Ebene. Bachmann *et al.* (2020) fanden nach Sprühapplikation einen 95 % Rückgang der Konzentration von dsRNA in Sojabohnenpflanzen unter Feldbedingungen innerhalb von 3 Tagen. Auch im Boden und Wasser wird dsRNA schnell abgebaut (Halbwertszeiten < 30 h, Bachmann *et*

al. 2020). Diese Instabilität ist zum Vorteil für die Umweltverträglichkeit, muss aber zur Entfaltung der spezifischen Wirkung verlangsamt werden. Hier kommt eine Verknüpfung mit den Nanoformen zum Tragen, um die RNAi-basierten Wirkstoffe in der Umwelt zu stabilisieren, bis der zu erzielende Effekt erreicht wurde. Der Nachweis der RNAi in Umweltproben gestaltet sich indes schwierig, da durch den mikrobiologischen Abbau keine spezifischen Metabolite entstehen und die freigesetzten Nukleotide direkt in die Nukleinsäuren vorhandener Organismen integriert werden können (Parker *et al.* 2019). Für die Bestimmung des Umweltverhaltens müssen die vorhandenen Richtlinien und methodische Ansätze um molekularbiologische Nachweismethoden für Nukleinsäuren (qPCR, QuantiGene, P³²-Markierung) erweitert werden.

Beim Umstieg von chemischen Pflanzenschutzmitteln auf biologische Maßnahmen kann verstärkter Beratungsbedarf entstehen, wenn die Anwendung andere Techniken und Strategien verlangt.

3.2.4 Vernetzung / Kopplung mit weiteren Entwicklungen im Pflanzenschutz

Doppelsträngige RNA ist in der Umwelt als Nukleinsäure relativ instabil und bereits nach kurzer Zeit (Stunden bis wenige Tage) durch Exo- und Endonukleasen abgebaut (Parker *et al.* 2017), was generell als Vorteil gesehen werden könnte. Die geringe Persistenz ist allerdings ein Nachteil, wenn das Biopestizid bei Spray-Applikation in dieser kurzen Zeit seine geplante Wirkung nicht erzielen kann. Aus diesem Grund werden für die Spray-Applikation von dsRNA Nanoformulierungen eingesetzt, um die Stabilität der dsRNA nach Austrag zu erhöhen. Außerdem muss die dsRNA auch die Aufnahme durch die Schadorganismen und den niedrigen pH im Verdauungstrakt überstehen, um an den Zielort der Wirkung zu gelangen. Auch dazu können Nanoformen eingesetzt werden (Gosh *et al.* 2018; Fletcher *et al.* 2020).

Ansonsten ergibt die Kopplung von Biopestiziden mit den verschiedenen Ansätzen des *Digital Farming* wie bei chemischen Pflanzenschutzmitteln neue Möglichkeiten der optimierten Anwendung der Mittel (s. Abschnitt 3.5).

3.3 Physikalische Maßnahmen

Wie in Abschnitt 2.3 gezeigt, sind physikalischen Maßnahmen vor allem in der Beikrautkontrolle relevant und daher wird dies hier insbesondere analysiert, während auf physikalische Maßnahmen gegen tierische Schädlinge oder Pilze nur kurz eingegangen wird.

3.3.1 Chancen und Risiken aus der Sicht eines umweltgerechten Pflanzenschutzes

Physikalische Maßnahmen vermeiden zwar in der Regel direkte Wirkungen auf Nichtzielflächen, aber Effekte auf Bodenorganismen im Feld können nicht ausgeschlossen werden bzw. sind beim Einsatz von z.B. Heißwasser, Heißluft und Hochdruckwasser oder dem Abflämmen von Feldern und bis zur wirksamen Tiefe wahrscheinlich. Aus diesem Grund wurden diese Verfahren in die Analyse einbezogen.

Andere physikalische Verfahren wie Barrieren (Zäune, Netze), Maßnahmen zur Vertreibung oder Fallen werden dagegen in diesem Gutachten nicht weiter behandelt, da sie oft dort eingesetzt werden, wo kein chemischer Pflanzenschutz angewandt wird (z. B. gegen Wild oder Vögel). Allerdings sind auch solche Maßnahmen nicht ohne Nebeneffekte, da beispielsweise durch Barrieren auch Organismen, die keine Schäden anrichten, abgehalten werden. Im Einzelfall sind auch Produktion der Barrieren und Verbleib in der Umwelt (z. B. Reste von Netzen) zu betrachten. Physikalische Maßnahmen gegen tierische Schädlinge vermeiden jedoch Effekte durch mögliche Anreicherungen von z. B. Insektiziden oder Molluskiziden in der Nahrungskette. Ein be-

kanntes Beispiel für die Folgen derartiger Anreicherungs-effekte sind Vergiftungen von Greifvögeln durch Rodentizide (Badry *et al.* 2021). Ein Roboter zur mechanischen statt chemischen Schneckenbekämpfung ist zumindest in der Erprobung (FarmDemo 2017). Eine nächtliche Bestrahlung von Nutzpflanzen mit UV-Licht könnte zumindest teilweise Fungizide einsparen (Thorvald 2021). Ob mögliche Auswirkungen auf nachtaktive Insekten untersucht wurden, ist nicht bekannt.

Die wichtigsten physikalischen Pflanzenschutzmaßnahmen betreffen aber vor allem verschiedene Möglichkeiten der Beikrautkontrolle. Im Vergleich zu Herbizidanwendungen besteht kein Risiko einer Exposition und damit auch von direkten Effekten in Nichtzielflächen, also Pflanzen in Feldrainen oder anliegenden Gewässern. Ebenso fällt eine Aufnahme von Wirkstoffen durch den Fraß kontaminierter Pflanzen weg. Im Feld selbst hängen die Effekte auf Nichtzielpflanzen und die von ihnen abhängenden Lebensgemeinschaften von der Selektivität der Methode ab. Bei gleicher Selektivität und Effektivität sind indirekte Nahrungsketteneffekte durch die Vernichtung von Ziel- oder Nichtzielpflanzen als Nahrungsgrundlage dieselben wie bei einer Herbizidanwendung. Bei sehr randscharf arbeitenden physikalischen Methoden ist es möglich, gezielt schmale Streifen von Beikraut dort stehenzulassen, wo kaum negative Effekte auf die Nutzpflanzen zu erwarten sind oder z. B. höhenselektiv nur große ertragsverringende Pflanzen zu kontrollieren. Im Idealfall würde eine Einzelpflanzenenerkennung und -behandlung unkritische oder erwünschte Beikräuter verschonen können.

In einigen Fällen kann eine gezielte Kontrolle von Beikräutern oder des Wiederauflauf von Samen, Knollen, Wurzelresten auch den Befall mit Pilzen oder Nematoden wirkungsvoll ohne Einsatz von Chemikalien minimieren. Einige physikalische Methoden eignen sich auch als Ersatzoption für Bodenherbizide, wenn ihre Wirkung durch Mulchaufgaben und Regen im Frühjahr unsicher ist

Bei Herbiziden sind in der Regel vor allem direkte Nebenwirkungen auf Nicht-Zielpflanzen und indirekte Effekte in der Nahrungskette zu erwarten, während Bodenorganismen und andere Tiere bei speziell herbiziden Wirkstoffen in der Regel unempfindlicher sind. Diese unterschiedliche Sensitivität ist bei physikalischen Verfahren nicht unbedingt gegeben. Für Pflügen sind solche Auswirkungen auf Bodenorganismen bekannt, und z. B. bei Feldmäusen und Schnecken als mögliche Schädlinge auch erwünscht. Bei anderen Verfahren propagieren Hersteller zwar keinerlei negative Umweltauswirkungen (Zasso (2020) für Elektrobearbeitungen), dies ist aber nicht zwangsläufig durch standardisierte und referenzierte Untersuchungen belegt. Negative Auswirkungen auf Bodenorganismen durch Strom, Dampf, Mikrowellenstrahlung oder andere physikalische Maßnahmen sind aber nicht auszuschließen und bei manchen Verfahren sogar sehr wahrscheinlich. Ebenso könnten bestimmte Wirbeltiere mit geringer Fluchtreaktion betroffen sein (z. B. Kröten). Das Ausmaß solcher Effekte hängt wie bei Herbiziden von der Art der Maßnahme und der Genauigkeit und Großflächigkeit der Anwendung ab.

Studien zur vergleichenden Erfassung und Bewertung der Auswirkungen verschiedener Maßnahmen auf Nichtzielorganismen fehlen jedoch noch oft. Eine aktuelle Ausnahme bildet das Projekt „Smarte UNkraut Kontrolle – Entwicklung innovativer Anbaustrategien zum Glyphosatverzicht im pfluglosen Ackerbau (SUNK)“, in dem innerhalb einer 3-jährigen Fruchtfolge verschiedene Ansätze erprobt werden, unerwünschte Beikräuter sicher zu unterdrücken: Herbizideinsatz (Glyphosat), elektrophysikalische Unkrautbekämpfung mechanische und biologische Verfahren (Gesellschaft für konservierende Bodenbearbeitung e.V. 2022). Erfasst werden zumindest zeitweise Mykorrhizapilze und Regenwürmer. Das Projekt läuft noch bis 2023. Nach vorläufigen Daten hatte eine elektrophysikalische Behandlung keine Auswirkungen auf die Bodenorganismen (Fry 2020).

Neben der Auswirkung auf Nichtzielorganismen sollte eine Gesamtbewertung verschiedener Verfahren auch der Ressourcenverbrauch einfließen. Beispielsweise ist der Einsatz von Heißluft und Strahlungshitze in einigen Bereichen schon üblich und wird möglicherweise durch das Wegfallen chemischer Sikkationsmittel weiter zunehmen. Dem entgegen steht jedoch der hohe Aufwand an fossiler Energie (Gas) und die Auswirkungen auf alles Leben im Blattbestand und der obersten Bodenschicht (Steinkellner 2019). Beim Einsatz von Heißwasser, wie er z. B. im Weinbau erprobt wurde, zeigte sich ein sehr hoher Energieeinsatz mit sehr begrenzter Wirkung (Petgen & Kurz 2019).

3.3.2 Treiber, Stakeholder, Profiteure der Entwicklungen

Treiber für den Einsatz und die Entwicklung physikalischer Methoden des Pflanzenschutzes sind wie für biologische Methoden der Bedarf nach Alternativen zum chemischen Pflanzenschutz und wirtschaftliche Interessen der Geräteentwickler und Dienstleister. Insbesondere der zu erwartende Wegfall von Breibandherbiziden verlangt effektive Ersatzoptionen.

Interessensgruppen und Profiteure sind ähnlich zu den zuvor genannten, auch wenn Anbieter und Dienstleister durch andere Firmen repräsentiert sein können. Ob neben den Vertreibern solcher Techniken die Landwirte und Landwirtinnen oder die Verbraucher und Verbraucherinnen profitieren, kann im Rahmen dieses Gutachtens nicht beurteilt werden, da dazu z. B. die Auswirkungen auf die Betriebskosten und Nahrungsmittelpreise abgeschätzt werden müssten. Ein größeres Angebot an Optionen für die Landwirtschaft ist aber positiv zu sehen. Durch die definitiv verringerte Exposition von Nichtzielflächen und Gewässern mit Herbiziden oder anderen Pflanzenschutzmitteln profitiert die Umwelt. Je nach Art der Anwendung sind aber ähnliche oder sogar stärkere Effekte im Feld oder auf Nahrungsnetze möglich (s. o.).

Profiteure von nicht-chemischen Kontrollmethoden sind auch landwirtschaftliche Innovatoren und die anschließende verarbeitende Industrie, wenn sie neue Kulturen zur Diversifizierung der Produktion und zur Verlängerung von Fruchtfolgen anbauen wollen. Pflanzenschutzmittel sind nur für bestimmte Kulturen zugelassen, und wenn eine neue Nutzpflanzenart dabei nicht abgedeckt ist, steht kein Pflanzenschutzmittel zur Verfügung. Physikalische Verfahren können dagegen sofort angewendet werden, wenn die Art des Anbaus es erlaubt.

3.3.3 Hemmnisse

Es werden keine Hemmnisse für physikalische Pflanzenschutzmaßnahmen gesehen, solange die Maßnahmen für die Landwirte und Landwirtinnen ausreichend wirksam und wirtschaftlich sind. Da physikalische Verfahren immer an bestimmte Maschinen gebunden sind, während verschiedene Pflanzenschutzmittel auch mit derselben Ausrüstung ausgebracht werden können, sind die Investitionen für neue physikalische Maßnahmen für die Landwirtschaft höher einzuschätzen als bei neuen Pflanzenschutzmitteln, wenn das entsprechende Gerät und nicht die Dienstleistung eingekauft werden.

Eine Zulassungspflicht für physikalische Maßnahmen und entsprechende Maschinen besteht nicht, abgesehen von der technischen Prüfung, und eine systematische Bewertung physikalischer Maßnahmen auf ihre Umweltwirkung erfolgt nur selten. Trotzdem möchten vermutlich die landwirtschaftlichen Betriebe, Vertragsanbauunternehmen, Lohnunternehmer, Großhändler und Anbieter von Vollserviceleistungen verlässliche Angaben über die integrale Umweltfreundlichkeit der eingesetzten Methoden haben. Diese können dann auch als Marketinginstrument und Rechtfertigung höherer Preise und damit auch zur besseren Wirtschaftlichkeit bei den Landwirten und Landwirtinnen beitragen. Da aber für die Bewertung thermischer, mechani-

scher, elektrischer oder strahlenbasierter Pflanzenkontrollmethoden jenseits der einfachen Effizienzbonitur geeignete Methoden und Normen für die ökologische Bewertung fehlen, müssen innovative Unternehmen eigene Bewertungskonzepte selbst entwickeln oder – im Normalfall – auf ökologische Begleituntersuchungen generell verzichten. Die Schaffung von Normen zur ökologischen Verträglichkeit von Bodenbehandlungsmaßnahmen auf Basis groß angelegter Vergleichsprojekte und geeigneter wissenschaftlicher Kompetenz würde innovativen Forschern sehr weiterhelfen, da die meisten Innovatoren ohne diese Unterstützung ansonsten überfordert sind (M. Eberius, Crop.Zone, pers. Mitt. 2020).

Zusammenfassend stellt die oft fehlende ökologische Prüfung physikalischer Verfahren kein Hemmnis für die Vermarktung oder Anwendung der Verfahren dar. Allerdings sollte eine Bewertung nicht nur der Effizienz, sondern auch der Nebenwirkung erfolgen, um Verfahren mit unerwünschten Effekten identifizieren zu können. Um eine vergleichende Bewertung zu ermöglichen, wären Empfehlungen zur Durchführung solcher Studien sehr nützlich. Dabei sollten die Erfahrungen und Standards aus Feldstudien zu Effekten von Pflanzenschutzmitteln eingebracht werden.

3.3.4 Vernetzung / Kopplung mit weiteren Entwicklungen im Pflanzenschutz

Wie beim chemischen und biologischen Pflanzenschutz erlaubt eine Kopplung physikalischer Maßnahmen mit Möglichkeiten des *Digital Farming*, insbesondere durch Sensorik und KI zur sicheren Erkennung der Schadorganismen sowie Robotik zum gezielten Einsatz, eine höhere Selektivität der Maßnahmen und damit geringere Effekte auf tolerierbare Beikräuter und andere Nichtzielorganismen im Feld. Im Idealfall wird die Bekämpfung nur der einzelnen Beikräuter möglich, beispielsweise durch Strom- oder Laserimpuls. Beispiele zur Anwendung physikalischer Methoden als Ersatz für Molluskizide (FarmDemo 2017) oder für Fungizide (Thorvald 2021) betreffen autonome agierende Einheiten mit hoch entwickelter Robotik und Sensorik.

3.4 Vorbeugende Maßnahmen

3.4.1 Chancen und Risiken aus der Sicht eines umweltgerechten Pflanzenschutzes

Vorbeugende Maßnahmen, wie z. B. Bodenbearbeitung, Feldhygiene, Fruchtfolgen, Sorten und Präzisionszüchtung (s. Abschnitt 2.4), sind unter Umweltaspekten immer positiv zu werten, da sie die Notwendigkeit und das Ausmaß späterer invasiverer Maßnahmen verringern. Dies betrifft unerwünschte Nebenwirkungen von Maßnahmen, aber auch Energie- und Ressourcenbedarf. Vorbeugende Maßnahmen bilden daher die Basis des integrierten Pflanzenschutzes (s. Abbildung 1).

Daneben haben sie oft auch direkte positive Effekte auf die Umwelt. Fruchtfolgen, Zwischenfrüchte kleinräumiger Anbau, *Spot Farming* und Mischkulturen erhöhen die Agrarbioidiversität und damit wie Nützlingsförderung auch die Gesamtbiodiversität der Agrarlandschaft. Im EU-Projekt Farmland wurde festgestellt: „Schon eine Verkleinerung der durchschnittlichen Feldgröße von rund 5 Hektar auf 2,8 Hektar hatte den gleichen Effekt auf die Biodiversität wie eine Erhöhung des Anteils naturnaher Lebensräume von 0,5% auf 11%. Selbst wenn naturnahe Vegetation wie Hecken und Randstreifen zwischen den Felder fehlten, wirkte sich eine reduzierte Feldgröße positiv auf die Artenvielfalt aus.“ (Weltagrarbericht 2019; Sirami *et al.* 2019).

Als wichtige vorbeugende Maßnahme wurde in Abschnitt 2.4 die Sortenwahl identifiziert, die für die Erreger und Schädlinge, für die Abwehrmechanismen bestehen, keine oder weniger spätere Maßnahmen erfordern. Die Wirkung ist meist sehr spezifisch, zumindest bei mikrobiellen Er-

krankungen. Durch die Sortenwahl werden direkt nur Arten beeinflusst, die an der Pflanze fressen und somit potentiell Schädlinge darstellen. Auch wenn bei nicht exakt artspezifischer Wirkung eventuell andere Arten betroffen sein können, die keine Schadensschwelle erreichen, so ist doch im Vergleich zur Sprayapplikation die Expositionswahrscheinlichkeit von Nichtzielarten verringert.

Für in Pflanzen gegen Fressfeinde gebildete Toxine sollte aber der Expositionspfad über die Nahrungskette betrachtet werden. Getötete oder geschwächte Schädlinge können als leichte Beute von anderen Organismen aufgenommen werden. Damit könnte sich ein Wirkstoff dort anreichern und Wirkschwellen überschreiten, wenn er nicht schnell abgebaut wird oder nur sehr spezifisch wirkt. Dieses Risiko besteht auch bei der Anwendung von gesprühten Insektiziden, allerdings ist bei PIPs die kontinuierliche Produktion in der Pflanze zu berücksichtigen. In Versuche mit SmartStax Bt-Mais, Spinnmilben und Blattläusen als Primärkonsumenten und Spinnmilben, Florfliegen und Marienkäfern als Sekundärkonsumenten wurden keine akuten Effekte auf das Überleben, Entwicklung und Wachstum der Räuber festgestellt (Svobodová *et al.* 2017). Neben der direkten, von der lebenden Pflanze ausgehenden Fraßkette können Fraßketten im Boden oder Gewässer exponiert werden, wenn Pflanzenmaterial inklusive der darin gebildeten PIPs z. B. Ernterückstände oder Blätter) verfrachtet wird (Bundschuh *et al.* 2019).

3.4.2 Treiber, Stakeholder, Profiteure der Entwicklungen

Vorbeugende Maßnahmen als Basis eines integrierten Pflanzenschutzes liegen im Interesse aller Stakeholder. Für den Landwirt verringern sie die Notwendigkeit von späteren Maßnahmen und können somit Kosten senken, falls die vorbeugenden Maßnahmen nicht selbst kostenintensiv oder ertragsmindernd sind. Zudem erhöhen Fruchtfolgen, Mischkulturen und *Spot Farming* die Diversität der Agrarlandschaft. Daneben sind politische Vorgaben ein Treiber, insbesondere wenn die Politik gezielt Vorgaben zu Fruchtfolgen, landschaftsbezogenem Management (Wasserschutzberatung, z.B. im Rahmen der Umsetzung der Wasserrahmenrichtlinie (EG 2000), aber auch der neuen Düngeverordnung (BMJ 2019)) formuliert. und diese Vorgaben dann durch die Agrarberatung vor Ort kommuniziert werden. Treiber bei der Entwicklung neuer, resistenter Sorten ist in erster Linie die Nachfrage der Landwirtschaft.

Stakeholder sind alle vorher bei den verschiedenen Pflanzenschutzmaßnahmen erwähnten Gruppen. Hinzu kommen die Saatguthersteller als Produzenten resistenter Sorten. Pflanzenschutzmittelhersteller bekennen sich zum Integriertem Pflanzenschutz und somit auch zur Wichtigkeit vorbeugender Maßnahmen (IVA 2010). Insbesondere die führenden Unternehmen sind allerdings nicht nur auf Pflanzenschutzmittel beschränkt, sondern versuchen verstärkt komplette Lösungen für die Landwirtschaft anzubieten und somit weitere Märkte zu erschließen (Baumann 2017).

3.4.3 Hemmnisse

Bei der Nutzung resistenter Sorten ist zwischen gentechnisch und nicht gentechnisch erzeugten Sorten zu unterscheiden, da es gegenüber Gentechnik erhebliche Vorbehalte bis hin zu strikter Ablehnung in der Öffentlichkeit und damit auch in der Politik und bei NGOs gibt. Die Einstufung moderner Methoden der Manipulation des artspezifischen Genoms durch Genscheren (CRISPR/Cas) ist noch nicht abschließend diskutiert.

Kleinere Feldschläge, Mischkulturen oder *Spot Farming* als vorbeugende Pflanzenschutzmaßnahmen, die gleichzeitig die kleinräumige Diversität in der Agrarlandschaft erhöhen, verlangen Veränderungen in der allgemeinen Feldbearbeitung und im Pflanzenschutz: Großgeräte sind nicht mehr einsetzbar und bei Pflanzenschutzmaßnahmen sollten nur die betroffenen Pflanzen

behandelt werden. *Digital Farming* (s. Abschnitt 2.5.4) kann hier helfen, aber eine Umstellung auf solche Anbaumethoden verlangt Investitionen der Landwirte in den Gerätepark, die nur unter verlässlichen Regeln und Vorgaben seitens der Politik sinnvoll erscheinen. Zudem ist auch eine Vermarktung der Produkte oft schwieriger, da der Lebensmitteleinzelhandel oft Mengengarantien von den Produzenten einfordert und eine Direktvermarktung nicht für alle landwirtschaftlichen Betriebe möglich ist.

Da konkrete Vorgaben fehlen, sind die derzeitigen Regeln zu unspezifisch. Ein weiterer Aspekt liegt in der Komplexität der Dokumentation und des Monitorings. Viele vorbeugende Maßnahmen wirken langsam, teilweise erst über mehrere Vegetationsperioden und teilweise auch räumlich versetzt. Beispielsweise ist die effektivste Reduzierung von *Run-off*-Einträge in Gewässer meistens an einer anderen Stelle, z.T. auch weiter entfernt vom Gewässer, umzusetzen als dort, wo die Auswirkungen des *Run-off*- Ereignisses sichtbar werden (Bach *et al.* 2016, 2017a, 2017b). Dadurch können auch Schläge, die nicht direkt am Gewässer liegen und verschiedenen Landwirten gehören betroffen sein. Werden gezielte Maßnahmen mit synergistisch wirkenden Pflanzen (oder Pflanzengesellschaften) durchgeführt, bleiben die positiven Effekte nicht auf einen Schlag begrenzt, sondern erhöhen die Biodiversität auch in der Umgebung. Hier fehlen derzeit ebenso Förderinstrumente wie Bewertungsregeln und damit Anreizsysteme für den Landwirt oder die Landwirtin oder den Maschinenring, in Techniken zu investieren und entsprechende Maßnahmen umzusetzen.

Aus Sicht des Pflanzenschutzes könnten Anreizsysteme geschaffen werden, die Erleichterungen in der Anwendung ermöglichen, wenn bestimmte vorbeugende Maßnahmen umgesetzt werden. Dies sollte in Kombination mit einer weitgehend automatisierbaren Dokumentation machbar sein (*regulatory cloud*).

Die hohen Preise für Ackerland und dessen Knappheit erlauben es, auch schlecht behandelte Flächen mit wenig Bodenschutz und Feldhygiene problemlos zu tauschen, zu verkaufen oder zu verpachten. Dadurch sinken die Motivation und Wirtschaftlichkeit einer sorgfältigen, vorbeugenden Ackerhygiene.

Hemmnisse bei der Nutzung resistenter Sorten werden in der langwierigen Entwicklung insbesondere mit klassischen Züchtungsverfahren gesehen. Gentechnische Methode wie CRISPR erlauben eine zielgerichtetere und schnellere Sortenentwicklung, der Einsatz von GMP ist aber zurzeit in Europa nur sehr eingeschränkt möglich.

3.4.4 Vernetzung / Kopplung mit weiteren Entwicklungen im Pflanzenschutz

Vorbeugende Maßnahmen wie Kulturführung (insbesondere kleinräumige bedarfsgesteuerte Düngung und Bewässerung), standortangepasste Fruchtfolgen, kleinräumiger Anbau und Mischkulturen sowie Nützlingsförderung können durch Digitalisierung (Sensorik, Robotik, KI, *Big Data*) verbessert oder auch unter ökonomischen Gesichtspunkten erst ermöglicht werden. Vor allem kleinräumiger Anbau und Mischkulturen sind mit den heute üblichen, für große Schläge und Fruchtfolgen mit nur wenigen Kulturpflanzen ausgelegten Geräten nicht möglich, sondern verlangen Maschinen, die mithilfe hoch entwickelter Sensorik sehr gezielt und auch kleinräumig arbeiten können (s. Abschnitt 2.5.4).

Landschaftsbezogene, schlagübergreifenden Maßnahmen könnten zukünftig über die staatlichen Datenplattformen und Infrastrukturen (Geobox-Infrastruktur) planbar gemacht und den landwirtschaftlichen Betrieben als Handlungsoption vorgeblendet werden (z. B. *Runoff*- Reduzierung). Die Kombination konventioneller Großmaschinen mit kleinskalierten Robotiksystemen ermöglicht zukünftig eine detailscharfe standortspezifische Landbewirtschaftung und damit eine Reduzierung möglicher Umweltwirkungen.

3.5 Digital Farming

Digital Farming wurde in den vorigen Abschnitten von Kapitel 3 schon als wichtige Entwicklung zur Kopplung mit chemischen, biologischen, physikalischen und vorbeugenden Maßnahmen genannt und wird nun übergreifend behandelt.

3.5.1 Chancen und Risiken aus der Sicht eines umweltgerechten Pflanzenschutzes

Im Hinblick auf unerwünschte Nebeneffekte auf Nichtzielorganismen des Einsatzes von Pflanzenschutzmitteln, aber auch von physikalischen und vorbeugenden Maßnahmen sehen die Gutachter große Chancen im *Digital Farming*. Die konsequente Nutzung von *Digital Farming* wird zu gezielterem und damit geringerem Einsatz von Pflanzenschutzmittel führen, sei es durch gezieltere Applikation bis hin zur Behandlung einzelner Pflanzen, sei es durch bessere Datenanalyse und Prognosemodelle zur Planung von Applikationen, sei es durch optimiertes Landschaftsmanagement in Bezug auf *Hotspots* und Risikominderungsmaßnahmen. Am Ende ist ein feld- bzw. schlagspezifisches Management möglich, welches über eine *regulatory cloud*, d. h. der automatischen genauen Dokumentation während der Anwendung, jederzeit von Behörden nachvollziehbar sein sollte. Eine schnelle Entwicklung der flächendeckenden behördlichen Datengrundlagen und Zugriffsrechte sind hier essenziell, wie sie in der Geobox-Infrastruktur (s. Abschnitt 2.5) verwirklicht werden soll. Beispiele, die bereits Teile dieser Technologie umsetzen, sind die schon vorher erwähnten und beschriebenen Projekte PAM und PAM 3D (ZEPP 2021)) sowie NatShield (Böhrnsen 2015; Deter 2017). All diese Entwicklungen eröffnen die Möglichkeit einer schlag- und situationsspezifischen Festlegung der Anwendung während der Applikation („on the fly“).

Teilweise werden durch *Precision Farming* Reduktionen des Pflanzenschutzmitteleinsatzes von über 50 % erwartet, insbesondere bei Herbiziden kann das auch kurzfristig erreicht werden (Rajmis *et al.* 2020). Luuk van Duijn, von der niederländischen Behörde Ctgb hält eine Verringerung der eingesetzten Pflanzenschutzmittelmenge um mehr als 50% möglich (van Duijn 2019). Im Pestizidatlas 2022 ist sogar von Schätzungen von über 90 % Einsparung die Rede (Holdingshausen 2022). Das Reduktionspotential hängt aber sicherlich stark von der Kombination von Kultur und Mittel ab. De Witte *et al.* (2016) sprechen von positiven Auswirkungen, machen aber keine konkreten Schätzungen: „Durch einen optimierten, d. h. individuell angepassten Einsatz von Betriebsmitteln werden geringere Umweltauswirkungen durch die Landwirtschaft erwartet. Beispielsweise wird bei einem optimalen teilflächenspezifischen oder pflanzenspezifischen Einsatz der Pflanzenschutzmittelbedarf sinken. Hinzu kommt, dass die Automatisierung kleinere autonome Maschinenkonzepte mit positiven Umweltwirkungen wie einer geringeren Bodenbelastung oder kleinteiligeren Anbaustrukturen mit einer erhöhten Biodiversität ermöglichen.“ Als einen weiteren Vorteil für die Umwelt führen sie auf, dass bei einem digitalen Datenaustausch mit den Behörden nicht der guten fachlichen Praxis entsprechende Praktiken unmittelbar aufgedeckt würden. In diesem Zusammenhang wird eingeräumt, dass landwirtschaftliche Betriebe zwar „grundsätzlich den oft zitierten „gläsernen Landwirt“, der durch den digitalen Datenaustausch sämtliche Produktionsabläufe offenlegt und damit seine „Flexibilität“ in der Einhaltung der Rechtsvorschriften verliert“ fürchten. Allerdings würden insbesondere die Tierhalter und Tierhalterinnen dies eher als Chance sehen, die Akzeptanz der Tierhaltung zu erhöhen.

Damit solche Verfahren in der Landwirtschaft umgesetzt werden, ist zu prüfen, inwieweit die Regulation an die neuen Möglichkeiten angepasst werden kann, damit für die landwirtschaftlichen Betriebe Anreize entstehen in neue Techniken zu investieren. Geringere Kosten durch verringerten Aufwand an Pflanzenschutzmitteln reichen dafür wahrscheinlich nicht aus. Prof. Jens Karl Wegener, Leiter des Instituts für Anwendungstechnik im Pflanzenschutz am Julius-Kühn-Institut (JKI), schätzt das wie folgt ein (Agrarheute 2019): „Ich schließe nicht aus, dass es zukünftig digitale Anwendungen gibt, die in irgendeiner Form in der Zulassung Berücksichtigung

finden und sich in den Anwendungsbestimmungen niederschlagen. Im Prinzip haben wir das ja schon bei den abdriftmindernden Düsen. Hier ist der Einsatz eines spezifischen Mittels an eine bestimmte Düsentechnik gebunden. Das Ziel ist heute nicht mehr, Pflanzenschutzmittel möglichst gleichmäßig über die gesamte Zielfläche zu verteilen. Zukünftige Geräte unterstützen Anwender durch technische Assistenz, Vernetzung und Sensortechnik. So lassen sich Pflanzenschutzmittel einsparen, gezielter applizieren und Anwendungsbestimmungen automatisch einhalten. Für die teilflächenspezifische Applikation einzelner Mittel braucht es deshalb eine Spritze mit Direkteinspeisung. Hier werden Mittel und Wasser in separaten Behältern mitgeführt, erst unmittelbar vor der Ausbringung gemischt und in Echtzeit dosiert“ (Wegener in Agrarheute 2019). Bei geringerer Aufwandmenge durch zielgerichtete Applikation wären daher die Vertretbarkeit höherer Konzentrationen zugelassener Wirkstoffe in der Tankmischung und auch die Wiedertzulassung von Wirkstoffen, für die in einer flächigen Applikation auf EU-Ebene kein Beispiel für eine sichere Anwendung gezeigt werden konnte, denkbar. *Precision Farming* erfordert somit eine Überarbeitung der Risikoabschätzung und der Beurteilung von Risikominderungsmaßnahmen. Für manche Bereiche, wie z. B. Einträge in das Grundwasser oder Drainageeinträge in Gewässer, könnte der Anteil der durch *Precision Farming* behandelten Teilflächen direkt als Faktor, um die die Exposition vermindert wird, verwendet werden. In anderen Fällen, z. B. bei Spraydrifteinträgen in Feldraine oder Gewässer, ist die Lage der behandelten Teilflächen relevant und somit eine generelle Berücksichtigung in der Risikoabschätzung nicht möglich (Faupel *et al.* 2023).

Andere Umweltaspekte der Digitalisierung der Landwirtschaft sind bisher kaum analysiert und konnten auch im Rahmen dieses Gutachtens nicht weiter betrachtet werden. Daher seien an dieser Stelle nur Stichworte und Aspekte ohne Anspruch auf Vollständigkeit genannt.

- ▶ Wenn Digitalisierung zu höherer Produktivität führt, werden Flächen für andere Nutzung z.B. Naturschutz und Biodiversitätsförderung frei. Verringerung von Abstandsauf Auflagen durch weitere Driftreduktion steigert die Erträge in den ansonsten nicht behandelten Feldrändern. Zumindest theoretisch können durch randscharfe Pestizidanwendungen Flächen für Biodiversitätsförderung frei werden. Ein extremes Beispiel sind komplett andere Anbausysteme, wie z. B. *Vertical Farming* oder Aquaponic-Systeme zur Erzeugung z. B. von Gemüse oder Salaten, unter kontrollierten Bedingungen, mit geringerem Flächenbedarf.
- ▶ Andererseits könnte Digitalisierung auch eine intensive Bewirtschaftung auf Flächen erlauben, die bislang nur extensiv genutzt oder ökologisch wertvoll sind (Holdinghausen 2022).
- ▶ Bei autonomer Kleintechnik können andere Pflanzenbausysteme als große gleichförmige Schläge und Fruchtfolgen mit nur wenigen Kulturpflanzen mit positiveren Umweltwirkungen entwickelt werden (De Witte *et al.* 2016). Denkbar sind z. B. kleinere Schlaggrößen, Mischkulturen, und *Spot farming*. Durch eine höhere Vielfalt von Kulturen pro Fläche verringert sich auch der Schädlingsdruck und damit die Notwendigkeit von Pflanzenschutzmaßnahmen.
- ▶ Der Einsatz von kleinen autonomen Robotern oder Drohnen ist vermutlich mit weniger Emission als mit den heute eher üblichen großen Maschinen verbunden, und es können solarbetriebene Einheiten eingesetzt werden.
- ▶ Die Entwicklung von großen Trägerplattformen für robotische Beikrautkontrollsysteme, die dann ggf. auf festen Wegen die Bodenkompression minimieren, ist neben den stark beachteten autonomen Lösungen ein paralleler Entwicklungspfad (*Controlled Traffic Farming (CTF)*, Eder 2016).

- ▶ Der Einsatz von *Cloudservern* für Digital Farming ist mit Energie- und Ressourcenverbrauch verbunden, der möglichen Einsparungen z. B. bei Durchführung von Pflanzenschutzmaßnahmen entgegengesetzt werden sollte (*Rebound-Effekt*).
- ▶ Der Ressourcenverbrauch der neuen Geräte und ihr Recycling wäre zu betrachten, etwa in Hinblick auf Menge und Recyclingfähigkeit der eingebauten Seltenen Erden. Auch diesbezüglich wäre der Anteil der Landwirtschaft in Relation zum allgemeinen Verbrauch zu setzen.
- ▶ Falls durch Digitalisierung eine höhere Diversität der lokalen und regionalen Produktion und damit kürzere Lieferketten möglich werden, würden Umweltbelastungen durch Transporte verringert.

Haller *et al.* (2020) sehen Möglichkeiten der Digitalisierung nicht nur in der konventionellen, sondern auch in der ökologischen Landwirtschaft: „Die Präzisionslandwirtschaft galt lange Zeit lediglich als Mittel zur Optimierung von großflächigen Anbaupraktiken und *High-Input-Systemen*. Mittlerweile zeigt sie jedoch auch neue Anwendungsmöglichkeiten auf, welche auch dem Ökolandbau dienen können (z. B. präzise Beikrautregulierung, frühe Krankheitsdiagnostik auf dem Feld und im Stall, optimierte Düngung durch Drohnen, *Controlled Traffic Farming*, etc.). Die permanente Datenerhebung und -auswertung kann in weiterer Folge zu einer vertieften Kenntnis komplexer Zusammenhänge führen und fördert damit systembezogene, vorbeugende Maßnahmen.“

3.5.2 Treiber, Stakeholder, Profiteure der Entwicklungen

De Witte *et al.* (2016) identifizierten folgende Treiber für eine weiter zunehmende Digitalisierung der Landwirtschaft: Die fortschreitende Entwicklung der Digitalisierung in anderen Teilen der Gesellschaft wird an der Landwirtschaft nicht vorbeigehen. Der technische Fortschritt im Bereich der Sensortechnik und Datenverarbeitung und die zunehmende Verbreitung in anderen Industriezweigen werden die Kosten für solche Systeme auch in der Landwirtschaft deutlich senken. Die Digitalisierung bietet Unternehmen im vorgelagerten Bereich die Möglichkeit, über neue Produkte und Dienstleistungen zusätzliche Märkte zu erschließen. Aufgrund steigender gesellschaftlicher Anforderungen an die landwirtschaftliche Produktion werden die rechtlichen Rahmenbedingungen zunehmend verschärft. Digitalisierung steigert die Produktivität, sodass landwirtschaftliche Unternehmer versuchen werden dadurch ihre Effizienz zu steigern. Damit verbunden ist, dass neue Technologien auch die Arbeitsproduktivität erhöhen können, und damit helfen können den Fachkräftemangel in der Landwirtschaft zu überwinden. Die Digitalisierung der Landwirtschaft wird durch die Politik gefördert. Die ehemalige Bundeslandwirtschaftsministerin Julia Klöckner hat am 9. März 2020 die letzten Förderbescheide für die digitalen Experimentierfelder in der Landwirtschaft übergeben. Damit haben alle 14 Experimentierfelder ihre Arbeit aufgenommen. Hierfür hat das Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) für drei Jahre Mittel in Höhe von über 50 Millionen Euro eingeplant (BMEL 2021).

Da die Digitalisierung alle Bereiche des Pflanzenschutzes verändern kann, sind auch alle vorher erwähnten Stakeholdergruppen betroffen. Hinzu kommen IT-Unternehmen und entsprechende Dienstleister, welche dann auch Profiteure der Entwicklung sind. Diese Gruppe ist sehr divers, da durch die angestrebte Vernetzung der landwirtschaftlichen Prozesse hier etablierte und große bis sehr große IT-Unternehmen, Landmaschinenhersteller und Pflanzenschutzmittelproduzenten aber auch kleine *Startups* am Markt sind. Insbesondere der Bereich der auf Daten basierenden Dienstleistungsangebote wächst rapide.

Traditionelle Hersteller von Pflanzenschutzmittel entwickeln ihre Geschäftsmodelle gerade vom Verkauf von Wirkstoffen hin zu holistischen Angeboten als Pflanzenschutzdienste. Zum Beispiel

bewirbt ein Tochterunternehmen eines Pflanzenschutzmittelherstellers ihr Produktportfolio als „*Digital Farming Solutions*“ und bietet Landwirten eine Ertragsgarantie von 80% an, wenn alle Maßnahmen den Vorgaben folgen: „Sollte es dennoch einmal passieren, dass die Blattgesundheit Deiner Bestände weniger als 80 Prozent beträgt, greift unsere Garantie. Je nach Ausmaß des Blattschadens und gemäß den Bedingungen unserer Leistungsgarantie, gibt es dann eine gestaffelte Entschädigung, die nicht nur den Kaufpreis, sondern auch potentielle Ernteauffälle abdeckt.“ (BASF Digital Farming GmbH (2021)). D.h., der Landwirt bekommt zukünftig mehr und mehr Komplettpakete angeboten, und nicht mehr nur einzelne Pflanzenschutzmittel. Für die Firmen erweitern sich dadurch auch die Marktdurchdringung und die ökonomischen Möglichkeiten. Aber auch traditionell eher im Landhandel aktive Firmen bieten mittlerweile umfangreiche digitale Services an und gehören damit zu den Treibern und Profiteuren dieser Entwicklungen (z. B. BayWa AG 2021).

Profiteure der Digitalisierung könnten neben den Entwicklern, Vertreibern und Nutzern (Landwirte) digitaler Lösungen auch Verbraucher und Verbraucherinnen bzw. die Allgemeinheit sein, wenn Digitalisierung zu einer Reduzierung des Einsatzes von chemischen Pflanzenschutzmitteln führt und hilft, die Biodiversität der Agrarlandschaft zu erhöhen. Allerdings geht eine Analyse der sozialen und wirtschaftlichen Folgen der Digitalisierung der Landwirtschaft über den Anspruch dieses Gutachtens hinaus.

3.5.3 Hemmnisse

Digitalisierung verlangt Investitionen der Landwirtschaft in neue Technik. Nach De Witte *et al.* (2016) sind hier größere Betriebe (> 250 ha) im Vorteil. Allerdings könnten auch kleinere Betriebe von der Digitalisierung profitieren, wenn die Maschinen und Sensoren überbetrieblich eingesetzt werden. Maschinen können gemietet werden (z. B. Roboter zur Mehлтаubekämpfung im Weinbau, Thorvald 2021) oder es können Dienstleistungen bei Bedarf gebucht werden (z. B. Ausbringung von Nützlingen mittels Drohnen, BayWa AG 2021). Weiterhin erwarten De Witte *et al.* (2016), dass kleinere Betriebe und Nebenerwerbsbetriebe überproportional von in Zukunft verfügbaren Entscheidungsalgorithmen profitieren indem sie kostengünstigen Zugang zu hochwertigen produktionstechnischen Management- und Anbauempfehlungen erhalten, die bisher eher größeren Betrieben in Form einer Spezialberatung zugänglich waren. Somit würde künftig der Einfluss der agronomischen Managementfähigkeiten auf den Betriebserfolg sinken (De Witte *et al.* 2016).

Die Landwirtschaft steht neuen Technologien offen gegenüber, laut einer Studie von 2020 setzen 82 % der befragten Landwirte „*Smart-Farm-Technologie* bzw. Anwendungen“ schon ein (Rohleder *et al.* 2020). Höhere Produktivität, körperliche Entlastung und umweltschonendere Produktion werden dabei von jeweils ca. 80 % der Landwirte als Vorteile der Digitalisierung genannt. 92 % sehen hohe Investitionskosten als Nachteil an. Eine sehr große Mehrheit hat allerdings Sorge vor mehr staatlichen Kontrollmöglichkeiten und IT-Sicherheitslücken (89 bzw. 84 %). Die Angst vor dem „gläsernen Landwirt“ steht der Wunsch nach stärkerer Akzeptanz der Landwirtschaft durch höhere Transparenz gegenüber (De Witte *et al.* 2016). Ein weiteres Hemmnis kann die Sorge von Landwirten und Landwirtinnen vor Abhängigkeiten von einzelnen Firmen sein. Allerdings muss die technische Infrastruktur auch zur Verfügung stehen. Deutschland hinkt im Vergleich zu manch anderen Ländern mit schnellen Internetanschlüssen hinterher und insbesondere die Breitbandversorgung des ländlichen Raumes in Deutschland ist mangelhaft. Laut Breitbandatlas der Bundesregierung war im Schnitt noch nicht mal jeder zweite Haushalt in den ländlichen Gebieten mit einer 50 MBit-Leitung versorgt (Tageschau 2019). Diese Zahl bezieht sich allerdings auf den Stand 2017 (BMVI 2018). Nach aktuellen Zahlen (BMVI 2021) verfügten

Mitte 2021 82,8 % der Haushalte im ländlichen Bereich über einen Anschluss von mindestens 50 Mbit/s. Ob dies für zukünftige Anforderungen einer Digitalisierten Landwirtschaft ausreicht, oder Glasfaseranschlüsse erforderlich sind, wird sich zeigen. Neben der Anbindung der Höfe an das Internet ist auch die Verfügbarkeit des Mobilfunknetzes in der Fläche eine technische Voraussetzung für die Digitalisierung in der Landwirtschaft (BMEL 2021).

Die Umsetzung von Konzepten des *Digital Farming* in Bezug auf den Pflanzenschutz können durch die bestehende Regulation von Pflanzenschutzmitteln gehemmt werden. Neue Entwicklungen können oft nur zeitverzögert im Zulassungsverfahren berücksichtigt werden. Dies gilt für neue Hinweise auf Risiken von Mitteln aber auch für neue Techniken, die Risiken verringern können. Wenn die Anwendungen im Bereich *Digital Farming* es ermöglichen, nur Teilflächen oder einzelne Pflanzen zu behandeln oder Risikominderungsmaßnahmen situationsbedingt automatisch anzuwenden, dann ist zu prüfen, ob und wie dies bei der Zulassung berücksichtigt werden kann und sollte.

Neben den zu schaffenden technischen und regulatorischen Voraussetzungen spielen auch Datenschutz, Datenhoheit und Resilienz (hier: die Verfügbarkeit der Daten im Betriebsablauf) bei Landwirten eine große Rolle hinsichtlich ihrer Entscheidung zugunsten neuer Technologien, sei es gegenüber der Nutzung von *Clouds* im Besitz der Firmen, aber auch der Zugriffsmöglichkeit durch den Staat und den Kontrollorganen (Bitkom 2019; Rohleder *et al.* 2020; Reuter *et al.* 2022; Trapp *et al.* 2022).

Für alle Einsatzbereiche des *Digital Farming* gilt grundsätzlich, dass Geräte, Managementoptionen und Überprüfungen abhängig sind von der Funktionsfähigkeit der Server, der störungsfeien Datenübergabe an den zahlreichen Schnittstellen und von der Sicherheit der Systeme vor Cyberangriffen und Stromausfall. Der Aufbau redundanter Sicherheiten ist eine wesentliche Voraussetzung und ein wesentlicher Kostenfaktor einer resilienten Landwirtschaft der Zukunft.

3.5.4 Vernetzung / Kopplung mit weiteren Entwicklungen im Pflanzenschutz?

In diesem Gutachten wird *Digital Farming* vor allem in Verbindung mit Pflanzenschutz betrachtet und daher als zukunftsweisender Ansatz in Verbindung mit chemischen, biologischen, physikalischen und vorbeugenden Pflanzenschutzmaßnahmen angesehen und in den Abschnitten 2.5 beschrieben und in 3.1 bis 3.4 als Vernetzung dargestellt. Viele Weiterentwicklungen im Pflanzenschutz sind ohne Digitalisierung kaum vorstellbar.

Digital Farming ist allerdings natürlich nicht auf den Pflanzenschutz beschränkt, sondern greift in alle Bereiche der Landwirtschaft ein, woraus sich vielfältige Synergien ergeben: Sensordaten können nicht nur für das Monitoring oder die Vorhersage von Schädlingsbefall oder Krankheiten genutzt werden, sondern auch für die Erkennung des Bedarfs von Düngung und Bewässerung. Optimierte Bedingungen für die Nutzpflanzen wiederum erhöhen die Widerstandsfähigkeit gegen verschiedene Stressoren. Autonome Roboter für Pflanzenschutzmaßnahmen können ggfs. auch Aufgaben bei der Ernte oder der Vor- und Nachanbaubehandlung übernehmen.

Digital Farming nutzt intensiv georeferenzierte Daten. Es ist daher zu erwarten, dass in Zukunft auch die Zulassung von Pflanzenschutzmitteln dieser Entwicklung Rechnung tragen wird.

3.6 Zusammenfassung der Analyse

Wo liegen die Chancen und Risiken aus der Sicht eines ökologisch nachhaltigeren und umweltgerechten Pflanzenschutzes?

Die folgende Tabelle 14 gibt einen Überblick über die Einschätzung von Chancen und Risiken der in Kapitel 2 als relevant identifizierten Entwicklungen im Pflanzenschutz. Für die Bewertung von beispielhaften Entwicklungen im Pflanzenschutz wurde hier kategorisiert, ob durch neue Entwicklung eher eine Verbesserung, Verschlechterung, oder keine Änderung der Umweltauswirkungen im Vergleich zum konventionellen chemischen Pflanzenschutz zu erwarten ist. Betrachtet wurden dabei Effekte auf Nichtzielorganismen im Feld und auf Nicht-Zielflächen (inkl. Gewässern) sowie grob abgeschätzt der Energie- und Ressourcenverbrauch.

Neue Formulierung von Pflanzenschutzmittel z. B. mit Hilfe von Nanomaterialien dienen einer verbesserten Aufnahme der Wirkstoffe in die Pflanze und führen damit zu geringeren Aufwandmengen und somit zu weniger „Verlust“ der Stoffe in die Umwelt. Allerdings sind auch die Umwelteigenschaften der Formulierungsstoffe zu betrachten. Speziell für Nanoformen sind dafür Anpassungen in der Risikobewertung notwendig, um deren spezifischen Eigenschaften beurteilen zu können (Quik *et al.* 2020).

Aufgrund ihrer höheren Spezifität und biologischen Abbaubarkeit sind weniger Effekte auf Nicht-Zielorganismen durch Biopestizide wie RNAi- oder Protein-basierte Wirkstoffen zu erwarten als bei vielen chemischen Wirkstoffen. Bei Herstellung und Anwendung gehen wir ohne eine genaue Analyse von keinen großen Unterschieden in Bezug auf Energie- und Ressourcenverbrauch von neuen chemischen und biologischen Pflanzenschutzmitteln bei Herstellung und Anwendung aus.

Bei den physikalischen Methoden der Beikrautkontrolle kann dagegen je nach Methode ein hoher Energieverbrauch bei der Anwendung notwendig sein. Effekte auf Nicht-Zielflächen sind durch physikalische Verfahren nahezu auszuschließen, allerdings sind Effekte auf Nichtzielorganismen im Feld z. B. im Boden sehr stark von der angewandten Methode abhängig. Eine nächtliche Bestrahlung von Nutzpflanzen mit UV Licht als Ersatz für Fungizide ist schon auf dem Markt (Thorvald 2021). Die Behandlung bleibt auf die Kulturpflanzenreihen beschränkt und es gibt keine Belastung mit toxischen Substanzen. Zur möglichen Auswirkung auf nachtaktive Insekten liegen keine Informationen vor.

Die Verwendung von PIPs als vorbeugende Maßnahme hat durch die Produktion von Wirkstoffen hoher Spezifität in der Nutzpflanze selbst geringere Umweltauswirkung als die Anwendung von Pflanzenschutzmitteln, da die Exposition von Nichtzielorganismen stark verringert wird. Auch in Bezug auf Energie- und Ressourceneffizienz fällt die Bilanz positiv aus, da keine (oder zumindest) weniger Pflanzenschutzmaßnahmen in der Kultur notwendig werden.

Die Auswirkung der Digitalisierung auf die Biodiversität im Feld und in Nichtzielflächen wird generell positiv gesehen. Durch bessere Erkennung von Schädlingsbefall oder Beikräutern, Robotik und der Nutzung großer Datenmengen bietet sich die Chance, Pflanzenschutzmittel gezielter einzusetzen und somit die Aufwandmengen je Fläche und den Eintrag in Nichtzielflächen inklusive Gewässer zu senken. *Precision Farming* kann aber auch durch optimierte kleinräumige Standortwahl und optimierte Versorgung der Pflanzen z. B. mit Nährstoffen und Wasser den vorsorgenden Pflanzenschutz unterstützen, da verbesserte Bedingungen bzw. reduzierter Stress die Widerstandsfähigkeit der Nutzpflanzen gegenüber Schädlingen und Krankheiten erhöht. Sensorik und Robotik erlauben physikalische Maßnahmen zielgerichteter durchzuführen, so dass z. B. bestimmte Beikrautpflanzen mechanisch, mit Licht oder Strom abgetötet werden können, wäh-

rend Beikräuter, die vermutlich keine relevanten Ertragseinbußen verursachen, geschont werden können. Weiterhin ermöglicht die digitale kleinräumliche Erfassung der Agrarlandschaft neue Möglichkeiten der Landschaftsanalyse und des -managements, sei es ein Management von *Hotspots* in der Landschaft mit hohem Risiko von Pflanzenschutzmitteleinträgen oder ein Management von Flächen mit hoher Biodiversität als Kompensation für intensiv genutzte Agrarflächen.

In Bezug auf die Auswirkung der Digitalisierung auf Ressourcen- und Energieverbrauch konnte keine tiefgreifende Analyse durchgeführt werden. Der zusätzliche Bedarf an z. B. seltenen Erden für die Herstellung von digitalen Komponenten in der Landwirtschaft und das Risiko des Verbleibs in der Umwelt sollte mit dem möglichen Nutzen der eingesetzten Technik für die Umwelt abgewogen werden. Kleine, mobile, autonome Einheiten als Ersatz für schwere, dieselbetriebene Maschinen könnten z. B. die Energie- und CO₂ Bilanz verbessern, wobei auch Herstellung und Nutzungsdauer der Geräte berücksichtigt werden sollten. Hierzu sind Erfahrungen aus einer breiteren Praxis notwendig und müssen in der weiteren Entwicklung entsprechen berücksichtigt werden.

Tabelle 14: Überblick über Chancen und Risiken verschiedener Pflanzenschutzrends in Bezug auf den Umweltschutz in Relation zu konventionellem chemischem Pflanzenschutz

Kat.	Trend	Feld	NZF	En	Res	Chancen	Risiken
C	Nanopestizide	+/?	+/?	0	0	Bessere Aufnahme in die Pflanzen => geringere Aufwandmengen	<i>Slow release</i> , Bodenbelastung durch Nanomaterialien, z. B. Metalle
C+B	GMP mit Herbizidresistenz	-	-			-	Höherer Herbizideinsatz, Resistenzbildung
B	Protein und RNA Protein basierte Biopestizide	+	+	0	0	Höhere Spezifität, höhere Abbaubarkeit	Je nach Spezifität Effekte auf Nichtzielorganismen
P	Beikrautkontrolle	+/?	+	0/-	0	Keine Exposition von NZF	Effekte im Feld z. B. auf Bodenfauna je nach Methode, teilweise hoher Energieverbrauch
P	Pilzkontrolle mit UV-Licht	+?	+?	?	?	Ersatz von Fungiziden	Effekte z. B. auf nachtaktive Insekten unklar
V	Resistente Pflanzen, Plant Incorporated Protectants (PIP)	+	+	+	+	Keine direkte Exposition von NZF und geringere Exposition von Nichtzielarten auf dem Feld, hohe Spezifität, hohe Abbaubarkeit	Je nach Spezifität Effekte auf nahverwandte Nicht-Zielorganismen
DF+ C/B	Gezieltere PSM Applikation im Rahmen von <i>Precision Farming</i>	+	+	+0	?	Reduzierung der Aufwandmengen möglich, Verringerung von Emissionen durch automatische Risikominderung, Autonome Systeme mit geringerem Energieverbrauch in der Anwendung	Ressourcen- und Energieverbrauch für neue Geräte, Entsorgung

DF+ P	Physikalische Beikrautkontrolle mit <i>Precision Farming</i>	+	+	+	?	Geringere Wirkungen auf Nichtzielorganismen, Erhöhung der Diversität, wenn Beikräuter unter Schadensschwelle geschont werden. Energieeinsparung	s.o.
DF	<i>Precision Farming</i> generell (Sensorik, Robotik)	+	+	+	?	Erlaubt Alternativen zu großen Schlägen und Fruchtfolgen mit nur wenigen Kulturpflanzen und dadurch Erhöhung der Agrarbiodiversität, Verringerung von Pflanzenschutzmaßnahmen durch höhere Widerstandsfähigkeit optimal versorgter Nutzpflanzen, Bei kleinen Maschinen weniger Bodenverdichtung, geringerer Energieaufwand	s.o.
DF	<i>Big Data</i> , KI, Landschaftsanalysen	+	+	?	?	Bessere Datenbasis für Entscheidungen, Optimierung des Pflanzenschutzes und der Bewirtschaftung insgesamt (z. B. Reduzierung des chem. PS, Düngung, Vermeidung von Fehlanwendungen, Kultur- und Sortenwahl, Management von Biodiversitätsmaßnahmen), Höhere Effizienz kann Flächen für Biodiversitätsförderung frei machen	Höhere Effizienz kann bisher nicht genutzte Flächen für Landwirtschaft rentabel machen. Energieverbrauch durch Cloud-Systeme, Rohstoffverbrauch für neue Geräte

C = chemische, B = biologische-biotechnologische, P = physikalische, V = vorbeugende Pflanzenschutzmaßnahme, DF = Digital Farming, Feld = Direkte Effekt auf Nichtzielorganismen im Feld, NZF = Direkte Effekte in Nichtzielflächen inkl. Gewässer, En = Energie und Klima, Res = Ressourcenverbrauch, Einschätzung + = positiver, - = negativer, 0 = geringer oder ? = unbekannter Einfluss auf Umweltverträglichkeit

Quelle: Eigene Darstellung. Fraunhofer IME und RLP AgroScience

Wer sind die Treiber, Stakeholder, Profiteure der Entwicklungen?

Was sind die entscheidenden Hemmnisse, die für eine weitere Entwicklung oder Implementierung überwunden werden müssen?

Treiber für neue **Entwicklungen chemischer Pflanzenschutzmittel** sind die Erschließung neuer Absatzmöglichkeiten für die Produzenten und der Bedarf der Landwirtschaft nach sicheren und effizienten Mitteln auch gegen neue Schädlinge und Krankheiten sowie als Ersatz für wegfallende Wirkstoffe und Mittel wegen Resistenzbildung oder nicht verlängerter Zulassung (

Tabelle 15). Stakeholder in der Diskussion um chemische Pflanzenschutzmittel sind neben Produzenten, Vertrieb, Beratung, Maschinenherstellern und der Landwirtschaft als Anwendende der Produkte, auch Entwickler und Anbietende alternativer Pflanzenschutzmaßnahmen. Die Politik nimmt durch Zielvorgaben und Zulassungsbestimmungen, Handelsketten, Verbraucher und Verbraucherinnen und NGOs nehmen durch die Nachfrage nach kostengünstigen und/oder „chemiefreien“ Lebensmitteln und umweltschonende Produktion Einfluss auf die Entwicklung. Profiteure neuer Mittel sind, wenn sie sich auf dem Markt durchsetzen, die Hersteller. Die Landwirtschaft profitiert, indem ihr mehr Möglichkeiten zur Verfügung stehen und wenn die Produkte besser in Bezug auf Kosten, Wirkung und Anwendungssicherheit oder Umweltverträglichkeit sind. Verbraucher und Verbraucherinnen können von neuen Pflanzenschutzmitteln durch niedrige Lebensmittelpreise profitieren. Hemmnisse für die Neuentwicklung chemischer Mittel sind die hohen Entwicklungskosten und zumindest in der EU die kleiner werdenden Marktgrößen durch die Vorgabe, den Einsatz chemischer Mittel in den nächsten Jahren deutlich zu senken und den Ökolandbau auszubauen, sowie die zunehmende Nachfrage nach „chemiefreien“ Lebensmitteln.

Entwicklungen im biologischen / biotechnischen Pflanzenschutz werden von der Suche nach Alternativen zu chemischen Mitteln und wirtschaftlichen Interessen der Entwickler und Hersteller getrieben. Stakeholder sind dieselben wie für chemische Pflanzenschutzmittel aufgelistet. Profiteure sind die Anbieter, wenn sich die Produkte oder Dienstleistungen auf dem Markt durchsetzen, und die Landwirtschaft, wenn ihr mehr ökonomisch und ökologisch sinnvolle Alternativen zum chemischen Pflanzenschutz zur Verfügung stehen. Neue effiziente biologische Pflanzenschutzmittel könnten die Erträge des Ökolandbaus erhöhen, wenn chemische Pflanzenschutzmittel nicht zur Verfügung stehen. Verbraucher und Verbraucherinnen können durch ein größeres Angebot „chemiefreier“ Lebensmittel profitieren. Wirtschaftliche Hemmnisse ergeben sich insbesondere dadurch, dass eine höhere Spezifität der Wirkung auch die Marktgröße verringert. Im Extremfall wirkt ein Mittel nur auf einen Schädling. Unter Umweltgesichtspunkten ist dies zu begrüßen, aber dadurch sinkt die Gewinnmarge im Vergleich zu Mitteln, die bei gleichen Zulassungs- und Entwicklungskosten gegen mehrere Schädlinge wirken. Für kleine Anbieter und Start-ups kann der Aufwand für die Zulassung schwieriger zu stemmen sein als für größere Anbieter.

Treiber für die Weiter- oder **Neuentwicklung physikalischer Maßnahmen** sind wie für biologische Methoden der Bedarf nach Alternativen zum chemischen Pflanzenschutz und wirtschaftliche Interessen der Geräteentwickler und Dienstleister. Interessensgruppen und Profiteure sind ebenfalls die gleichen, auch wenn Anbieter und Dienstleister andere Firmen sein können. Physikalische Maßnahmen sind oft an spezielle Maschinen gebunden, während verschiedene chemische oder biologische Pflanzenschutzmittel auch mit demselben Gerät appliziert werden können. Investitionen für die Anwendung neuer physikalischer Maßnahmen sind daher höher als für neue Pflanzenschutzmittel, außer wenn die Maßnahme als Dienstleistung angeboten wird. Dass es für physikalische Maßnahmen keine systematische Umweltrisikobewertung wie bei Pflanzenschutzmitteln gibt, stellt an sich kein Hemmnis für ihre Weiterentwicklung dar, sollte aber im Sinne eines umweltverträglichen Pflanzenschutzes bei der Implementierung durch Empfehlungen oder Fördermaßnahmen berücksichtigt werden.

Vorbeugender Pflanzenschutz sollte im Integrierten Pflanzenschutz die Basis darstellen, da dieser die Wahrscheinlichkeit der Notwendigkeit späterer Maßnahmen verringert. Der wichtigste Treiber ist daher die Vermeidung späterer Maßnahmen, insbesondere der Druck den Einsatz chemischer Mittel zu verringern und wirtschaftliche Interessen z. B. von Anbietern resistent-

ter Pflanzen oder von Geräten, die im vorbeugenden Pflanzenschutz eingesetzt werden. Stakeholder sind wiederum alle am Pflanzenschutz ökonomisch beteiligten Gruppen sowie Politik, Verbraucher und Verbraucherinnen und NGOs. Maßnahmen des vorbeugenden Pflanzschutzes wie der Ersatz großer Schläge und Fruchtfolgen mit nur wenigen Kulturpflanzen durch andere Anbauverfahren haben direkten Einfluss auf die Agrarbiodiversität und die Struktur der Agrarlandschaft. Insofern kann die Öffentlichkeit nicht nur als Verbraucher und Verbraucherinnen von Lebensmitteln profitieren, sondern stark als „Verbraucher und Verbraucherinnen von Biodiversität“, im Sinne von Erholung in einer vielfältigeren Agrarlandschaft. Hemmnisse in der Weiterentwicklung vorbeugender Maßnahmen können in Bezug auf die Sortenwahl, die Langwierigkeit klassischer Züchtungsverfahren sein und die geringe Akzeptanz von gentechnisch veränderten Pflanzen, wobei zum Teil die Einstufung verschiedener neuer Verfahren noch nicht abschließend geklärt ist. Alternative Anbaumethoden, wie Mischkulturen oder *Spot Farming* verlangen andere Maschinen als zurzeit in großen Schlägen und Fruchtfolgen mit nur wenigen Kulturpflanzen eingesetzt werden und damit Investitionen der Landwirtschaft, wenn Maschinen nicht gemietet oder direkt die Dienstleistung eingekauft werden kann. Es bleibt aber das Risiko, dass vorhandene Maschinen wahrscheinlich weniger genutzt werden können. Fehlende Anreizsysteme für vorbeugende Maßnahme stellen ein weiteres Hemmnis dar.

Die weitere **Digitalisierung der Landwirtschaft** wird nach De Witte *et al.* (2016) durch folgende Trends angetrieben: Allgemein fortschreitende Digitalisierung, Kostensenkung durch technischen Fortschritt im Bereich der Sensortechnik und Datenverarbeitung in anderen Industriezweigen, Erschließung neuer Märkte über neue Produkte und Dienstleistungen für IT-Firmen, steigender gesellschaftlicher Anforderungen an die landwirtschaftliche Produktion und Verschärfung der rechtlichen Rahmenbedingungen, Arbeitskräftemangel und letztendlich die Aussicht auf eine Steigerung der Produktivität der Landwirtschaft. Zusätzlich zu den schon genannten Stakeholdern im Pflanzenschutz kommen Anbieter von IT Lösungen und Cloud-Anbieter ins Spiel, die damit auch Profiteure der Entwicklung sind. Weitere Profiteure der Digitalisierung kann die Landwirtschaft durch die bessere Nutzung der Betriebsmittel sein. Welche Auswirkung die Digitalisierung auf den Strukturwandel in der Landwirtschaft hat, lässt sich kaum prognostizieren (De Witte *et al.* 2016) und wird hier auch nicht weiter betrachtet. Unter Umweltsichtspunkten kann die Gesellschaft profitieren, wenn durch Digitalisierung die Produktion nachhaltiger wird. Viele Alternativen zum chemischen Pflanzenschutz sind heute ohne Digitalisierung kaum denkbar und auch alternative Anbaumethoden können durch Sensorik, Robotik und Big Data profitabler werden. Hemmnisse für weitere Digitalisierung im Pflanzenschutz und Landwirtschaft allgemein bilden Investitionskosten in neue Geräte und Vorbehalte in Bezug auf Datenhoheit, Datensicherheit und Datenschutz. Für manche Lösungen ist vermutlich auch die technische Infrastruktur, d.h. Internet- und Mobilfunkanbindung, noch nicht überall gegeben. Manche Möglichkeiten des *Precision Farming*, wie z. B. Teilflächenapplikation, sind in der Zulassung von Pflanzenschutzmitteln noch nicht berücksichtigt, so dass die Landwirtschaft noch nicht voll profitieren kann.

Tabelle 15: Treiber, Stakeholder, Profiteure von Entwicklungen im Pflanzenschutz sowie Hemmnisse für weitere Entwicklungen und Implementierung

Maßnahmen	Treiber	Stakeholder	Profiteure	Hemmnisse
Chemisch	Erschließung neuer Märkte, Bedarf nach effizienten Mitteln auch gegen neue Schädlinge und Krankheiten, Resistenzmanagement, Ersatz für wegfallende Wirkstoffe	Produzenten, Handel, Maschinenhersteller, Landwirtschaft, Politik / Regulation, Handelsketten, Verbrauchergruppen / NGOs, Auftragslabors, Consulting, Wissenschaft	Produzenten und nachgeordnete Kette, Landwirtschaft, Verbrauchergruppen (Lebensmittelpreise), Umwelt (Höhere Effizienz je Fläche), Auftragslabors, Consultants	Entwicklungs- und Zulassungskosten, Öffentl. Akzeptanz, Sinkende Marktgröße (in EU)
Biologisch	Reduktion von chem. PSM und Verlangen nach "chemiefreien" Lebensmitteln, Bedarf nach Pflanzenschutz im Ökolandbau, Marktchance für kleinere Unternehmen, Neuer Markt für Produzenten von chem. PSM	Entwickler, Produzenten, Landwirtschaft, Politik / Regulation Verbrauchergruppen, Handelsketten, NGOs, Auftragslabors, Consulting, Wissenschaft	Entwickler & Produzenten, (Öko-)Landwirtschaft, Verbrauchergruppen, Auftragslabors, Consultants	Kleine Märkte für spezifische Mittel, Zulassungsverfahren z. T. zu unflexibel PIP: Geringe Akzeptanz von GMP in der Öffentlichkeit, keine Zulassung von GMP in den meisten EU-Ländern "
Physikalisch	s. biologisch	Entwickler / Maschinenhersteller, Landwirtschaft, Politik / Regulation, Handelsketten, Verbrauchergruppen, NGOs, Wissenschaft	Maschinenhersteller, Dienstleister, Landwirtschaft, Verbrauchergruppen	Maschinengebunden und daher relative hohe Investitionen falls nicht als Dienstleistung angeboten, Keine systematische Bewertung der Auswirkung auf Nichtzielorganismen
Vorbeugend	Basis des Integrierten Pflanzenschutzes, Vermeidung späterer Maßnahmen, Notwendigkeit der Reduktion des chemischen PS durch politische Vorgaben	Entwickler, Produzenten, Maschinenhersteller, Saatgutproduzenten, Landwirtschaft, Politik / Regulation, Handelsketten, Verbrauchergruppen, NGOs, Wissenschaft	Maschinenhersteller, Saatgutproduzenten, Landwirtschaft, Verbrauchergruppen, Öffentlichkeit	langwierige klassische Züchtung, Akzeptanz / Zulassung von GMP, Alternative Anbaumethoden verlangen neue Maschinen und damit hohe Investitionen, fehlende Anreizsysteme für vorbeugende Maßnahme
Digitalisierung	Fortschreitende Digitalisierung allgemein, Kostensenkung durch technischen Fortschritts in anderen Industriezweigen, Erschließung neuer Märkte, Steigende ge-	Alle oben genannten Gruppen plus IT Branche	Entwickler, Anbieter und Nutzer (Landwirtschaft) digitaler Lösungen, Verbrauchergruppen, Gesellschaft	Technische Infrastruktur, Investitionsbedarf, Nicht-Berücksichtigung technischer Möglichkeiten in der PSM Regulation,

Maßnahmen	Treiber	Stakeholder	Profiteure	Hemmnisse
	sellschaftliche Anforderungen an landwirtschaftliche Produktion und Verschärfung der rechtlichen Rahmenbedingungen, Steigerung der Produktivität, Fachkräftemangel			Datenhoheit, Datensicherheit, Datenschutz

Quelle: Eigene Darstellung. Fraunhofer IME und RLP AgroScience

Welche Vernetzung gibt es mit weiteren Entwicklungen im Pflanzenschutz? Wie stark sind diese Entwicklungen gekoppelt?

Alle Pflanzenschutzmaßnahmen sind im integrierten Pflanzenschutz insofern gekoppelt, weil eine klare Priorisierung von Vorbeugung vor physikalischen / biologischen / biotechnischen und letztendlich chemischen Maßnahmen vorgegeben ist: Eine erfolgreiche Vorbeugung senkt die Wahrscheinlichkeit und den Umfang späterer Bekämpfungsmaßnahmen und physikalische Beikrautbehandlung ersetzt Herbizide. Andererseits können sich verschiedene Verfahren ergänzen: Biopestizide können in Nanoformulierungen eingesetzt werden, RNAi Insektizide kann die Wirkung von chemischen Insektiziden verstärken. Die wichtigsten Kopplungen ergeben sich mit den Möglichkeiten der Digitalisierung, Sensorik, Robotik, Big Data, zur Effizienzsteigerung verschiedener Pflanzenschutzmaßnahmen und den Möglichkeiten von kleinstrukturiertem Anbausystemen als Alternativen zu großen einheitlich bewirtschafteten Schlägen und Fruchtfolgen mit nur wenigen Kulturpflanzen. Dies kann im Integrierten Pflanzenschutz die geforderte Verringerung des Einsatzes chemischer Pflanzenschutzmittel unterstützen.

4 Bewertung und Empfehlungen

Es werden zunächst die Entwicklungen betrachtet, die unter Umweltgesichtspunkten eher kritisch gesehen werden (Frage 7 der Einleitung). Danach werden die Verfahren genannt, die in Bezug auf das Ziel des NAP, die unerwünschten Effekte von Pflanzenschutzmitteln deutlich zu senken, am vielversprechendsten sind (Frage 8), bevor Voraussetzung und Anforderungen für eine erfolgreiche Umsetzung dieser Neuerungen diskutiert werden (Frage 9).

4.1 Am wenigsten ökologisch nachhaltig eingeschätzte Entwicklungen

Die analysierten Entwicklungen im Pflanzenschutz werden unter Umweltaspekten als weniger bedenklich im Vergleich zur aktuellen Situation eingeschätzt, sofern sie nach Guter Landwirtschaftlicher Praxis im Integriertem Pflanzenschutz angewendet werden. Eine Ausnahme bildet der Einsatz von **Pflanzen mit Herbizidresistenzen** und dem damit vereinfachten Einsatz von Breitbandpestiziden in der Fläche. Dies wird aber zumindest für Deutschland und die meisten Mitgliedsländer der EU als nicht relevant betrachtet. Manche Anwendungen des *Precision Farming*, in denen Risikominderungsmaßnahmen situations- und raumbezogen automatisch angewendet werden, können zu einem höheren Pflanzenschutzmitteleinsatz führen als die konsequente Befolgung von Maßnahmen, die aus *worst-case* Annahmen abgeleitet wurden. Allerdings wird z. B. bei der „intelligenten Spritze“ ein Gewässer auch keine zusätzlichen Pflanzenschutzmitteleinträge erhalten, sondern das allgemeine Schutzniveau wird beibehalten. Auf der anderen Seite werden durch automatisches Abschalten in Situationen mit Eintragsrisiko Fehler bei der Applikation vermieden, so dass sich ein positiver Effekt für die Umwelt ergibt.

Physikalische Maßnahmen zur Beikrautkontrolle stellen eine vielversprechende Alternative zu Herbiziden dar. Die Verfahren unterscheiden sich in Bezug auf die verwendete Technik und damit den Energiebedarf und auf die Selektivität. Indirekte Effekt auf die Nahrungskette im Feld durch den Wegfall an Nahrungspflanzen für Insekten und Vögel, sind dieselben wie bei einer Herbizidbehandlung mit derselben Selektivität und Effizienz. Daher ist auch eine physikalische Beikrautregulierung als umso umweltschonender zu bewerten, je selektiver unerwünschte Beikräuter behandelt werden können, je besser der Boden im Gesamtprozess geschützt wird und je geringer der Energieverbrauch durch die Maßnahme ist. Ein Beispiel für als nicht nachhaltig eingeschätzte physikalische Maßnahmen stellt das Behandeln der Flächen mit Heißwasser bzw. das im ökologischen Landbau verbreitete Abflämmen dar. Hier sind Nebenwirkungen auf Nichtzielorganismen und Bodenfauna auch bei der Einhaltung der Guten Landwirtschaftlichen Praxis wahrscheinlich nur schwer vermeidbar. In jedem Fall sollte auch bei physikalischen Verfahren nicht nur die Effizienz, sondern auch Energieverbrauch und unerwünschte Effekte auf Nichtzielorganismen betrachtet werden. **Nichtselektive physikalische Maßnahmen** sind daher in Bezug auf die Effekte im Feld eher kritisch zu betrachten.

Bei **Nanopestiziden** besteht noch Unsicherheit, ob ihr Umweltrisiko in den aktuellen Bewertungsverfahren ausreichend sicher beurteilt werden kann. Quik *et al.* (2020) empfehlen daher Anpassungen um Verbleib in der Umwelt und Effekte dieser Substanzen besser abschätzen zu können. Nanopestizide können daher nicht generell als wenig nachhaltig eingestuft werden.

4.2 Vielversprechendste Entwicklungen für einen verbesserten Schutz der Umwelt (Leuchttürme)

Alle analysierten Beispiele für neue Entwicklungen im Pflanzenschutz führen wahrscheinlich zur Reduzierung der unerwünschten Effekte von Pflanzenschutzmitteln in der Umwelt. Die folgenden vier Entwicklungen halten wir für die vielversprechendsten:

1. Alle Ansätze, die es erlauben, eine höhere Agrarbiodiversität zu erreichen, indem große Schläge und wenige Kulturen ökonomisch vertretbar durch andere, kleinräumigere Anbauformen verschiedener Kulturpflanzen abgelöst werden
2. Durch innovative Techniken generierte neue Nutzpflanzensorten mit Resistenzen oder Abwehrmechanismen
3. Alternativen zu chemischen Pflanzenschutzmitteln wie z. B. Biopestizide als Insektizide und Fungizide und Verfahren der physikalischen Beikrautkontrolle
4. Gezieltere Anwendung von Pflanzenschutzmitteln durch Kombination verschiedener neuer Techniken und Technologien, insbesondere *Digital Farming*

Wir haben die Entwicklungen hier im Sinne des Integrierten Pflanzenschutzes geordnet, d. h. vorbeugende Maßnahmen an den Anfang gestellt, gefolgt von Alternativen zu chemischen Maßnahmen und verbesserte Anwendung chemischer Mittel.

Der chemische Pflanzenschutz ist eine Ursache des zu beobachteten Rückgangs der Biodiversität in der Agrarlandschaft (Schäffer *et al.* 2018). Eine weitere wichtige Ursache liegt in der strukturellen Verarmung durch große Schläge oder Fruchtfolgen mit nur wenigen Kulturpflanzen in vielen Gebieten. Mit Blick auf die gewünschte Erhöhung der Biodiversität der Agrarlandschaft haben wir daher alle **Maßnahmen zur Erhöhung der Agrarbiodiversität** an erste Stelle gesetzt. Dies umfasst z. B. Roboter mit hoch entwickelter Sensorik für die Bewirtschaftung von Mischkulturen oder von kleinräumigen standortbezogenen Anbausystemen (Wegener *et al.* 2019). Fruchtfolgen, und Mischkulturen bilden schon wichtige Faktoren eines vorbeugenden Pflanzenschutzes, da dadurch für die Ausbreitung von Krankheiten und Schädlingen schlechtere Bedingungen als in großen Schlägen und Fruchtfolgen mit nur wenigen Kulturpflanzen geschaffen werden. In der Praxis sind sie jedoch noch die Ausnahmen, da die vorhandene Technik oft dafür nicht ausgelegt ist. Neue Technik wie kleine autonome Einheiten mit hochentwickelter Sensorik kann hier die Bearbeitung erleichtern oder auch erst ökonomisch lohnend machen (Wegener *et al.* 2019).

An die zweite Stelle haben wir die **Entwicklung neuer Nutzpflanzensorten** gestellt. Als vorbeugende Maßnahme ist sie ökologisch die beste Wahl, da sie im Idealfall eine spätere Maßnahme überflüssig macht. Sorten mit Resistenzen gegenüber den wichtigsten Krankheiten oder Schädlingen wären daher wünschenswert und haben sich in der Praxis auch schon bewährt. Nachteile werden in der teilweise langen Entwicklungszeit gesehen und darin, dass die Sorten zurzeit noch oft auf eine oder wenige Resistenzen beschränkt ist. Dies gilt auch für neue Verfahren wie CRISPR/Cas, auch wenn damit eine schnellere und gezieltere Entwicklung als mit klassischen Züchtungsverfahren möglich ist (Kershanskaya *et al.* 2022). Während bei CRISPR/Cas die Einstufung als gentechnischer Verfahren noch nicht geklärt ist, ist die Nutzung von transgenen Pflanzen mit Resistenzen gegenüber Schädlingen oder Krankheiten in der EU nur auf wenige Sorten und Staaten beschränkt. Auch eine Bereitstellung von Sorten mit höherer Toleranz gegenüber anderen Stressoren, z. B. im Zuge der zu erwartenden regionalen Auswirkung der globalen Erwärmung, würde indirekt auch dem Pflanzenschutz zugutekommen, da gesündere Pflanzen weniger anfällig gegenüber Krankheiten und Schädlingsbefall sind.

Auf der nächsten Stufe im Integrierten Pflanzenschutz stehen physikalische und biologisch-biotechnischen Maßnahmen. Bei Herbiziden wird ein hohes Potential gesehen, dass **physikalische Maßnahmen in Kombination mit pflanzenbaulichen Maßnahmen und *Digital Farming*** diese in Zukunft in großem Umfang ersetzen können. Bei Fungiziden und Insektiziden bieten wirkspezifische und in der Umwelt schnell abbaubare **Biopestizide** Alternativen zu chemischen

Mitteln. Einige physikalische Verfahren können jedoch auch helfen, den Einsatz chemischer Pflanzenschutzmittel gegen Pilze oder Tiere zu verringern.

Verfahren zur **gezielten Anwendung** von Pflanzenschutzmitteln bringen Nutzen sowohl für chemische und biologische Mittel. Durch zielgenauere Applikation lässt sich die Aufwandmenge und damit auch die Exposition von Nicht-Zielorganismen zum Teil erheblich reduzieren. Eine weitere Differenzierung, welche Entwicklungen innerhalb der gezielteren Anwendung vom Pflanzenschutzmitteln durch Kombination verschiedener neuer Techniken und Technologien am vielversprechendsten sind, kann einerseits an der bisherigen und kurzfristig zu erwartenden Marktdurchdringung erfolgen, auf der andere Seite kann der Gesetzgeber durch Auflagen und Anreizsysteme die schnellere Markteinführung forcieren.

4.3 Voraussetzungen und Anforderungen für eine erfolgreiche Umsetzung umweltgerechter Neuerungen

Neue **Pflanzensorten** sind mit CRISPR/Cas wahrscheinlich gezielter und schneller zu entwickeln. Die Akzeptanz so erzeugter Sorten hängt jedoch wahrscheinlich davon ab, ob das Verfahren in der europäischen Gesetzgebung als Gentechnik eingestuft wird oder nicht. Das Risiko ökologischer Nebenwirkungen ist vermutlich geringer als beim Einsatz von chemischen Pflanzenschutzmitteln. Auch ein prinzipieller Verzicht auf die Möglichkeiten von transgenen Nutzpflanzen mit PIPs aufgrund einer prinzipiellen Ablehnung von Gentechnik ist daher aus Umweltsichtspunkten zu hinterfragen. Eine sachliche Beurteilung der Vor- und Nachteile solcher Pflanzen wäre wünschenswert.

Betrachtet werden sollte dabei auch der Expositionspfad über die Nahrungskette, wenn z. B. getötete oder geschwächte Schädlinge als leichte Beute von anderen Organismen aufgenommen werden oder wenn Pflanzenmaterial inklusive PIPs in den Boden oder Gewässer gelangt. Die Relevanz dieser Expositionspfade beim Anbau von Pflanzen mit PIPs sollte abgeschätzt werden, um entscheiden zu können, ob sie in Zulassungsverfahren zu berücksichtigen sind. Bei der Effektbewertung wären chronische Tests mit der Exposition über die Nahrung notwendig.

Biopestizide, die nicht als PIPs verwendet werden, sind wie chemische Pflanzenschutzmittel zuzulassen. Das komplexe Verfahren ist für kleinere Firmen, die Biopestizide entwickeln, schwerer zu bewältigen und zu finanzieren als für große Entwickler von chemischen Pflanzenschutzmitteln. Um den Einsatz von Biopestiziden zu fördern, sollte geprüft werden, ob und wie das Zulassungsverfahren für Biochemikalien vereinfacht und angepasst werden kann, ohne die Sicherheit in der Zulassung zu verringern. Die Überarbeitung der EU Verordnung Nr. 283/2013 bezüglich der Datenanforderungen für Mikroorganismen wurde die 2022 in Kraft gesetzt (Verordnung (EU) 2022/1439 der Kommission vom 31. August 2022).

ist hier ein erster Schritt.

Verschiedene Arten der physikalischen Beikrautregulierung scheinen marktreif zu werden und das Potential zu haben, Herbizide in vielen Fällen ersetzen zu können. Eine Zulassungspflicht besteht nicht und vergleichende Studien zu Beurteilung der Effekte z. B. auf Bodenorganismen fehlen (M. Eberius, Crop.Zone, pers. Mitt. 2020). Da es nicht um Stoffbewertung geht, ist das UBA nicht in die eine Bewertung der Verfahren eingebunden. Die fehlende ökologische Bewertung ist ein relevanter, offener Punkt, falls die Verfahren als Herbizid-Alternativen in größerem Maßstab eingesetzt werden sollen. Im Unterschied zu Pflanzenschutzmitteln ist keine Bewertung mit Hilfe von Expositionsabschätzung und Bestimmung von Effektkonzentrationen im Labor möglich, sondern Effekte müssten unter realistischen Anwendungsbedingungen im Freiland oder Freilandsimulationsanlagen untersucht werden.

Die technischen Voraussetzungen für die **gezielte Applikation von PSM** sind prinzipiell schon gegeben, wie Beispiele in Abschnitt 2.5 gezeigt haben. Weitere Entwicklungen, insbesondere bei der Erkennung von Zielorganismen sind notwendig. Weitere marktreife Produkte sind zu erwarten. Vor Ort müssen jedoch auch die technischen Voraussetzungen erfüllt sein, da eine Abdeckung des ländlichen Raumes mit ausreichend schnellem Internet und Mobilfunk noch nicht flächendeckend gegeben ist. Dies betrifft nicht nur die Bereitstellung und Erzeugung von Daten für eine gezieltere Applikation von Pflanzenschutzmitteln, sondern alle Bereiche des *Digital Farming*.

Für verbreitete Anwendung von „digitalisierter Pflanzenschutzmittelapplikation“ in der Praxis ist aber auch eine Berücksichtigung in der Zulassung bzw. den Anwendungsbestimmungen notwendig, damit Landwirte in der Anwendung einen Vorteil sehen und in die Techniken investieren. Aktuelle Risikominderungsmaßnahmen wie driftreduzierende Düsen, Abstandsregelungen und Pufferstreifen werden als Verringerung der Einträge verrechnet. Teilflächen- oder Einzelpflanzenapplikationen würden aber die Aufwandmenge je Kulturfläche reduzieren, was bisher im Zulassungsverfahren noch nicht ausreichend berücksichtigt wird. Das aktuelle Verfahren sieht vor, dass die Anwendungen so formuliert werden, dass sie eine komplette Behandlung eines kompletten Feldes ermöglicht. Es bedarf eines Umdenkens und Anpassung der Verfahren, so dass zusätzliche Risikominderungsmaßnahmen anerkannt werden können.

Bremmer *et al.* (2021) kommen nach einer Abschätzung der ökonomischen Folgen der *Farm to Fork* Strategie der EU zu ähnlichen Empfehlungen: „Um die negativen Auswirkungen der Verringerung von Pestiziden und Nährstoffen, insbesondere bei Dauerkulturen, zu verringern bzw. zu überwinden, besteht ein erhöhter Bedarf an Innovationen im Bereich der Pflanzenschutztechniken, wie z. B. Biokontrolle, Züchtung, Präzisionslandwirtschaft, Biostimulanzien und andere Techniken, die zur Widerstandsfähigkeit der Pflanzenproduktion gegen Schädlinge, Unkraut und Krankheiten beitragen. Die Beseitigung rechtlicher Hindernisse für neue Züchtungstechniken, um den Züchtungsprozess erheblich zu verkürzen, könnte dazu beitragen. Dies wird dazu beitragen, die pflanzliche Erzeugung mittelfristig bei einjährigen Kulturen und langfristig bei Dauerkulturen nachhaltiger zu gestalten und gleichzeitig die negativen Auswirkungen auf Ertrag und Qualität der Erzeugnisse zu verringern.“

5 Quellenverzeichnis

- AgE (Kürzel des Verfassers) (2020): Unkrautroboter erfolgreich getestet. <https://www.schweizerbauer.ch/landtechnik/neuheiten/unkrautroboter-erfolgreich-getestet/> (25.05.2021).
- AgNews (2018): Vive announces five new crop protection products for 2019 season. <http://news.agropages.com/News/NewsDetail---27194.htm> (08.03.2021).
- Agrarheute (2016): Pfluglose Bodenbearbeitung: Pro und contra. <https://www.agrarheute.com/technik/ackerbautechnik/pfluglose-bodenbearbeitung-pro-contra-513975> (08.03.2021).
- Bockholt, K. (2019): Diese Maschinen bekämpfen den Maiszünsler. Agrarheute (Nachrichten für die Landwirtschaft). <https://www.agrarheute.com/pflanze/mais/diese-maschinen-bekaempfen-maiszuenler-547704> (08.03.2021).
- Agrarheute (2019): Precision Farming im Pflanzenschutz - Mit Sensoren sparsam spritzen. <https://www.agrarheute.com/pflanze/getreide/sensoren-sparsam-spritzen-551929>. (25.05.2021).
- Agricon (2021): Digitaler Pflanzenschutz mit Sensoren - Wachstumsregler und Fungizide variabel ausbringen. <https://www.agricon.de/pflanzenschutz> (20.04.2021).
- Bach, M.; Diesner, M.; Großmann, D.; Guerniche, D.; Hommen, U.; Klein, M.; Kubiak, R.; Müller, A.; Priegnitz, J.; Reichenberger, S.; Thomas, K. and Trapp, M. (2016): Pesticide exposure assessment for surface waters in the EU. Part 1: Some comments on the current procedure. *Pest Management Science* 72: 1279–1284. doi: [org/10.1002/ps.4281](https://doi.org/10.1002/ps.4281).
- Bach, M.; Guerniche, D.; Thomas, K.; Trapp, M., Kubiak, R.; Hommen, U.; Klein, M.; Reichenberger, S.; Pires, J.; Preuß, T. (2017a): Bewertung des Eintrags von Pflanzenschutzmitteln in Oberflächengewässer – Runoff, Erosion und Drainage GERDA – GEobased Runoff, Erosion and Drainage risk Assessment for Germany. TEXTE 72/2017. Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau. ISSN 1862- 4359. Download unter <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/bewertung-des-eintrags-von-pflanzenschutzmitteln-in>
- Bach, M.; Diesner, M.; Großmann, D.; Guerniche, D., Hommen, U.; Klein, M.; Kubiak, R.; Müller, A.; Preuss, T. G.; Priegnitz, J.; Reichenberger, S.; Thomas, K. and Trapp, M. (2017b): Pesticide exposure assessment for surface waters in the EU. Part 2: Determination of statistically based runoff and drainage scenarios for Germany. *Pest Management Science* 73 (5): 852-861. doi: [10.1002/ps.4519](https://doi.org/10.1002/ps.4519).
- Bachman, P.; Fischer, J.; Song, Z.; Urbanczyk-Wochniak, E.; Watson, G. (2020): Environmental fate and dissipation of applied dsRNA in soil, aquatic systems and plants. *Frontiers in Plant Science* 11:21. doi: [10.3389/fpls.2020.00021](https://doi.org/10.3389/fpls.2020.00021)
- Badry, A.; Schenke, D.; Treu, G.; Krone, O.; (2021): Linking landscape composition and biological factors with exposure levels of rodenticides and agrochemicals in avian apex predators from Germany. *Environmental Research* 193: 110602. doi: [10.1016/j.envres.2020.110602](https://doi.org/10.1016/j.envres.2020.110602).
- BASF Digital Farming GmbH (2021): Healthy fields – Garantierte Blattgesundheit. <https://www.xarvio.com/de/de/products/healthy-fields/healthy-fields-assurance.html> (25.05.2021).
- Baum, J.A.; Bogaert, T.; Clinton, W.; Heck, G.R.; Feldmann, P.; Ilagan, O.; Johnson, S.; Plaetinck, G.; Munyikwa, T.; Pleau, M. and Vaughn, T. (2007): Control of coleopteran insect pests through RNA interference. *Nature biotechnology* 25(11): 1322-1326.
- Baumann, D. (2017): Die Zukunft der Landwirtschaft. *Frankfurter Rundschau*. 10.01.2017. <https://www.fr.de/wirtschaft/zukunft-landwirtschaft-11045379.html> (21.01.2022).
- Bayer AG (2020): Artenvielfalt schützen – warum die Landwirtschaft Teil der Lösung ist. <https://www.bayer.com/de/news-stories/artenvielfalt-waehrend-covid19-schuetzen> (03.03.2021).

Bayer AG (2021): SMARTSTAX® PRO WITH RNAi TECHNOLOGY. <https://traits.bayer.com/corn/Pages/SmartStax-PRO.aspx> (21.01.2022).

BayWa AG (2021): Maiszünslerbekämpfung. <https://www.baywa.de/de/i/entdecken/smart-farming/maiszuenslerbekaempfung/> (08.03.2021).

Benbrook, C. M. (2016): Trends in glyphosate herbicide use in the United States and globally. *Environmental sciences Europe*, 28(1), 3. doi: 10.1186/s12302-016-0070-0.

Beste, A. (2021): Greenwashing & viel Technik – Vermeintlich nachhaltige Lösungen für die Landwirtschaft. Im Auftrag von Martin Häusling, MdEP. https://www.martin-haeusling.eu/images/Greenwashing_und__viel_Technik_Web.pdf (20.01.2022).

Bicho, RC.; Santos, FCF.; Scott-Fordsmand, JJ.; Amorim, MJB. (2017): Multigenerational effects of copper nano-materials (CuONMs) are different of those of CuCl₂: exposure in the soil invertebrate *Enchytraeus crypticus*. *Scientific reports* 7(1): 8457-8457.

Bitkom (2019): Positionspapier Datenhoheit und Datennutzung in der Landwirtschaft. <https://www.bitkom.org/Bitkom/Publikationen/Datenhoheit-und-Datennutzung-in-der-Landwirtschaft> (25.05.2021).

BLE (Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung) (2021): Pflanzenzucht – Von der Auslese zu CRISPR/Cas. <https://www.praxis-agrar.de/pflanze/pflanzenbau/pflanzenzucht-methoden/> (20.04.2021).

BMEL (Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft) (2020): Pflanzenschutz. https://www.bmel.de/DE/themen/landwirtschaft/pflanzenbau/pflanzenschutz/pflanzenschutz_node.html (20.01.2022).

BMEL (Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft) (2021a): Digitalisierung in der Landwirtschaft. Chancen nutzen – Risiken minimieren. https://www.bmel.de/SharedDocs/Downloads/DE/Broschueren/digital-politik-landwirtschaft.pdf?__blob=publicationFile&v=19 (20.01.2022).

BMEL (Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft) (2021b): Digitale Experimentierfelder – Ein Beitrag zur Digitalisierung in der Landwirtschaft. <https://www.bmel.de/DE/themen/digitalisierung/digitale-experimentierfelder.html> (25.05.2021).

BMEL (Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft) (2021c): BMEL fördert gezielte Unkrautbekämpfung im Zuckerrübenanbau. Pressemitteilung. <https://www.bmel.de/SharedDocs/Pressemitteilungen/DE/2021/22-optikult.html> (06.03.2023).

BMEL (Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft) (2022): Integrierter Pflanzenschutz. <https://www.nap-pflanzenschutz.de/integrierter-pflanzenschutz/pflanzenschutzmassnahmen/> (20.01.2022).

BMJ (Bundesministerium der Justiz) (2022): Bundesnaturschutzgesetz vom 29. Juli 2009 (BGBl. I S. 2542), das zuletzt durch Artikel 1 des Gesetzes vom 18. August 2021 (BGBl. I S. 3908) geändert worden ist. https://www.gesetze-im-internet.de/bnatschg_2009/index.html#BJNR254210009BJNE000112123 (21.01.2022)

BMJ (Bundesministerium der Justiz) (2020): Gesetz zum Schutz der Kulturpflanzen. Pflanzenschutzgesetz vom 6. Februar 2012 (BGBl. I S. 148, 1281), das zuletzt durch Artikel 278 der Verordnung vom 19. Juni 2020 (BGBl. I S. 1328) geändert worden ist. http://www.gesetze-im-internet.de/pflschg_2012/ (08.03.2021).

BMJ (Bundesministerium der Justiz) (2020): Ernährungssicherstellungs- und -vorsorgegesetz vom 4. April 2017 (BGBl. I S. 772), das durch Artikel 1 des Gesetzes vom 9. Dezember 2020 (BGBl. I S. 2863) geändert worden ist. <http://www.gesetze-im-internet.de/esvg/BJNR077210017.html#BJNR077210017BJNG000100000> (25.05.2021).

BMJ (Bundesministerium der Justiz) (2019): Düngemittelverordnung vom 5. Dezember 2012 (BGBl. I S. 2482), die zuletzt durch Artikel 1 der Verordnung vom 2. Oktober 2019 (BGBl. I S. 1414) geändert worden ist. https://www.gesetze-im-internet.de/d_mv_2012/ (25.05.2012).

BMVI (Bundesministerium für Verkehr und Infrastruktur) (2018): Bericht zum Breitbandatlas. Teil 1: Ergebnisse. Stand 12/2018. https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/DG/Digitales/bericht-zum-breitbandatlas-ende-2018-ergebnisse.pdf?__blob=publicationFile (25.01.2022).

BMVI (Bundesministerium für Verkehr und Infrastruktur) (2021): Aktuelle Breitbandverfügbarkeit in Deutschland (Stand Mitte 2021). https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Publikationen/DG/breitband-verfuegbarkeit-mitte-2021.pdf?__blob=publicationFile (25.01.2022)

Böhrnsen, A. (2019): Schneckenroboter in der Entwicklung - Stechender Roboterarm ersetzt Schneckenkorn. <https://www.profi.de/technisch/elektronik/stechender-roboterarm-ersetzt-schneckenkorn-11919855.html> (09.03.2021).

Böhrnsen, A. (2015): Helm Agrimentor Umweltcheck: App schützt vor Pflanzenschutz-Fehlern. https://helm-software.de/storage/app/media/Agrimentor_SDProfi.pdf (25.05.2021).

Bremmer, J.; Gonzalez-Martinez, A.; Jongeneel, R.; Huiting, H.; Stokkers, R.; Ruijs, M. (2021): Impact Assessment of EC 2030 Green Deal Targets for Sustainable Crop Production. Wageningen, Wageningen Economic Research, Report 2021-150: 69 pp.

Schöllhorn, A.; Bleul, L., Weiß, E.; Stahl, M.; Grond, S.; Forchhammer, K. (2019): Cyanobacterial antimetabolite 7-deoxy-sedoheptulose blocks the shikimate pathway to inhibit the growth of prototrophic organisms. *Nature Communications* 10, 545. doi: 10.1038/s41467-019-08476-8.

Bröring, J.; von Hörsten, D. (2019): Düsenkombinationen und -anordnungen für den Einsatz mit einer Fahrgasenabschaltung bei Feldspritzgeräten. *Gesunde Pflanzen* 71 (Suppl. 1): 45-49.

Bundschuh, R.; Bundschuh, M.; Otto, M. (2019): Food-related exposure to systemic pesticides and pesticides from transgenic plants: evaluation of aquatic test strategies. *Environmental Sciences Europe* 31: 87. doi: 10.1186/s12302-019-0266-1

BVL (Bundesamt für Verbraucherschutz und Lebensmittelsicherheit) (2014): PSM-Zulassungsbericht (Registration Report) Pflanzenschutzmittel: Isonet LE. Bundesamt für Verbraucherschutz und Lebensmittelsicherheit. Braunschweig. https://www.bvl.bund.de/SharedDocs/Downloads/04_Pflanzenschutzmittel/01_zulassungsberichte/006978-00-00.pdf?__blob=publicationFile&v=4 (08.03.2021).

BVL (Bundesamt für Verbraucherschutz und Lebensmittelsicherheit) (2019): Mehr Verunkrautung wagen: Plädoyer für einen Perspektivwechsel in der Unkrautbekämpfung im Ackerbau. Positionspapier des Fachbeirats Nachhaltiger Pflanzenbau. https://www.bvl.bund.de/SharedDocs/Fachmeldungen/04_pflanzenschutzmittel/2019/2019_11_18_Fa_Positionspapier_Fachbeirat.html (25.05.2021).

BVL (Bundesamt für Verbraucherschutz und Lebensmittelsicherheit) (2020a): Notfallzulassung nach Artikel 53 der Verordnung (EG) Nr. 1107/2009 für das Pflanzenschutzmittel: Shark. https://www.bvl.bund.de/SharedDocs/Downloads/04_Pflanzenschutzmittel/01_notfallzulassungen/Shark_Stockaustriebe_Weinrebe_2020.pdf?__blob=publicationFile&v=4 (05.03.2021).

BVL (Bundesamt für Verbraucherschutz und Lebensmittelsicherheit) (2020b): Notfallzulassung nach Artikel 53 der Verordnung (EG) Nr. 1107/2009 für das Pflanzenschutzmittel: Quickdown. https://www.bvl.bund.de/SharedDocs/Downloads/04_Pflanzenschutzmittel/01_notfallzulassungen/Quickdown_Wurzelschosser_Steinobst_Kernobst_2020.pdf?__blob=publicationFile&v=2 (05.03.2021).

BVL (Bundesamt für Verbraucherschutz und Lebensmittelsicherheit) (2021): Liste der zugelassenen Pflanzenschutzmittel in Deutschland mit Informationen über beendete Zulassungen (Stand: Januar 2021). https://www.bvl.bund.de/SharedDocs/Downloads/04_Pflanzenschutzmittel/psm_uebersichtsliste.pdf?__blob=publicationFile&v=36 (05.03.2021).

Chen, JG.; Engbersen, N.; Stefan, L.; Schmid, B.; Sun, H.; Schöb, C. (2021): Diversity increases yield but reduces reproductive effort in crop mixtures, *Nature Plant* 7(7):893-898. doi: 10.1038/s41477-021-00948-4.

- Christiaens, O. and Smagghe, G. (2014): The challenge of RNAi-mediated control of hemipterans. *Current Opinion in Insect Science* 6: 15–21.
- CROP.ZONE GmbH (2021): Hybrid Herbicide™ - elektrochemische Lösung als Ersatz für chemische Herbizide. <https://crop.zone/de/produkte/> (08.03.2021).
- Dammer, K.-H.; Hamdorf, A.; Ustyuzhanin, A.; Schirrmann, M.; Leithold, P.; Leithold, H.; Volk, T.; Tackenberg, M. (2015): Zielflächenorientierte, präzise Echtzeit-Fungizidapplikation in Getreide. *LANDTECHNIK* 70(2): 31–43. doi.org/10.15150/lt.2015.2657.
- DaNa (2021): Nanomaterialien in Pflanzenschutzmitteln. DaNa – Informationen zur Sicherheit von neuen, innovativen Materialien und Nanomaterialien (BMBF - 03XP0282). <https://nanopartikel.info/basics/querschnittsthemen/nanomaterialien-in-pflanzenschutzmitteln/> (08.03.2021).
- DAP (Digitales Agrarportal) (2021): Geobox Vieweer. <https://www.dap.rlp.de> (25.05.2021).
- Davin, E. L.; Seneviratne, S.I.; Ciais, P.; Ollio, A.; Wang, T. (2014): Preferential cooling of hot extremes from cropland albedo management. *PNAS* 111(27): 9757–9761. doi.org/10.1073/pnas.1317323111.
- DBU (Deutsche Bundesstiftung Umwelt) (2018): Laser statt Chemie: Digital Pflanzenschutz voranbringen. Presseerklärung vom 04.10.2018. <https://www.dbu.de/123artikel37941rss.html> (25.05.2021).
- De Witte, T.; Gaus, C.-C.; Minßen, T.-F.; Urso, L.-W. (2017): Mit autonomen Landmaschinen zu neuen Pflanzbausystemen. Schlussbericht. http://orgprints.org/32438/1/32437_14NA004_011_012_thuenen_institut_de_Witte_Landmaschinen_Pflanzenbau.pdf (21.01.2022).
- De Witte, T.; Huber, M.; Gaus, C.C.; Lindena, T.; Verhaagh, M.; Thobe, P. (2016): Stellungnahme für Referat 514 BMEL „Folgenabschätzung Digitalisierung Landwirtschaft“. Thünen Institut. 53 S.
- Deter, A. (2017): Neue Software hält automatisiert Abstandsaufgaben von Pflanzenschutzmitteln ein. <https://www.topagrar.com/acker/news/neue-software-haelt-automatisiert-abstandsaufgaben-von-pflanzenschutzmitteln-ein-9853568.html> (25.05.2021).
- Deubert, M.; Trapp, M.; Krohn, K.; Ullrich, K.; Bolz, H.; Künast, R.; Künast, C. (2016): Das Konzept der Eh da-Flächen. Ein Weg zu mehr biologischer Vielfalt in Agrarlandschaften und im Siedlungsbereich. *Naturschutz und Landschaftsplanung* 48 (7): 209–217.
- DKE Data GmbH & Co KG (2021): Agrorouter: the cross-manufacturer solution for exchanging your data. <https://my-agrirouter.com/> (25.05.2021).
- DLG (Deutsche Landwirtschafts-Gesellschaft) (2018): Digitale Landwirtschaft: Ein Positionspapier der DLG, Hrsgb. DLG eV, Januar 2018.
- DLR Rheinpfalz (Dienstleistungszentrum Ländlicher Raum Rheinpfalz) (2022): Eh da Flächen. http://www.hortipendium.de/Eh_da_Fl%C3%A4chen (21.01.2022).
- Donner, S. (2014): Bio ist nicht immer besser. <https://www.wissenschaft.de/umwelt-natur/bio-ist-nicht-immer-besser/> (08.03.2021).
- Duhan, J. S.; Kumar, R.; Kumar, N.; Kaur, P.; Nehra, K.; Duhan, S. (2017): Nanotechnology: The new perspective in precision agriculture. *Biotechnology Reports* 15: 11-23. doi: 10.1016/j.btre.2017.03.002.
- EC (European Council) (2015): Regulation (EC) 2015/2283 of the European Parliament and of the Council of 25 November 2015 on novel foods, amending Regulation (EU) No 1169/2011 of the European Parliament and of the Council and repealing Regulation (EC) No 258/97 of the European Parliament and of the Council and Commission Regulation (EC) No 1852/2001. *Official Journal L* 327(11/12/2015): 1-22.

- Eder, J. (2016): Permanente Fahrspuren: 5 Fakten zu Controlled Traffic Farming. Agrarheute. <https://www.agrarheute.com/technik/ackerbautechnik/permanente-fahrspuren-5-fakten-controlled-traffic-farming-530242> (11.03.2024)
- EFSA Scientific Committee (European Food Safety Authority) (2016): Guidance to develop specific protection goals options for environmental risk assessment at EFSA, in relation to biodiversity and ecosystem services. EFSA Journal 2016;14(6):4499, 50 pp. doi: 10.2903/j.efsa.2016.4499
- EG (Europäische Gemeinschaft) (2000): Richtlinie 2000/60/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 23. Oktober 2000 zur Schaffung eines Ordnungsrahmens für Maßnahmen der Gemeinschaft im Bereich der Wasserpolitik. <https://www.bmu.de/gesetz/richtlinie-200060eg-zur-schaffung-eines-ordnungsrahmens-fuer-massnahmen-der-gemeinschaft-im-bereich/> (25.05.2021).
- EG (Europäische Gemeinschaft) (2009): VERORDNUNG (EG) Nr. 1107/2009 DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES vom 21. Oktober 2009 über das Inverkehrbringen von Pflanzenschutzmitteln und zur Aufhebung der Richtlinien 79/117/EWG und 91/414/EWG des Rates. <https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2009:309:0001:0050:de:PDF> (03.03.2021).
- Eppenberger, D. (2020): Reduktion ist angesagt. https://www.pflopf.ch/files/user_upload/Medienbeitraege/20201005_Eppenberger_Fachtagung-Gemuese-PSM-Reduktion-ist-angesagt_Gemuesebau-05_38-39.pdf (25.05.2021).
- EU (Europäische Union) (2011): Regulation (EU) No 1169/2011 of the European Parliament and of the Council of 25 October 2011 on the provision of food information to consumers, amending Regulations (EC) No 1924/2006 and (EC) No 1925/2006 of the European Parliament and of the Council, and repealing Commission Directive 87/250/EEC, Council Directive 90/496/EEC, Commission Directive 1999/10/EC, Directive 2000/13/EC of the European Parliament and of the Council, Commission Directives 2002/67/EC and 2008/5/EC and Commission Regulation (EC) No 608/2004. Official Journal L 304(22/11/2011): 18-63, <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2011:304:0018:0063:EN:PDF>.
- EU Europäische Union) (2022): Verordnung (EU) 2022/1439 der Kommission vom 31. August 2022 zur Änderung der Verordnung (EU) Nr. 283/2013 hinsichtlich der für Wirkstoffe vorzulegenden Informationen und der spezifischen Datenanforderungen für Mikroorganismen. Amtsblatt der Europäischen Union, L 227/8. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:32022R1439>
- EK (Europäische Kommission) (2020): Vom Hof auf den Tisch“ –eine Strategie für ein faires, gesundes und umweltfreundliches Lebensmittelsystem. COM (2020) 381 final. Brüssel. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/?uri=CELEX%3A52020DC0381> (20.013.2022).
- Faupel, M.; von Blanckenhagen, F.; Lückmann, J.; Ruf, D.; Wiedemann, G. and Ludwigs, J.-D. (2023): Precision farming and environmental pesticide regulation in the EU - How does it fit together? Integrated Environmental Assessment and Management 19: 17-23. doi.org/10.1002/ieam.4626
- FarmDemo (2017): Roboter zur Regulierung von Schnecken im Ackerbau (Uni Kassel, KommTek und Julius Kühn Institut). <https://www.youtube.com/watch?v=QoPwZidmsxU> (20.01.2022).
- FarmFacts GmbH (2021): TalkingFields Karten. <https://www.nextfarming.de/landwirt/produkte/geodaten/talkingfields-karten/> (25.05.2021).
- Feuerborn, B. (2019): Claas und John Deere: Mit DataConnect Maschinendaten tauschen. <https://www.agrarheute.com/technik/john-deere-claas-dataconnect-558557> (25.05.2021).
- Fletcher, S.J.; Reeves, P.T.; Hoang, B.T. and Mitter, N. (2020): A perspective on RNAi-based biopesticides. Frontiers in Plant Science 11: 51.

FOCUS (Forum for Coordination of pesticide fate models and their Use) (2001): FOCUS Surface Water Scenarios in the EU Evaluation Process under 91/414/EEC. Report of the FOCUS Working Group on Surface Water Scenarios, EC Document Reference SANCO/4802/2001-rev.2. 245 pp. <https://esdac.jrc.ec.europa.eu/projects/focus-dg-sante> (25.05.2021).

Forum Bio- und Gentechnologie e.V. (2020): Nur Mais, fast nur Spanien: Anbau gentechnisch veränderter Pflanzen in der EU. <https://www.transgen.de/anbau/653.anbau-gentechnisch-veraenderter-pflanzen.html>. (08.03.2021).

Forum Bio- und Gentechnologie e.V. (2020): Mehr Gentechnik, mehr spritzen? Ja und nein - die Erfahrungen in den USA. <https://www.transgen.de/anbau/1508.gentechnik-pflanzen-anbau-usa-bilanz.html> (20.01.2022).

Fry, J. (2020): Versuch: Bodenleben ohne Pflug und Glyphosat. agrarheute 04.11.2020. <https://www.agrarheute.com/pflanze/versuch-bodenleben-ohne-pflug-glyphosat-574649> (24.01.2022).

Gesellschaft für konservierende Bodenbearbeitung e.V. (2022): Smarte Unkraut Kontrolle – Projekt laufend. <https://www.gkb-ev.de/unkraut/> (24.01.2022).

Ghosh, S.K.B.; Hunter, W.B.; Park, A.L.; Gundersen-Rindal, D.E. (2018): Double-stranded RNA oral delivery methods to induce RNA interference in phloem and plant-sap-feeding hemipteran insects. *Journal of Visualized Experiments* 135: 57390.

Griffiths, M. (2019): Industry input in managing key challenges. Presentation at ECPA-ECCA Regulatory conference 2019, Ghent. 22.-23.05.2019.

Guimarães, B.; Maria, VL.; Römbke, J.; Amorima, M.J.B. (2019): Exposure of *Folsomia candida* (Willem 1902) to teflubenzuron over three generations – Increase of toxicity in the third generation. *Applied Soil Ecology* 134: 8-14.

Haller, L.; Moakes, S.; Niggli, U.; Riedel, J.; Stolze, M.; Thompson, M. (2020): Entwicklungsperspektiven der ökologischen Landwirtschaft in Deutschland. *Texte* 32/2020. UBA Dessau. 152 S.

Hampe, M. (2021): Unkrautpflanzen gezielter treffen. DLG Mit "Pflanzenschutz - digital und intelligent"(11):12-15. https://literatur.thuenen.de/digbib_extern/dn064905.pdf (12.03.2024)

Hans Turck GmbH & Co. KG (2021): Verteilerleitungen für Feldspritzen. <https://www.turck.de/de/verteilerleitungen-fuer-feldspritzen-9877.php> (25.05.2021).

Hatten, TD.; Bosque-Pérez, NA.; Labonte, JR.; Guy, SO.; Eigenbrode, SD. (2007): Effects of Tillage on the Activity Density and Biological Diversity of Carabid Beetles in Spring and Winter Crops. *Environmental Entomology* 36(2): 356–368. doi.org/10.1093/ee/36.2.356.

Heap, I. (2021): The International Herbicide-Resistant Weed Database. www.weedscience.org (04.03.2021).

Hebert, MP.; Fugere, V.; Gonzales, A. (2019): The overlooked impact of rising glyphosate use on phosphorus loading in agricultural watersheds. *Frontiers in Ecology and the Environment* 17(1): 48– 56. doi:10.1002/fee.1985.

Helm (2022): Agrimentor Umweltcheck - Sicherheitsassistent der Ackerschlagkartei. https://helm-software.de/produkte/agrimentor?gclid=EAlaIQobChMI-oytuozh9QIVr49oCR0UxQQ_EAAYASAAEgJkevD_BwE (22.02.2022).

Höing, C. (2020): Entwicklung einer Robotik-Lösung zur Schneckenbekämpfung in der Landwirtschaft. Dissertation. Universität Kassel. doi:10.17170/kobra-202011252273.

Holdinghausen, H. (2022): Wem nutzt das Digital-Update. In: Maenel A (V.i.S.d.P) Pestizidatlas 2022 – Daten und Fakten zu Giften in der Landwirtschaft. <https://www.boell.de/de/pestizidatlas> (20.01.2022).

Horstmann, J. (2020): Digitalisierung und Vernetzung – Landwirtschaft im Wandel. Jahrbuch Agrartechnik 2019, Band 31. doi.org/10.24355/dbbs.084-202001201517-0.

IVA (Industrieverband Agrar) (2010): Integrierter Pflanzenschutz. Industrieverband Agrar e.V., Frankfurt am Main. https://www.iva.de/sites/default/files/benutzer/uid/publikationen/info13_2010.pdf (03.03.2021).

IVA (Industrieverband Agrar) (2020a): Die Pflanzenschutzindustrie: Mit Kompetenz an die Spitze. <https://www.iva.de/fachbereiche/pflanzenschutz> (04.03.2021).

IVA (Industrieverband Agrar) (2020b): Neue Lösungen für die Landwirtschaft von morgen. <https://www.iva.de/newsroom/pressemitteilungen/neue-loesungen-fuer-die-landwirtschaft-von-morgen> (03.03.2021).

Jain, R.G.; Robinson, K.E.; Asgari, S.; Mitter, N. (2021): Current scenario of RNAi-based hemipteran control. *Pest Management Sciences* 77: 2188-2196. doi.org/10.1002/ps.6153.

Jaksch, T. (2018): Zwiebeln nicht neben Möhren pflanzen! <https://www.gartenfreunde.de/gartenpraxis/gartenpflege/zwiebeln-nicht-neben-moehren-pflanzen/> (23.01.2022).

JKI (Julius Kühn-Institut) (2019): Prüfbericht G 2049: Elektronische Düsensteuerung mit Pulsweitenmodulation TeeJet „DynaJet“, Anerkannt für die Verwendung mit Spritz- und Sprühgeräten für Flächenkulturen. Institut für Anwendungstechnik im Pflanzenschutz (Hrsg.), Geräteprüfberichte des Julius Kühn-Institut: 4.

JKI (Julius Kühn-Institut) (2021a): Kleinstrukturen in der Agrarlandschaft. <https://www.julius-kuehn.de/sf/ab/raeumliche-analysen-und-modellierung/kleinstrukturen-in-der-agrarlandschaft/> (25.05.2021).

JKI (Julius Kühn-Institut) (2021b): Verzeichnis der regionalisierten Kleinstrukturanteile. <https://www.julius-kuehn.de/sf/ab/raeumliche-analysen-und-modellierung/verzeichnis-der-regionalisierten-kleinstrukturanteile/> (25.05.2021).

Jossi, W.; Zihlmann, U.; Dubois, D. (2007): DOK-Versuch: Anbausystem-Effekte auf die Regenwürmer. *AGRAR-Forschung* 14 (2): 66-71.

Kah, M.; Kookana, R.; Gogos, A.; Bucheli, T. (2018): A critical evaluation of nanopesticides and nanofertilizers against their conventional analogues. *Nature Nanotechnology* 13: 677-684. doi:10.1038/s41565-018-0131-1.

Kah, M.; Tufenkji, N. and White, J.C. (2019): Nano-enabled strategies to enhance crop nutrition and protection. *Nature Nanotechnology* 14(6): 532-540. doi:10.1038/s41565-019-0439-5.

Kershanskaya, O. I.; Yessenbaeva, G. L.; Nelidova, D. S.; Karabekova, A. N. & Sadullaeva, Z. N. (2022): CRISPR/Cas genome editing perspectives for barley breeding. *Physiologia Plantarum* 174(3): e13686.

Kirk, W.W.; Schafer, R.S. (2015): Efficacy of new active ingredient formulations and new biopesticides for managing Fusarium root rot disease of gladiolus hybrids. *Acta Horticulturae* 1105: 55–60.

Klärner, S.; Flemming, B.; Berkelmann-Löhnertz, B. (2015): Untersuchungen zur Fäulnisprävention im Weinbau durch UV-C-Bestrahlung der Rebe (*Vitis vinifera* L.). *Landtechnik* 70 (4): 139-149. doi.org/10.1515/lt.2015.2669.

Koch, E.; Herz, A.; Kleespies, R.G.; Schmitt, A.; Stephan, D.; Jehle, J.A. (2019): Statusbericht Biologischer Pflanzenschutz 2018. Berichte aus dem Julius Kühn-Institut 203. Julius Kühn-Institut (JKI). Darmstadt. <https://ojs.openagr.de/index.php/BerichteJKI/article/view/11181> (08.03.2021).

Kogel, K.H. (2019): RNA Interferenz im modernen Pflanzenschutz. Abstract. Symposium zum nicht-chemischen Pflanzenschutz im Gartenbau BMEL, Berlin, 28. und 29. Mai 2019. https://www.julius-kuehn.de/media/Institute/GF/_FS_nicht-chem-PS_imGB/1/Abstract/Abstract_Kogel-Berlin-RNAInterferenz-Pflanzenschutz_Symp_nicht-chemischen_PS_Gartenbau-28-05-2019_.pdf (28.01.2022).

Kubiak, R.; Hommen, U.; Bach, M.; Classen, S.; Gergs, A.; Golla, B.; Guerniche, D.; Klein, M.; Krumpe, J.; Preuss, TG.; Ratte, HT.; Roß-Nickol, M.; Schäfers, C.; Strauss, T.; Toschki, A.; Trapp, M. (2014): Georeferenced Probabilistic Risk Assessment of Pesticides – Further Advances in Assessing the Risk to Aquatic Ecosystems by Spray Drift from Permanent Crops. Texte 05/2014. Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau, Germany, ISSN 1862-4804, 477p. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/texte_05_2014_muel-ler_komplett.pdf.

Künast, C.; Deubert, M.; Künast, R. and Trapp, M. (2019): Die Eh da-Initiative. *Biologie in Unserer Zeit* 49: 28-38. doi.org/10.1002/biuz.201910665.

Kverneland Group (2023): GEOSEED - Rübenanbau 4.0. <https://www.kverneland.de/Ackerbausystem/GEOSEED-Ruebenanbau-4.0> (06.03.2023)

KWS (2022): Mit Licht, Big Data und künstlicher Intelligenz gegen den schädlichen Pilz *Cercospora*. <https://www.kws.com/de/de/media-innovation/presse/world-of-farming/mit-licht-big-data-und-kuenstlicher-intelligenz-gegen-den-schaedlichen-pilz-cercospora/> (21.01.2022).

KWS (2020): KWS testet Unkrautroboter im Feld. <https://www.kws.com/de/de/media-innovation/presse/press-corner/kws-testet-unkrautroboter-im-feld/> (21.01.2022).

LfL (Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft) (2022): Der Westliche Maiswurzelbohrer - Ein gefährlicher Schädling im Maisanbau. <https://www.lfl.bayern.de/ips/blattfruechte/033170/index.php> (21.01.2022).

Liu, J.; Liang, Y.; Hu, T.; Zeng, H.; Gao, R.; Wang, L.; Xiao, Y. (2021): Environmental fate of Bt proteins in soil: Transport, adsorption/desorption and degradation. *Ecotoxicology and Environmental Safety* 226: 112805. doi.org/10.1016/j.ecoenv.2021.112805

LOP (Landwirtschaft ohne Pflug) (2021): Konservierende Bodenbearbeitung. https://www.pfluglos.de/konservierende_bodenbearbeitung (08.03.2021).

Maenel, A. (V.i.S.d.P) (2022): Pestizidatlas 2022 – Daten und Fakten zu Giften in der Landwirtschaft. <https://www.boell.de/de/pestizidatlas> (20.01.2022).

Maresch, R. (2020): Sensoren für die Früherkennung von Krankheitssymptomen im europäischen Obstanbau. *Forschung Kompakt / 01*. August 2020. <https://www.fraunhofer.de/de/presse/presseinformationen/2020/august/sensoren-fuer-die-frueherkennung-von-krankheitssymptomen-im-europaeischen-obstanbau.html> (02.02.2022)

MarketsandMarkets Research Private Ltd (2021): Biopesticides Market. <https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/biopesticides-267.html> (21.01.2022).

Marrone, P.G. (2014): The market and potential for biopesticides. *ACS Symposium Series* 1172: 245-258. [doi: 10.1021/bk-2014-1172.ch016](https://doi.org/10.1021/bk-2014-1172.ch016)

Marrone, P. G. (2019): Pesticidal natural products—status and future potential. *Pest Management Science*, 75(9): 2325-2340. [doi: 10.1002/ps.5433](https://doi.org/10.1002/ps.5433)

MASKOR Institut (Institut für Mobile Autonome Systeme und Kognitive Robotik FH Aachen (2021): ETAROB - Feld-Roboter zur ökologischen Unkrautregulierung in Gemüsekulturen. <http://www.robotics.fh-aachen.de/projects/ETAROB/> (25.05.2021).

Max-Planck-Gesellschaft (2023): CRISPR-Cas9 – eine Schere aus Enzym und RNA. <https://www.mpg.de/11018867/crispr-cas9> (03.04.2023).

Meier, D. (2017): Environmental risk assessment of biopesticides: challenges and experiences from the perspective of an SME. Presentation, 17th International Fresenius ECOCOTOC Conference, Mainz, Germany, (07.12.2017).

- Melin, P. (2017): Environmental risk assessment of biopesticides. Presentation, 17th International Fresenius ECOCOTOC Conference, Mainz, Germany, (07.12.2017).
- Merck, J. (2021): F.R.A.N.Z. Gemeinsam für mehr Vielfalt in der Agrarlandschaft. <https://www.franz-projekt.de/> (21.01.2022).
- Mezzetti, B.; Smaghe, G.; Arpaia, S.; Christiaens, O.; Dietz-Pfeilstetter, A.; Jones, H.; Kostov, K.; Sabbadini, S.; Opsahl-Sorteberg, H.G.; Ventura, V. and Taning, C.N.T. (2020): RNAi: What is its position in agriculture? *Journal of Pest Science* 93: 1125-1130. doi.org/10.1007/s10340-020-01238-2
- Morton, V.; Staub, T. (2008): A Short History of Fungicides. Online, APSnet Features. <https://www.apsnet.org/edcenter/apsnetfeatures/Pages/Fungicides.aspx> (04.03.2021).
- Müller, A.; Hitzfeld, K. (2020): Kleingewässermonitoring - Realitätscheck der Umweltrisikobewertung von Pflanzenschutzmitteln. *Wasser und Abfall* 22 (3): 37-42. doi: 10.1007/s35152-020-0193-x.
- myAgrar (2021): Sikkation in Kartoffeln: Kombinierte Pflanzenschutzmaßnahmen führen zum Erfolg. Fachbeitrag von Cheminova. <https://www.myagrar.de/sikkation-kartoffel-2021/> (20.01.2022).
- National Center for Biotechnology Information (2021): BLAST - Basic Local Alignment Search Tool. <https://blast.ncbi.nlm.nih.gov/Blast.cgi> (25.05.2021).
- Nationale Akademie der Wissenschaften Leopoldina, acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften, Union der deutschen Akademien der Wissenschaften (2020): Biodiversität und Management von Agrarlandschaften – Umfassendes Handeln ist jetzt wichtig. Halle (Saale). <https://www.leopoldina.org/publikationen/detailansicht/publication/biodiversitaet-und-management-von-agrarlandschaften-2020/> (03.03.2021).
- Niehl, A.; Soininen, M.; Poranen, M.M.; Heinlein, M. (2018): Synthetic biology approach for plant protection using dsRNA. *Plant Biotechnology Journal* 16: 1679–1687. doi: 10.1111/pbi.12904
- Noleppa, S.; von Witzke, H. (2013): Der gesamtgesellschaftliche Nutzen von Pflanzenschutz in Deutschland. Industrieverband Agrar e. V., Frankfurt am Main. <https://pflanzenschuetzer.ch/wp-content/uploads/Noleppa-2013-IVA-Brosch%C3%BCre-gesellschaftlicher-Nutzen-PSM.pdf> (03.03.2021).
- Nowara, D.; Gay, A.; Lacomme, C.; Shaw, J.; Ridout, C.; Douchkov, D. et al. (2010): HIGS: host-induced gene silencing in the obligate biotrophic fungal pathogen *Blumeria graminis*. *Plant Cell* 22: 3130–3141. doi: 10.1105/tpc.110.077040.
- Oberemok, V. V.; Laikova, K. V.; Gninenko, Y. L.; Zaitsev, A. S.; Nyadar, P. M.; Adeyemi, T. A. (2015): A short history of insecticides. *Journal of Plant Protection Research* 55(3): 221-226. doi: 10.1515/jppr-2015-0033.
- Olson, S. (2015): An analysis of the biopesticide market now and where it is going. *Outlooks on pest management* 26 (5): 203-206, doi: 10.1564/v26_oct_04.
- Panasiuk, O. (1984): Response of Colorado potato beetles, *Leptinotarsa decemlineata* (Say), to volatile components of tansy, *Tanacetum vulgare*. *Journal of Chemical Ecology* 10: 1325–1333. doi: 10.1007/BF00988114.
- Papadopoulou, N.; Devos, Y.; Álvarez-Alfageme, F.; Lanzoni, A. Waigmann, E. (2020): Risk assessment considerations for genetically modified RNAi plants: EFSA’s activities and perspective. *Frontiers in Plant Science* 11 (445): 1 - 8. doi: 10.3389/fpls.2020.00445.
- Parker, KW.; Barragán Borrero, V.; van Leeuwen, DM; Lever, MA.; Mateescu, B.; Sander, M. (2019): Environmental Fate of RNA Interference Pesticides: Adsorption and Degradation of Double-Stranded RNA Molecules in Agricultural Soils. *Environmental Science & Technology* 53 (6): 3027-3036. doi: 10.1021/acs.est.8b05576.
- Parker, K M.; Sander, M. (2017): Environmental Fate of Insecticidal Plant-Incorporated Protectants from Genetically Modified Crops: Knowledge Gaps and Research Opportunities. *Environmental Science & Technology* 51 (21): 12049–12057. doi: 10.1021/acs.est.7b03456.

- Petgen, M.; Kurz, O. (2019): Unterstockbodenpflege 4.0. ATW aktuell. Der deutsche Weinbau 16-17: 35 – 42. https://www.weincampusneustadt.de/fileadmin/user_upload/Forschung/Forschungsantraege_und_Dokumente/2019_ddw16-17-ATW-Petgen.pdf (25.05.2021).
- Pflanzenforschung.de (2018): Pflanzenschutz ohne Chemie. RNA - „Impfung“ gegen Krankheitserreger und Schädlinge. <https://www.pflanzenforschung.de/de/pflanzenwissen/journal/pflanzenschutz-ohne-chemie-rna-impfung-gegen-krankheits-10917> (28.01.2022).
- Piot, N.; Snoeck, S.; Vanlede, M.; Smagghe, G. and Meeus, I. (2015): The effect of oral administration of dsRNA on viral replication and mortality in *Bombus terrestris*. *Viruses* 7: 3172–3185. doi: 10.3390/v7062765.
- Prasad, R.; Bhattacharyya, A.; Nguyen, QD. (2017): Nanotechnology in Sustainable Agriculture: Recent Developments, Challenges, and Perspectives. *Frontiers in Microbiology* 20 (8): 1014. doi:10.3389/fmicb.2017.01014.
- Proplanta (2007): Zulassung des Herbizides Gramoxone Extra ruht. https://www.proplanta.de/agrar-nachrichten/unternehmen/zulassung-des-herbizides-gramoxone-extra-ruht_article1184738253.html (05.03.2021).
- Proplanta (2019): Glöckner erwartet Glyphosat-Ende spätestens 2022. https://www.proplanta.de/agrar-nachrichten/agrapolitik/gloeckner-erwartet-glyphosat-ende-spaetestens-2022_article1563143536.html. (05.03.2021).
- Prüfer, D.; Schäfers, C.; Maskos, M.; Löbbecke, S. (2021): SeedPLUS - Improved crop yield through protective and supportive multifunctional coatings of seeds. Unveröffentlichte Skizze zum Fraunhofer-PREPARE-Vorhaben der Institute IME, IMM und ICT.
- Quik, J.T.K., Meesters, J.A.J., Peijnenburg, W.J.G.M., Brand, W., Bleeker, E.A.J. (2020): Environmental Risk Assessment (ERA) of the application of nanoscience and nanotechnology in the food and feed chain. EFSA supporting publication 2020:EN-1948. 133 pp. doi: 10.2903/sp.efsa.2020.EN-1948
- Rajmis, S.; Karpinski, I. (2020): Ökonomische Bewertung der teilflächenspezifischen Unkrautbekämpfung, 29. Deutsche Arbeitsbesprechung über Fragen der Unkrautbiologie und -bekämpfung. 29. Deutsche Arbeitsbesprechung über Fragen der Unkrautbiologie und -bekämpfung ; 3. - 5. März 2020, Braunschweig, Julius-Kühn-Archiv. doi: 10.5073/jka.2020.464.004.
- Reuter, C.; Eberz-Eder, D.; Kuntke, Fr. & Trapp, M. (2022): RSF-Lab'22: Resilient Smart Farming Laboratory: Für eine widerstandsfähige und intelligente Landwirtschaft. In: Demmler, D.; Krupka, D. & Federrath, H. (Hrsg.), INFORMATIK 2022. Gesellschaft für Informatik, Bonn: 931-934. doi: 10.18420/inf2022_78.
- Rohleder, B.; Krüsken, B.; Reinhardt, H. (2020): Digitalisierung in der Landwirtschaft 2020. Präsentation. <https://www.bitkom.org/Presse/Presseinformation/Schon-8-von-10-Landwirten-setzen-auf-digitale-Technologien> (25.05.2021).
- Rubenschuh, U.; Volz, F. (2019): Nährstoffgehalte in Gülle online mit Sensoren bestimmen. DLG-Kompakt 8/2019. <https://www.dlg.org/de/landwirtschaft/themen/technik/technik-in-der-pflanzenproduktion/dlg-kompakt-08-2019> (25.05.2021).
- Rueg, P. (2021): Mehr Ertrag in Mischkulturen. <https://ethz.ch/de/news-und-veranstaltungen/eth-news/news/2021/06/mehr-ertrag-in-mischkulturen.html>. 21.01.2022.
- Schäffer, A.; Filser, J.; Frische, T.; Gessner, M.; Köck, W.; Kratz, W.; Liess, M.; Nuppenau, E-A.; Roß-Nickoll, M.; Schäfer, R.; Scheringer, M. (2018): Der stumme Frühling - Zur Notwendigkeit eines umweltverträglichen Pflanzenschutzes. Diskussion Nr. 16. Nationale Akademie der Wissenschaften - Leopoldina, Halle (Saale). <https://www.leopoldina.org/publikationen/detailansicht/publication/der-stumme-fruehling-zur-notwendigkeit-eines-umweltvertraeglichen-pflanzenschutzes-2018/> (03.03.2021).

Schellenberger, U.; Oral, J.; Rosen, B. A.; Wei, J. Z.; Zhu, G.; Xie, W. & Sandahl, G. A. (2016): A selective insecticidal protein from *Pseudomonas* for controlling corn rootworms. *Science* 354(6312): 634-637.

Schwirn, K.; Völker, D. (2020): Nanomaterialien in der Umwelt – Aktueller Stand der Wissenschaft und Regulierungen zur Chemikaliensicherheit - Empfehlungen des Umweltbundesamtes. Umweltbundesamt, Dessau. <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen> (20.01.2022).

Shelton, A.M.; Hossain, J.; Paranjape, V; Prodhon, Z.H.; Azad, A. K.; Majumder, R.; Sarwer, S.H.; Hossain, A. (2019): Bt Brinjal in Bangladesh: The First Genetically Engineered Food Crop in a Developing Country. *Cold Spring Harbor Perspectives in Biology* 11(10):a034678. doi:10.1101/cshperspect.a034678.

Sirami, C.; Gross, N.; Bøsem Baillod, A.; Bertrand, C.; Carrié, R.; Hass, A.; Henckel, L.; Miguet, P.; Vuillot, C.; Alignier, A.; Girard, J.; Batáry, P.; Clough, Y; Violle, C.; Giralt, D.; Bota, G.; Badenhausser, I.; Lefebvre, G.; Gauffre, B.; Vialatte, A.; Calatayud, F.; Gil-Tena, A.; Tischendorf, L.; Mitchell, S.; Lindsay, K.; Georges, R.; Hilaire, S.; Recasens, J.; Solé-Senan, X.O.; Robleño, I.; Bosch, J.; Barrientos, J.A.; Ricarte, A.; Marcos-Garcia, M.A.; Miñano, J.; Mathevet, R.; Gibon, A.; Baudry, J.; Balent, G.; Poulin, B.; Burel, F.; Tscharnkte, T.; Bretagnolle, V.; Siriwardena, G.; Ouin, A.; Brotons, L.; Martin, J.L.; Fahrig L. (2019): Increasing crop heterogeneity enhances multi-trophic diversity across agricultural regions. *Proceedings of the National Academy of Sciences* Aug 2019, 116 (33): 16442-16447. doi: 10.1073/pnas.1906419116.

Staudinger, H. and Ruzicka, L. (1924): Insektentötende Stoffe III. Konstitution des Pyrethrolons. *Helvetica Chimica Acta* 7(1): 212-235.

Steinkellner, S. (2019): Nationale Machbarkeitsstudie zum Glyphosatausstieg. Endbericht zum Forschungsprojekt Nummer 101347. <https://egz.at/pdfs/0e27f/Machbarkeitstudie-zum-Glyphosatausstieg.pdf> (25.05.2021).

Steketee (2020): IC-WEEDER Intelligentes Hackgerät mit Einzelpflanzenerkennung. https://www.steketee.com/wp-content/uploads/IC-Weeder_de.pdf (25.05.2021).

Stiftung Warentest (2019): Nanoteilchen - Das sollten Sie wissen. <https://www.test.de/Nanoteilchen-Das-sollten-Sie-wissen-4445980-0/> (02.02.2022).

Strube D&S GmbH (2021): Kleist N – Typ. <https://www.strube.net/produkte/zuckerruebe/sortendetail/kleist> (08.03.2021).

Svobodová, Z.; Shu, Y.; Skoková Habušťová, O.; Romeis, J.; Meissle, M. (2017): Stacked Bt maize and arthropod predators: exposure to insecticidal Cry proteins and potential hazards. *Proceedings Biological Sciences* 284(1859):20170440. doi: 10.1098/rspb.2017.0440.

Tagesschau (2019): Schnelles Internet - Warum Deutschland hinterherhinkt. <https://www.tagesschau.de/inland/internet-breitband-101.html> (25.01.2022).

TerraHORSCH (2020): Auf dem Weg zum Full-Liner. <https://terra.horsch.com/ausgabe-20-2020/aus-dem-unternehmen/auf-dem-weg-zum-full-liner-theodor-leebe> (25.05.2021).

Thomas, K.; Ullrich, K. (2022): EFA (Effiziente Förderung der Artenvielfalt in ackerbaulich genutzten Landschaften) (EFA). <http://efa-suedpfalz.de> (21.01.2022).

Thorvald (2021): Controlling mildew with light treatment. <https://sagarobotics.com/pages/light-treatment> (09.03.2021).

Tian, F.; Li, C.; Wang, Z.; Liu, J.; Zeng, X. (2019): Identification of detoxification genes in imidacloprid-resistant Asian citrus psyllid (Hemiptera: Liviidae) and their expression patterns under stress of eight insecticides. *Pest Management Science* 75(5): 1400-1410. doi: 10.1002/ps.5260. Epub PMID: 30411865.

- Trapp, M.; Deubert, M.; Streib, L.; Scholz-Starke, B.; Roß-Nickoll, M.; Toschki, A. (2020): Simulating the Effects of Agrochemicals and Other Risk-Bearing Management Measures on the Terrestrial Agrobiodiversity: The RISK-MIN Approach. In: Mirschel W., Terleev V., Wenkel KO. (eds) Landscape Modelling and Decision Support. Innovations in Landscape Research. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-37421-1_23.
- Trapp, M.; Thomas, K.; Opferkuch, K.; Altmayer, B. (2011): Abschätzung und räumliche Darstellung des flächenhaften Ausmaßes erhöhter Kupfergehalte in Weinbergböden infolge des historischen Einsatzes kupferhaltiger Pflanzenschutzmittel – Erarbeitung einer Methodik an einer Modellregion in Deutschland“ Endbericht. RLP AgroScience: 94.
- Trapp, M.; Kubiak, R.; Guerniche, D.; Eberz-Eder, D.; Weimper, J. (2022): The Role of Geo-Based Data and Farm-Specific Integration: Usage of a Resilient Infrastructure in Rhineland Palatinate, Germany, Handbook Digital Farming: 162-170, Springer.
- Tripathi, S.; Suzuki, J.Y.; Ferreira, S.A. and Gonsalves, D. (2008): Papaya ringspot virus-P: characteristics, pathogenicity, sequence variability and control. *Molecular Plant Pathology* 9: 269-280. doi: 10.1111/j.1364-3703.2008.00467.x.
- UBA (Umweltbundesamt) (2023): Zugelassene Pflanzenschutzmittel. <https://www.umweltbundesamt.de/daten/chemikalien/pflanzenschutzmittel-in-der-umwelt#zugelassene-pflanzenschutzmittel> (05.03.2024)
- Umetsu, N.; Shirai, Y. (2020): Development of novel pesticides in the 21st century. *Journal of Pesticide Science* 45(2): 54-74. doi: 10.1584/jpestics.D20-201. PMID: 33132734; PMCID: PMC7581488.
- US EPA (United States Environmental Protection Agency) (2014): RNAi Technology: Program Formulation for Human Health and Ecological Risk Assessment. Scientific Advisory Panel Minutes No.2014-02 (Arlington, VA).
- US EPA (United States Environmental Protection Agency) (2016): RNAi Technology: Human Health and Ecological Risk Assessments for SmartStax PRO. FIFRA Scientific Advisory Panel Minutes No. 2016-02 (Arlington, VA).
- US EPA (United States Environmental Protection Agency) (2018): Sequence Alignment to Predict Across Species Susceptibility (SeqAPASS). <https://seqapass.epa.gov/seqapass/> (25.05.2021).
- US EPA (United States Environmental Protection Agency) (2021): Overview of Plant Incorporated Protectants. <https://www.epa.gov/regulation-biotechnology-under-tsca-and-fifra/overview-plant-incorporated-protectants> (08.03.2021).
- van Duijn, L. (2019): Renewal of actives Ensuring an efficient process, focus on Safe use. Presentation. ECPA-ECCA conference May 2019, Ghent. 22.-23.05.2019.
- Vijver, M.G.; Hunting, .ER.; Nederstigt, T.A.; Tamis, W.L.; van den Brink, P.J.; van Bodegom, P.M. (2017): Postregistration monitoring of pesticides is urgently required to protect ecosystems. *Environmental Toxicology and Chemistry* 36(4): 860-865. doi: 10.1002/etc.3721.
- Villa-Henriksen, A.; Edwards, G.T.C.; Pesonen, L.A. ; Green, O.; Grøn Sørensen, C.A. (2020): Internet of Things in arable farming: Implementation, applications, challenges and potential. *Biosystems Engineering* 191: 60-84.
- Wegener, J.K.; Urso, L.M.; von Hörsten, D.; Minßen, T.F.; Gaus, C.C. (2017): Neue Pflanzenbausysteme entwickeln – welche innovativen Techniken werden benötigt? *Landtechnik* 72(2): 91–100. doi:10.15150/lt.2017.3156.
- Wegener, JK.; Urso, LM.; von Hörsten, D.; Hegewald, H.; Minßen, T.F.; Schattenberg, J.; Gaus, C.C.; De Witte, T.; Nieberg, H.; Isermeyer, F.; Frerichs, L.; Backhaus, G.F. (2019): Spot farming – an alternative for future plant production. *Journal für Kulturpflanzen* 71(4): 70–89. doi: 10.5073/JfK.2019.04.02.

Wegener, J. K.; von Hörsten, D. (2021): Mit Spot Farming in die Zukunft des Pflanzenbaus. In: Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e. V. (KTBL)(Hrsg.): Boden gut machen - neue Ackerbausysteme - KTBL Online-Tagung am 16. und 17. März 2021: 170-186.

Wegener, J.K. (2020): Gezielter und flexibler – Trends in der Pflanzenschutztechnik. In: Frerichs, Ludger (Hrsg.): Jahrbuch Agrartechnik 2019. Braunschweig: Institut für mobile Maschinen und Nutzfahrzeuge: 146-151.

Wein.Plus (2020): Autonomer Roboter mit UV-Strahlung gegen Mehltau. US-Startup entwickelt effiziente, chemiefreie Technik zur Schädlingsbekämpfung. <https://magazin.wein.plus/news/autonomer-roboter-mit-uv-strahlung-gegen-mehltau-us-startup-entwickelt-effiziente-chemiefreie-technik-zur-schaedlingsbekaempfung> (09.03.2021).

Werner, B.T.; Gaffar, F.Y.; Schuemann, J.; Biedenkopf, D. ; Koch, A.M. (2020): RNA-spray-mediated silencing of *Fusarium graminearum* AGO and DCL genes improve barley disease resistance. *Frontiers in Plant Science* 11: 476.

Wettstein, S.; Stucki, M.; Meier, M.; Schumacher, P.; Buchli, J. (2016): Ökobilanz von Schweizer Wein aus ÖLN- und biologischer Produktion. Institut für Umwelt und Natürliche Ressourcen, Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften und Forschungsinstitut für biologischen Landbau, Wädenswil und Frick.

Whittaker, M. (2017): Ecological risk assessment for microbial pesticides – are the current guidelines fit for purpose? Presentation, 17th International Fresenius ECOCOTOC Conference, Mainz, Germany, 7.12.2017.

Wikipedia (2021): Aga-Kröte. <https://de.wikipedia.org/wiki/Aga-Kr%C3%B6te> (26.01.2022).

Xiao, Da.; Yan-Hui Lu; Qing-Li Shang; Dun-Lun Song and Xi-Wu Gao (2015): Gene silencing of two acetylcholinesterases reveals their cholinergic and non-cholinergic functions in *Rhopalosiphum padi* and *Sitobion avenae*. *Pest Management Science* 71(4): 523-530.

Yara GmbH & Co. KG (2021): N-Sensor. <https://www.yara.de/pflanzenernaehrung/tools-und-services/n-sensor/> (25.05.2021).

Zasso (2020): Providing tools for a herbicide-free world. <https://zasso.com/home/how/technology/#electro-herb> (08.03.2021).

ZEPP (Zentralstelle der Länder für EDV-gestützte Entscheidungshilfen und Programme im Pflanzenschutz) (2021): PAM3D - Integration von Hangneigungsaufgaben in den Pflanzenschutz-Anwendungs-Manager. <http://zepp.info/proj/lp/221-pam-3d> (20.04.2021).