Bearbeitet von:
Dr. Ralf Wilhelm

Bericht zu möglichen Synergien der Nutzung neuer molekularbiologischer Techniken für eine nachhaltige Landwirtschaft

Report on possible synergies of the use of new genomic techniques for sustainable agriculture

Julius Kühn-Institut (JKI), Bundesforschungsinstitut für Kulturpflanzen Institut für die Sicherheit biotechnologischer Verfahren bei Pflanzen, Quedlinburg



215

Kontaktadresse/ Contact

Dr. Ralf Wilhelm
Julius Kühn-Institut (JKI)
Bundesforschungsinstitut für Kulturpflanzen
Institut für die Sicherheit biotechnologischer Verfahren bei Pflanzen
Erwin-Baur-Str. 27
06484 Quedlinburg,
Germany

E-Mail: sb@julius-kuehn.de Telefon: +49 (0) 3946 47-0 Telefax: +49 (0) 3946 47-500

Wir unterstützen den offenen Zugang zu wissenschaftlichem Wissen.

Die Berichte aus dem Julius Kühn-Institut erscheinen daher als OPEN ACCESS-Zeitschrift.

We advocate open access to scientific knowledge.

Reports from the Julius Kühn Institute are therefore published as open access journal.

Berichte aus dem Julius Kühn-Institut sind online verfügbar unter https://ojs.openagrar.de/index.php/BerichteJKI Reports from the Julius Kühn Institute are available free of charge under https://ojs.openagrar.de/index.php/BerichteJKI

Herausgeber / Editor

Julius Kühn-Institut, Bundesforschungsinstitut für Kulturpflanzen, Braunschweig, Deutschland Julius Kühn Institute, Federal Research Centre for Cultivated Plants, Braunschweig, Germany

ISSN 1866-590X DOI 10.5073/20211215-094810



(cc) BY

© Der Autor/ Die Autorin 2021.

Dieses Werk wird unter den Bedingungen der Creative Commons Namensnennung 4.0 International Lizenz (CC BY 4.0) zur Verfügung gestellt (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.de).

(cc) BY

© The Author(s) 2021.

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

Bericht zu möglichen Synergien der Nutzung neuer molekularbiologischer Techniken für eine nachhaltige Landwirtschaft

Report on possible synergies of the use of new genomic techniques for sustainable agriculture

Redaktion und Autoren:

Wilhelm, Ralf*,⁸; Bartsch, Detlef¹⁶; Consmüller, Nicola¹⁶; de Witte, Thomas¹³; Ehlers, Ulrich¹⁶; Feike, Til⁹; Gocht, Alexander¹³; Hartung, Frank⁸; Kahrmann, Jens¹⁶; Kehlenbeck, Hella⁹; Leggewie, Georg¹⁶; Lehnert, Heike⁸; Ordon, Frank⁵; Sprink, Thorben⁸

Co-Autoren:

Holger Beer⁵; Bloem, Elke⁶; Hausmann, Johannes¹; Flachowsky, Henryk¹¹; Gathmann, Achim¹⁵; Herrmann, Daniel²; Herz, Annette³; Jacobs, Anna¹⁴; Jehle, Johannes³; Joachim, Christoph¹; Kämpfer, Christoph¹; Kohl, Christian⁸; König, Janine¹⁰; Kottmann, Lorenz⁶; Marthe, Frank¹⁰; Nothnagel, Thomas¹⁰; Peil, Andreas¹¹; Rautmann, Dirk²; Rodemann, Bernd¹; Söchting, Hans-Peter¹; Stahl, Andreas⁷; Töpfer, Reinhard¹²; Trapp, Oliver¹²; Ulber, Lena¹; Vaasen, Anja¹⁶; Vogler, Ute⁴; Wegener, Jens Karl²; Wennmann, Jörg³; Will, Torsten⁷; Zetzsche, Holger⁷

^{*} Kontakt: ralf.wilhelm@julius-kuehn.de

Julius Kühn-Institut – Bundesforschungsinstitut für Kulturpflanzen (JKI)

- ¹ Institut für Pflanzenschutz im Ackerbau und Grünland (A), Braunschweig
- ² Institut für Anwendungstechnik im Pflanzenschutz (AT), Braunschweig
- ³ Institut für biologsichen Pflanzenschutz (BI), Darmstadt
- ⁴ Institut für Pflanzenschutz für Gartenbau und Forst (GF), Braunschweig
- ⁵ Leitung (L), Quedlinburg
- ⁶ Institut für Pflanzenbau und Bodenkunde (PB), Braunschweig
- ⁷ Institut für Resistenzforschung und Stresstoleranz (RS), Quedlinburg
- ⁸ Institut für die Sicherheit biotechnologsicher Verfahren bei Pflanzen (SB), Quedlinburg
- ⁹ Institut für Strategien und Folgenabschätzung (SF), Kleinmachnow
- ¹⁰ Institut für Züchtungsforschung and gartenbaulichen Kulturen (ZG), Quedlinburg
- ¹¹ Institut für Züchtungsforschung an Obst (ZO), Dresden
- ¹² Institut für Rebenzüchtung (ZR), Siebeldingen

Thünen-Institut (TI)

- ¹³ Institut für Betriebswirtschaft, Braunschweig
- ¹⁴ Stabsstelle Boden, Braunschweig

Bundesamt für Verbraucherschutz und Lebensmittelsicherheit (BVL)

- ¹⁵ Abteilung 2: Pflanzenschutzmittel, Braunschweig
- ¹⁶ Abteilung 4: Gentechnik und weitere biotechnische Verfahren, Berlin

Inhalt

Zusammenfassung	6
Executive Summary	9
·	
1. Einleitung	11
1.1 Nachhaltige Pflanzenproduktion	12
1.2 Neue molekularbiologische Techniken – Genomeditierung - Gentechnik	13
2. Herausforderungen und Maßnahmen der nachhaltigen Pflanzenproduktion	16
2.1 Zusammenfassung Herausforderungen und Maßnahmen	16
2.1.1 Anpassung an den Klimawandel	17
2.1.2 Nachhaltiger Pflanzenschutz	18
2.1.3 Nachhaltige Nährstoffversorgung der Kulturpflanzen	19
2.1.4 Sicherung der Ertragspotenziale	20
2.1.5 Zeitnahe Integration verschiedener Maßnahmen und Synergiepotenziale	20
2.2 Anpassung an den Klimawandel	27
2.2.1 Züchterische Maßnahmen	30
2.2.2 Technische Maßnahmen	36
2.2.3 Anbaumaßnahmen	37
2.3 Nachhaltiger Pflanzenschutz	39
2.3.1 Züchterische Maßnahmen	40
2.3.2 Technische Maßnahmen	47
2.3.3 Anbaumaßnahmen	51
2.4 Nachhaltige Nährstoffversorgung der Kulturpflanzen	55
2.4.1 Züchterische Maßnahmen zur Reduktion der Düngung	55
2.4.2 Technische Maßnahmen zur Reduktion der Düngung	58
2.4.3 Anbaumaßnahmen zur Reduktion der Düngung	59
2.4.4 Züchterische Maßnahmen zur Optimierung von Humusgehalt und Erosionschutz	60
2.4.5 Technische Maßnahmen zur Optimierung von Humusgehalt und Erosionschutz	60
2.4.6 Anbaumaßnahmen	60
2.5 Sicherung der Ertragspotenziale und Züchtungseffizienz	62
2.5.1 Züchtungseffizienz	63
2.5.2 Verbesserung des Ertragspotenzials	64
2.5.3 Domestikation	65
2.5.4 Ernteverluste	66
2.5.5 Nachernteverluste/Lagerung	66

3. Gentechnik als Baustein für nachhaltige Landwirtschaft – Grundlagen und	
Entwicklungsszenarien	72
Szenario 1: Alle genomeditierten Pflanzen werden weiterhin als gentechnisch veränderte Organismen reguliert.	72
Szenario 2: Genomeditierte Pflanzen (SDN-1 und SDN-2) fallen nicht unter das EU- Gentechnikrecht.	73
3.1 Rechtliche Rahmenbedingungen (international, EU, national) 3.1.1 Vorgaben aus dem Gentechnikrecht	74 74
3.1.2 Vorgaben für den Anbau von gv Pflanzen3.1.3 Vorgaben für die ökologische Produktion3.1.4 Vorgaben aus dem Düngerecht	74 75 75
3.1.5 Vorgaben für die Anwendung von Pflanzenschutzmitteln3.2 Anpassung des Handels an die Verfügbarkeit gentechnisch veränderter Produkte	76 78
3.2.1 Handel - Szenario 1: Alle genomeditierten Pflanzen werden weiterhin als gentechnisch veränderte Organismen reguliert 3.2.2 Handel - Szenario 2: Genomeditierte Pflanzen (SDN-1 und SDN-2) fallen nicht unter das EU-Gentechnikrecht	79 81
 3.3 Auswirkungen des Einsatzes von Gentechnik auf die Wettbewerbsfähigkeit und das Einkommen in der Landwirtschaft sowie die Struktur der Saatgutbranche 3.3.1 Wettbewerbsfähigkeit und das Einkommen in der landwirtschaftlichen Produktion 3.3.2 Einfluss auf die Struktur der Saatgutbranche 	82 82 85
3.4 Auswirkungen des Einsatzes von Gentechnik auf die Umwelt einschließlich der Biodiversität 3.4.1 Umwelt - Szenario 1: Alle genomeditierten Pflanzen werden weiterhin als gentechnisch veränderte Organismen reguliert 3.4.2 Umwelt - Szenario 2: Genomeditierte Pflanzen (SDN-1 und SDN-2) fallen nicht unter das EU-	88
Gentechnikrecht	90
4. Forschungsbedarf – Genomeditierung und nachhaltige Landwirtschaft	92
4.1 Integrierende, interdisziplinäre Forschung – gemeinsame Ziele 4.1.1 Synergiepotenziale von klassischer Züchtung und Genomeditierung 4.1.2 Sicherheitsforschung 4.1.3 Sozioökonomie 4.1.4 Wissenschaft und Entscheidungsfindung dialogisieren	92 93 94 94 96
4.2 Zeitliche und räumliche Dimensionen möglicher (experimenteller) Forschungsprogramme und - arbeiten 4.2.1 Methodische Entwicklungen 4.2.2 Feldversuche	96 96 96
4.2.3 Kurzfristige thematische Fragestellungen (3 Jahre +) - Ziel: Proof of Concept4.2.4 Mittelfristige thematische Fragestellungen (5 Jahre +) - Ziel: Umsetzung für die Praxis	97 97

Quellen 99

Zusammenfassung

Die Landwirtschaft der Zukunft steht vor Herausforderungen, den beschleunigten klimatischen Veränderungen zu begegnen und dem gesellschaftlichen Bedürfnis nach gesicherter Nahrungsmittelversorgung mittels nachhaltiger Produktion gerecht zu werden. Der vorliegende Bericht beschreibt Maßnahmen aus den Bereichen Anbautechnik, Anbaumanagement und Züchtung, die diesen Herausforderungen begegnen, und identifiziert synergistische Potenziale des Einsatzes klassischer Gentechnik und neuer molekularbiologischer Techniken (i.W. Genomeditierung). Darauf aufbauend und ausgehend von den aktuellen Rahmenbedingungen werden Umwelteffekte und sozioökonomische Folgen der Nutzung von genomeditierten Pflanzen analysiert und Forschungsbedarf abgeleitet.

Eine zentrale Herausforderung stellt die Anpassung der landwirtschaftlichen Produktion an den Klimawandel dar. Klimatische Veränderungen führen zum gehäuften Auftreten von abiotischen (Temperaturextreme; Trockenheit) und biotischen Stressereignissen (Schaderregerauftreten), die sich negativ auf die Ertragsstabilität auswirken. Umwelt und Biodiversität sollen durch die Reduktion der Anwendung von chemischen Pflanzenschutzmitteln und die Verringerung von Nährstoffausträgen geschützt und gefördert werden.

In den Bereichen Züchtung, Anbautechnik und -management gibt es verschiedene (zeitnahe) Maßnahmenoptionen, um die landwirtschaftliche Produktion nachhaltig zu optimieren und den genannten Herausforderungen zu begegnen (z. B. Sortenanpassung, präzise/digitale Anbautechniken, erweiterte Fruchtfolgen). Eine standort- und problemgerechte Kombination von Maßnahmen ist erforderlich, da keine standortübergreifende Universallösung existiert.

Gentechnik und neue molekularbiologische Techniken, insbesondere die Genomeditierung, bieten die Möglichkeit zur Beschleunigung des Züchtungsfortschritts und können so zu einer schnelleren Verfügbarkeit von angepassten Sorten und einem breiteren Sortenspektrum/Artenspektrum in der Landwirtschaft beitragen (z. B. durch Vermeidung der Einkreuzung unerwünschter Eigenschaften aus Wildarten in moderne leistungsfähige Sorten, um Resistenzen zu etablieren). Es werden bereits Merkmale bearbeitet, die zu einer besseren Klimaanpassung (Wasserhaushalt, Blühzeitpunkte), verbesserten Resistenzen (Pilzresistenzen) oder einem höheren Ertragspotenzial beitragen. Für komplexe Merkmale, die im Zusammenhang mit Klimaanpassung und Nährstoffeffizienz stehen, gibt es bisher nur einzelne Arbeiten (z. B. Stickstoff-Effizienz), die über die Grundlagenforschung hinausgehen. Komplex vererbte Merkmale, die durch viele Gene mit kleinen Effekten gesteuert werden, sind züchterisch schwieriger zu bearbeiten und erfordern erhöhten Forschungsaufwand. Genomeditierung kann durch gezielte Mutationen zur Aufklärung von Genfunktionen und zur schnelleren Bearbeitung beitragen.

Die Genomeditierung setzt detaillierte Informationen zu den zu modifizierenden Zielsequenzen und Genfunktionen sowie die Möglichkeit der *in-vitro-*Kultivierung von Pflanzen(zellen) voraus. Diese Erfordernisse sind nicht für alle Kulturpflanzen/Merkmale (z. B. nicht für den Roggen) gegeben. Die zeitnahe Erreichung wichtiger Züchtungsziele ist daher auf den integrierten Einsatz verschiedener Züchtungstechniken und gezielte molekularbiologische Forschung angewiesen.

Das geltende europäische Gentechnikrecht stellt eine erhebliche Hürde für die Anwendung von neuen molekularbiologischen Techniken in der Landwirtschaft dar. Im Ökolandbau dürfen diese Techniken aufgrund staatlicher und privater Vorschriften nicht eingesetzt werden. Gleichzeitig könnten steigende Anforderungen im Dünge- und Pflanzenschutzmittelrecht den Bedarf für die Anwendung moderner Züchtungstechniken erhöhen.

Anders als bei der klassischen Gentechnik gibt es bei der Genomeditierung weltweit unterschiedliche Herangehensweisen in der Regulierung. Dies hat Konsequenzen für den internationalen Handel. Vor dem Hintergrund einer erschwerten Nachweis- und Identifizierungsmöglichkeit im Endprodukt kann angenommen werden, dass zukünftig Importe aus Ländern, die Genomeditierung ohne EUrechtsäquivalente Regulierung einsetzen, zum Erliegen kommen werden. Dies könnte erhebliche Auswirkungen auf die Landnutzung in der EU, die Preise für landwirtschaftliche Produkte sowie auf die Umwelt haben.

Nach bisherigen Erfahrungen aus der Gentechnik ist davon auszugehen, dass sich der Einsatz neuer molekularbiologischer Techniken positiv auf das Einkommen und die Wettbewerbsfähigkeit von landwirtschaftlichen Betrieben auswirkt. In Europa werden solche Techniken jedoch nur eingesetzt, wenn sie rechtlich nicht als Gentechnik eingestuft werden. Ansonsten übersteigen in der Regel Kosten und Aufwand von Zulassung und Koexistenz infolge der mangelnden gesellschaftlichen Akzeptanz den Nutzen. Die aktuelle Einstufung der neuen molekularbiologischen Techniken als Gentechnik führt zu erheblichen Zeitverzögerungen in den Zulassungsverfahren, die den Kernvorteil einer schnelleren Entwicklung neuer Sorten mit optimierten Eigenschaften nivelliert.

Wenn die Genomeditierung in Europa nicht als Gentechnik eingestuft wird, steigen für den Ökolandbau die Kosten der selbst auferlegten Trennung, da nach geltenden Regeln genomeditierte Pflanzen nach wie vor abgelehnt werden. Aufgrund der fehlenden Möglichkeiten zur Identifizierung genomeditierter Pflanzen wird sich der Zertifizierungsaufwand für den Ökolandbau künftig erhöhen. Weiterhin würde sich das für den Ökolandbau verfügbare Saatgut verringern.

Entscheidend für die Effekte des Anbaus einer Kulturpflanze auf die Umwelt inklusive Biodiversität sind ihre Eigenschaften, unabhängig davon, wie diese erzeugt wurden (klassische Züchtung, Gentechnik, neue molekularbiologische Techniken). Neue oder veränderte Eigenschaften können zu Veränderungen in den Anbaumaßnahmen führen (z. B. einem angepassten Resistenzmanagement bei schädlingsresistenten Pflanzen). Je nach Regulierungsszenario/Rahmenbedingungen sind als Folge veränderter Anbaumaßnahmen und Effekte auf die Umwelt zu erwarten.

Forschung zur Einbindung neuer molekularbiologischer Techniken bzw. der Genomeditierung in eine nachhaltige Pflanzenproduktion kann kurzfristig bei Aspekten des Pflanzenschutzes (z. B. Resistenzen gegen Pflanzenkrankheiten und Schädlinge), der Pflanzenentwicklung (z. B. Blühzeitpunkt zur Vermeidung von Klimawirkungen), der Pflanzenarchitektur (z. B. Wurzelmorphologie zur Wasserversorgung) und physiologischen Anpassungen (z. B. Stress-Regulation, Nährstoffeffizienz) anknüpfen. Integrierende Forschungsarbeiten mit technischen Maßnahmen oder Anbaumanagementoptionen liegen bisher nicht vor.

Eine integrierende, interdisziplinäre Forschung sollte die Potenziale der Genomeditierung für die Züchtung effizienter, nachhaltiger Kulturpflanzen in den Anbausystemen darstellen. Dabei sollten parallel evidenzbasierte Abschätzungen zu den Folgen für die Umwelt und die wirtschaftlichen und sozialen Systeme regional wie international betrachtet und genutzt werden. Für die Kommunikation komplexer Forschung und der Ergebnisbewertung sind geeignete Formate für einen zielgruppenorientierten Dialog zwischen der Wissenschaft, den verschiedenen gesellschaftlichen Akteuren und Entscheidungsträgern zu entwickeln.

Im Labor- und Gewächshausmaßstab können neben züchterischen F&E-Arbeiten, der Charakterisierung und Testung der modifizierten Pflanzen begrenzte Fragestellungen zur Nachhaltigkeit verschiedener Maßnahmenkombinationen experimentell untersucht werden. Sozioökonomische Aspekte und Umweltwirkungen lassen sich ggf. durch abgeleitete Szenarien und Modelle auch in silico erarbeiten und abschätzen.

Eine Bewertung von modifizierten Pflanzen unter realen Anbaubedingungen und hinsichtlich verschiedener Umweltwirkungen ist zwingend notwendig und erfordert geeignete Freilandflächen. Aufgrund der aktuellen Rahmenbedingungen sind Arbeiten mit neuen molekularbiologischen Techniken nur unter gentechnikrechtlichen Auflagen möglich. Entsprechende Versuchsflächen werden benötigt.

Executive Summary

Future agriculture faces challenges to meet the accelerated climatic changes and to meet society's needs for a secure food supply through sustainable production. This report describes measures in the range of cultivation technology, cultivation management and breeding, which face these challenges, and it identifies synergistic potentials of the use of classical genetic engineering and new genomic techniques (mainly genome editing). Based thereupon and on the current framework conditions, environmental effects and socio-economic consequences of the use of genome-edited plants are analysed. A concept for supporting research is outlined.

A central challenge is the adaptation of agricultural production to climate change. Climatic changes lead to abiotic (temperature extremes; drought) and biotic stress events (pest emergence), which have a negative impact on yield stability. The reduction of chemical plant protection and nutrient discharges shall protect the biodiversity and environment.

In the areas of breeding, cultivation techniques and management, there are various (timely) options for measures to optimise agricultural production with regard to sustainability and to meet the challenges mentioned (e.g. variety adaptation, precise/digital cultivation techniques, extended rotation). A site- and problem-specific combination of measures is required, as there is no universal multi-site solution.

Genetic engineering and new molecular biological techniques, especially genome editing, offer the possibility of accelerating breeding progress and can thus increase availability of adapted varieties and a broader variety/species spectrum in agriculture (e.g. by avoiding the crossing of undesirable traits from wild species into modern high-performing varieties in order to establish resistance). Several traits are already worked on that contribute to better climate adaptation (water balance, flowering dates), improved resistance (fungal resistance) or higher yield potential. For complex traits related to climate adaptation and nutrient efficiency, there are so far only individual studies (e.g. nitrogen efficiency) that go beyond basic research. Complex inherited traits, which are controlled by many genes with small effects, are more difficult to work on from a breeding perspective and require increased research efforts. Genome editing can contribute to the elucidation of gene functions and faster processing through targeted mutations.

Genome editing requires detailed information on the target sequences and gene functions to be modified as well as the possibility of cultivating plant (cells) *in vitro*. These requirements are not given for all crops/traits (e.g. not for rye). The timely achievement of important breeding goals is, therefore, dependent on the integrated use of different breeding techniques and targeted molecular biological research.

The current European genetic engineering law represents a considerable hurdle for the application of new genomic techniques in agriculture. In organic farming, these techniques may not be used due to state and private regulations. At the same time, new requirements in fertiliser and pesticide law could increase the need for the application of modern breeding techniques.

In contrast to classical genetic engineering, there are different approaches to the regulation of genome editing worldwide. This has consequences for international trade. Against the background of difficult detection and identification possibilities in the end product, it can be assumed that imports from countries that use genome editing without EU-legally equivalent regulation will come to a standstill in future. This could have a significant impact on land use in the EU, on the prices of agricultural products and on the environment.

According to previous experience from genetic engineering, it can be assumed that the use of new genomic techniques will have a positive effect on the income and competitiveness of farms. In Europe, however, such techniques are broadly used only if they are not legally classified as genetic engineering. Otherwise, the costs and effort of authorisation and coexistence usually exceed the benefits due to the lack of social acceptance. The current classification of new genomic techniques as genetic engineering leads to considerable time delays in the approval procedures, which levels out the core benefit of faster development of new varieties with optimised traits.

If genome editing is not classified as genetic engineering in Europe, the costs of self-imposed segregation will increase for organic farming, as genome-edited plants will still be rejected under current rules of organic producer organisations. Due to the lack of possibilities to identify genome-edited plants, the certification effort for organic farming will increase in the future. Furthermore, the seed available for organic farming would decrease.

The decisive factor for the effects of a crop on the environment, including biodiversity, are its traits, regardless of how these were produced (classical breeding, genetic engineering, new molecular biological techniques). New or modified traits can promote changes in cultivation measures (e.g. adapted resistance management for pest-resistant plants). Depending on the regulatory scenario/framework conditions, effects on the environment can be expected as a consequence of such changed cultivation measures.

Research on the integration of new genomic techniques or genome editing into sustainable crop production can be linked to aspects of plant protection (e.g. resistance to plant diseases and pests), plant development (e.g. time of flowering to avoid climate effects), plant architecture (e.g. root morphology for water supply) and physiological adaptations (e.g. stress regulation, nutrient efficiency) in the short term. Integrating research activities with technical measures or crop management options are not available yet.

Integrating, interdisciplinary research should demonstrate the potentials of genome editing for breeding efficient, sustainable crops in cropping systems. Evidence-based assessments of the consequences for the environment and economic and social systems should be considered and used with regard to regional and international scales in parallel. The communication of complex research and the evaluation of results need suitable formats for a target group oriented dialogue between science, the various social actors and decision-makers. Yet, they need to be further developed.

Apart from breeding R&D work, characterisation and testing of the modified plants only limited questions on the sustainability of different combinations of measures can be investigated experimentally in the laboratory and greenhouse scale. Socio-economic aspects and environmental impacts might also be worked out and estimated in silico, if necessary, through derived scenarios and models.

An evaluation of modified plants under real cultivation conditions and with regard to various environmental impacts is imperative and requires suitable field sites. Due to the current framework conditions, works with new genomic techniques are currently only possible under strict genetic engineering regulations. Appropriate experimental field sites are needed.

1. Einleitung

Die Landwirtschaft der Zukunft steht vor der Herausforderung, den beschleunigten klimatischen Veränderungen zu begegnen und gleichzeitig nachhaltig zu produzieren. Der vorliegende Bericht betrachtet ein umfassendes Portfolio aus Züchtungs-, Anbau- und Managementverfahren, das der Pflanzenproduktion im Freiland zur Verfügung steht, um den drängenden Herausforderungen zu begegnen. Der besondere Schwerpunkt liegt auf dem Einsatz der Genomeditierung, eine neue molekularbiologische Technik (NMT), die aktuell erste kommerzielle Anwendungen erfährt, sowie der klassischen Gentechnik (Transgenese). Potenziale, Synergien und Auswirkungen auf Umwelt und Sozioökonomie werden analysiert und Forschungsansätze für den Einsatz von Genomeditierung für eine nachhaltige Landwirtschaft vorgeschlagen.

Der Bericht beschränkt sich auf den nachhaltigen Anbau sowie die vorgelagerte Züchtung von Kulturpflanzen für die menschliche Ernährung im Freiland und nimmt Bezug auf die Herausforderungen Klimaanpassung, Pflanzenschutz, Pflanzenernährung und Ertragspotenzial. Unter pflanzlichen Lebensmitteln werden Pflanzen aus der gartenbaulichen und landwirtschaftlichen Produktion verstanden, die großflächig und/oder kleinstrukturiert angebaut werden, und sowohl den Grundbedarf als auch wichtige Inhaltsstoffe wie Vitamine für den täglichen Bedarf des Menschen decken. Der Begriff "Nachhaltigkeit" umfasst auch die Biodiversität als integrierende Zielgröße. Nachhaltigkeit wird aber nicht allumfassend entlang der gesamten Wertschöpfungskette in allen umweltbezogenen, sozialen und wirtschaftlichen Dimensionen betrachtet. Die Auswirkungen des Einsatzes von Gentechnik und Genomeditierung auf Sozioökonomie und Umwelt werden jedoch explizit reflektiert.

Spezifische Nutzungsbereiche wie nachwachsende Rohstoffe und optimierte Inhaltstoffzusammensetzung sowie die Tierproduktion hingegen werden hier nicht betrachtet. Ausgeklammert bleiben auch Gewächshauskulturen.

Zentrale Hintergründe zur Nachhaltigkeit der NMT und der klassischen Gentechnik werden im Kapitel 1 erläutert. In Kapitel 2 werden Herausforderungen und Anpassungsoptionen konkret vorgestellt, ohne Anbausysteme spezifisch hervorzuheben: Den Landwirten stehen potenziell "alle Optionen offen". Welche sie nutzen können, hängt i. W. von den regionalen Umwelt- und allgemeinen Rahmenbedingungen ab. Kapitel 3 bezieht mögliche Regulierungsszenarien ein und analysiert deren sozioökonomische und umweltbezogene Auswirkungen. Es werden zwei mögliche Regulierungsszenarien zur Genomeditierung herangezogen, um die sozioökonomische Dimension von Nachhaltigkeit für den Handel, mögliche Einkommenswirkungen für Betriebe und Auswirkungen auf den Wettbewerb zu diskutieren. Die in Kapitel 2 diskutierten technischen und züchterischen Maßnahmen werden bezüglich der Herausforderungen zum Klimawandel, dem Pflanzenschutz, der Nährstoffeffizienz und der Ertragsbildung untersucht. Die Untersuchung, zusammen mit der Bewertung zum Einfluss auf die Umwelt in Kapitel 3.4, beleuchtet somit maßgeblich die ökologische Dimension von Nachhaltigkeit. Anhand der vorgenannten Kapitel wird abschließend der Forschungsbedarf identifiziert (Kapitel 4).

Aufgrund der aktuellen europäischen Rahmenbedingungen und der international verbreiteten Anwendungen werden im Bericht im Wesentlichen klassisch gentechnische Verfahren (bzw. transgene Organismen) und Genomeditierung – hier die mit SDN-1 und SDN-2 bezeichneten Verfahren (bzw. nicht transgene Endprodukte), detailliert betrachtet.

1.1 Nachhaltige Pflanzenproduktion

Nachfolgend wird eine allgemeine Definition von Nachhaltigkeit gegeben und aufgezeigt, wie sich Nachhaltigkeitsziele in der Pflanzenproduktion in verschiedenen politischen Strategiepapieren wiederfinden. Darauf aufbauend wird abgeleitet, wie der Begriff Nachhaltigkeit in der Pflanzenproduktion im Rahmen dieses Berichtes verwendet wird.

Zu den meist genutzten Definitionen des Nachhaltigkeitsbegriffes gehören der sogenannte Brundtland-Bericht, der Nachhaltigkeit als eine Entwicklung definiert, "die den Bedürfnissen der heutigen Generation entspricht, ohne die Möglichkeiten künftiger Generationen zu gefährden, ihre Bedürfnisse zu befriedigen" (United Nations, 1987). Weiterhin wird dort eine nachhaltige Entwicklung als "ein Wandlungsprozess, in dem die Nutzung von Ressourcen, das Ziel von Investitionen, die Richtung technologischer Entwicklung und institutioneller Wandel miteinander harmonisieren und das derzeitige und künftige Potenzial vergrößern, menschliche Bedürfnisse und Wünsche zu erfüllen." (HAUF, 1987).

Daraus abgeleitet wird das "Drei-Säulen-Modell" angewendet, das auf den Abschlussbericht der Enquete-Kommission des deutschen Bundestages "Schutz des Menschen und der Umwelt – Ziele und Rahmenbedingungen einer nachhaltig zukunftsverträglichen Entwicklung" zurückgeht (DEUTSCHER BUNDESTAG, 1998). Nach dem Modell sollen die drei Säulen "Ökonomie", "Ökologie" und "Soziales" gleichberechtigt und gemeinsam umgesetzt werden.

Im Jahr 2015 haben die Vereinten Nationen die Agenda 2030 verabschiedet, die 17 globale Nachhaltigkeitsziele (SDGs) enthält (UN, 2017). Ziel ist es, Armut zu bekämpfen, die Lebensverhältnisse zu verbessern und natürliche Ressourcen zu schützen. Die Ziele verknüpfen die drei Säulen der Nachhaltigkeit. 2019 stand fest, dass bei den gegenwärtigen Trends diese Ziele kaum erreicht werden, und daraufhin wurde die "Decade of Action" ausgerufen, um die Anstrengungen zu bündeln und zu beschleunigen. So wurden u. a. relevante Ziele der EU im Bereich Landwirtschaft nicht ausreichend verbessert, teilweise sogar verschlechtert (EU COM, 2021).

Auch wenn die globalen Nachhaltigkeitsziele rechtlich nicht bindend sind, bilden sie die Grundlage vieler politischer Initiativen auf europäischer Ebene:

- Die EU hat die nachhaltige Entwicklung wiederholt als Priorität erklärt (EU COM, 2020a) und formuliert im Green Deal das Ziel Europa bis 2050 zu einem klimaneutralen, quellenschonenden Kontinent mit einer modernen, ressourceneffizienten und wettbewerbsfähigen Wirtschaft zu machen (EU COM, 2019).
- Hinsichtlich der Landwirtschaft und Ernährung leitet sich die Farm-to-Fork-Strategie aus dem Green Deal ab. Darin wird das Ziel formuliert, die aus dem Pestizideinsatz resultierenden Risiken sowie die Nähstoffüberschüsse zu reduzieren und den ökologischen Landbau in Europa auszudehnen (EU COM, 2020b).

Der europäische Rahmen der Agrar- und Umweltpolitik ist von entscheidender Bedeutung für den nationalen und subnationalen Rahmen. Die Bundesregierung hat zur Umsetzung der globalen Nachhaltigkeitsziele die Deutsche Nachhaltigkeitsstrategie entwickelt (DIE BUNDESREGIERUNG, 2018; 2021) und kürzlich zentrale Transformationsbereiche benannt, wovon einer der nachhaltige Agrar- und Ernährungsbereich ist.

Ziel im Bereich der nachhaltigen Agrar- und Ernährungswirtschaft ist es, wettbewerbsfähig gesunderhaltende Lebensmittel zu produzieren und dabei die natürlichen Ressourcen zu schonen,

¹ https://www.un.org/sustainabledevelopment/decade-of-action/

tiergerecht zu sein, die biologische Vielfalt zu erhalten bzw. zu fördern und zur Erreichung der international und national vereinbarten Umwelt-, Natur- und Klimaschutzziele beizutragen. Der BMEL-Nachhaltigkeitsbericht (BMEL, 2021) verweist u. a. auf die Ackerbaustrategie, in der Perspektiven für die weitere Entwicklung des Pflanzenbaus aufgezeigt werden.

Eine nachhaltige Pflanzenproduktion, als Teil einer Gesamtstrategie, muss globale Ernährungssicherung, Gesundheit für den Verbraucher, fairen und freien Handel, adäquate Einkommen sowie Schutz und Erhalt von natürlichen Ressourcen entsprechend gesamtheitlich in den Blick nehmen. Der Mix aus Nachhaltigkeitszielen im sozialen, ökonomischen und ökologischen Bereich soll sicherstellen, dass es zu keiner einseitigen Entwicklung kommt oder Ziele aus den Augen verloren gehen.

Für die Erreichung gemeinsamer Nachhaltigkeitsziele spielt grundsätzlich der technische Fortschritt im Anbausystem und in der Züchtung eine bedeutende Rolle. Mit weniger Ressourcen soll effizienter und mehr produziert werden, Umwelteffekte vermieden bzw. reduziert und die Nahrungsmittelversorgung sichergestellt werden (nachhaltige Intensivierung). Eine nachhaltige Intensivierung ist nicht von einer klimaangepassten Pflanzenproduktion zu trennen (CAMPBELL et al., 2014). Die dabei eingesetzten Techniken müssen auch dazu beitragen, ökonomische Erträge zu sichern, damit es zu einer Anwendung und Ausbreitung kommt.

Eine wissens- und technologiebasierte Weiterentwicklung von Anbausystemen und die Nutzung von neuen Züchtungstechniken unterstützen die Nachhaltigkeit in der Pflanzenproduktion. Der vorliegende Bericht fokussiert sich auf Maßnahmen, die Landwirten potenziell zur Verfügung stehen (Sortenwahl, Anbautechnik und -management). Im globalen Kontext dürfen allerdings andere Bereiche, wie Ressourceneffizienz oder Marktversagen, nicht vernachlässigt werden.

1.2 Neue molekularbiologische Techniken – Genomeditierung - Gentechnik

Seit Ende der 90er Jahre hat sich die "klassische Gentechnik" in der Pflanzenzüchtung etabliert. Dabei werden Gene mittels Genfähren (Bakterien, Viren) oder per Partikelbeschuss an nicht vorherbestimmbarer Stelle in das Erbgut eingebaut. Die so erzielte spezifische Modifikation wird als "Event" bezeichnet, welches in Folge durch klassische Kreuzungszüchtung in verschiedene Sortenhintergründe eingebracht wird. Die Herkunft der übertragenen Gene spielt technisch keine Rolle, sodass Eigenschaften in Kulturpflanzen realisiert werden können, die nicht im Genpool der Art vorhanden sind (z. B. Resistenzen gegen Schadinsekten). Allerdings erfordert der ungerichtete Einbau, der u. U. funktionelle Gene der Pflanze zerstören kann, einen entsprechenden Selektionsaufwand (Kosten, Zeit) im Züchtungsprozess.

International weitreichend etabliert haben sich gentechnische Verfahren i. W. an flächen- und umsatzmäßig wichtigen Kulturpflanzen – insbesondere Soja (ca. 75 % Flächenanteil), Mais (ca. 30 %), Baumwolle (ca. 80 %) und Raps (ca. 25 %). Wesentliche Merkmale sind Schädlingsresistenzen (i.W. Bt-Proteine gegen Insekten) und Herbizidtoleranzen (i.W. Glyphosat). Aktuell werden in diesen Bereichen auch "neue" Events entwickelt und vermarktet (Aktuelle Statistik s. www.isaaa.org). In Europa sind verschiedene Events als Futtermittel und außerhalb des Lebensmittelsektors (z. B. Baumwolle) zugelassen. Derzeit wird nur ein Event, der Maiszünsler-resistente Bt-Mais MON810, in Europa begrenzt angebaut (i. W. Spanien). Schädlings- und Krankheitsresistenzen werden zukünftig auch durch RNAi-Events vermittelt. Gentechnik findet neben den genannten bei einer Reihe von weiteren Kulturpflanzen Anwendung, allerdings mit vergleichsweise geringem internationalem Marktumfang.

Seit der Etablierung der CRISPR/Cas Verfahren nach 2012 erleben die NMT rasche Verbreitung in der Pflanzenzüchtung (Modrzejewski et al., 2019). Sie bieten im Gegensatz zur klassischen Gentechnik und

der klassischen Mutagenese die Möglichkeit, gewünschte Veränderungen mit hoher Präzision rasch an vorherbestimmter Stelle im Genom vergleichsweise kostengünstig vorzunehmen. Allerdings bauen die Verfahren auf Zellkulturtechniken auf, die sich bisher nicht für alle Kulturpflanzen erfolgreich realisieren lassen. Trotzdem wurden innerhalb der letzten neun Jahre 40 Kulturpflanzenarten bezüglich verschiedener relevanter Merkmale erfolgreich durch NMTs bearbeitet.

Der Begriff NMT fasst verschiedene biotechnologische Methoden zusammen. Neben der Genomeditierung (gerichtete Änderungen in der Nukleotidsequenz des Erbguts) und der Cisgenese (Einbringen arteigener Gene in das Genom) zählen zu den NMT eine Reihe weiterer Verfahren, die nicht zwangsläufig zu Sequenzänderungen führen (z. B. epigenetische Modifikationen).

Im Speziellen sind derzeit die Verfahren der Genomeditierung (gezielten Mutagenese) diejenigen, die unter den NMTs am häufigsten genutzt und praxisnah angewendet werden. Einige dieser Verfahren bringen - anders als die klassische Gentechnik - keine neuen Gene oder Gensequenzen in Pflanzen ein, sondern verändern das vorhandene Erbgut an definierten Stellen. Unter dem Stichwort Genomeditierung lassen sich im Kern fünf neue molekularbiologische Verfahren zusammenfassen. Sequenz gerichtete Nukleasen (SDN) sind die am häufigsten genutzten Verfahren der Genomeditierung. Hiervon gibt es im Moment vier verschiedene, die eine ähnliche Vorgehensweise haben: Eine Komponente erkennt die zu verändernde Erbgutsequenz, während eine zweite das Erbgut an dieser Stelle schneidet. Meganukleasen und Zink-Finger-Nukleasen (ZFN) werden in der Pflanzenzüchtung nur noch sehr selten angewendet. Zurzeit bestimmen Transcription activator like effector Nukleasen (TALENs) und die am häufigsten genutzten CRISPR-Systeme die Anwendung in der Pflanzenzüchtung (MENZ et al., 2020). Anders als Meganukleasen, TALENs und ZFN nutzen CRISPR-Systeme zur Erkennung der zu verändernden Nukleinsäure Sequenz ein kurzes RNA-Molekül. Dies macht das System einfacher, flexibler und durch den einfachen Aufbau auch kostengünstiger. Neben den vier SDN-Verfahren spielt als fünftes die "Oligonukleotid gerichtete Mutagenese" (ODM) eine eher untergeordnete Rolle. Diese nutzt einen Nukleinsäureabschnitt als Vorlage, um an einer definierten Stelle eine Mutation im Erbgut zu induzieren. Die Besonderheit hierbei ist, dass die genomische DNA nicht geschnitten wird.

Mit all diesen Verfahren können gezielt Mutationen an einzelnen Erbgutbausteinen herbeigeführt werden. Die Funktionsweise dieser Techniken lässt sich gut in drei Schritten beschreiben: (1) Es werden "molekulare Lotsen" genutzt (DNA-, RNA-Abschnitte oder Proteine), welche gezielt die zu verändernde Erbgutsequenz erkennen. (2) Spezielle Proteine werden von den Lotsen an die gewünschte Schnittstelle geführt. Die zu verändernde Sequenz wird von diesen dort geschnitten/modifiziert. (3) Der Schnitt wird durch natürliche, zelleigene Systeme repariert.

Die zelleigenen Reparatursysteme beheben normalerweise Fehler, die beim Kopieren von Erbinformationen oder bei Beschädigung der DNA in den Zellen auftreten. Sie arbeiten allerdings nicht immer fehlerfrei: So können einzelne oder kleinere Baustein-Sequenzen des Erbguts ausgeschnitten, modifiziert oder eingefügt werden. Auf diese Weise entstehen natürliche Mutationen. Im Vergleich zur Mutationszüchtung (oder natürlichen Mutationen) erfolgen die Änderungen bei der Genomeditierung aber nicht zufällig, sondern vermittelt durch die "Lotsen" an definierten Stellen.

Da Genomeditierung i.d.R. keinerlei Spuren (wie techniktypische Sequenzmarker) im Zielgenom hinterlässt, ist eine Identifizierung des Verfahrens, mit dem eine Mutation erzeugt wurde, nicht möglich (GROHMANN et al., 2019; EUROPEAN NETWORK OF GMO LABORATORIES (ENGL), 2019).

Unabhängig davon, welche Nuklease verwendet wird, kann man bei dem Verfahren der Sequenz gerichteten Nukleasen drei Hauptstufen unterscheiden:

SDN-1: Bei der Reparatur des DNA-Doppelstrangbruchs wird das zelleigene Reparatursystem nicht beeinflusst. Bei der Reparatur können auf Grund der natürlichen Fehlerrate an dieser Stelle zufällige Mutationen entstehen.

SDN-2: Für die Reparatur des Bruches werden dem zelleigenen System kurze DNA-Abschnitte zur Verfügung gestellt, die zu den Schnittkanten der Sequenz passen. Das natürliche Reparatursystem nutzt diese als Vorlage, um den Bruch zu schließen. Dadurch können an der spezifischen Stelle vorbestimmte Modifikationen von wenigen Basen erzeugt werden.

SDN-3: Für die Reparatur des Bruches werden dem zelleigenen System lange DNA-Abschnitte oder komplette Gene zur Verfügung gestellt, auch passen die Enden dieser Abschnitte zu den Schnittkanten der geschnittenen Sequenz. Diese Sequenzen können dann durch das zelleigene System in den Schnitt kopiert werden. Diese Technik ist der klassischen Transgenese sehr ähnlich mit dem Unterschied, dass die Erbsequenz an einer definierten Stelle in das Erbgut integriert werden kann. Diese Technik kann z. B. dazu genutzt werden, Cisgenese zu ermöglichen.

Insgesamt ist die Verfahrensentwicklung noch nicht abgeschlossen und Optimierungen sowie verschiedene Anwendungsmodifikationen werden laufend veröffentlicht. Der Großteil der praxisnahen Anwendung in der Züchtung nutzt derzeit SDN-1-Verfahren (~95 %). Es wurden mittlerweile mehr als 40 Kulturpflanzenarten mit mehr als 140 Anwendungen bearbeitet (Reviews von Menz et al., 2020; Broothaerts et al., 2021). Zwei inhaltstoffmodifizierte Pflanzen (Soja, Tomate) werden derzeit bereits vermarktet, mehrere Merkmale befinden sich bei verschiedenen Pflanzenarten in der züchterischen Entwicklung und werden in den nächsten 5 Jahren den Markt erreichen (JORASCH, 2020; Parisi & Rodriguez-Cerezo, 2021).

2. Herausforderungen und Maßnahmen der nachhaltigen Pflanzenproduktion

2.1 Zusammenfassung Herausforderungen und Maßnahmen

weniger Fläche zur Kompensation von Ertragsminderungen verfügbar ist.

Die Herausforderungen an eine nachhaltige Pflanzenproduktion im Hinblick auf Klimaschutz und -anpassung, Schutz der Biodiversität, die Substitution von chemischen Pflanzenschutz- und Düngemitteln, Förderung der Bodenstruktur und darüber hinaus an die Ertragssicherung bzw. die Flächennutzungseffizienz zeichnen sich durch ihre Gleichzeitigkeit aus. Während die klimatische Dynamik sich einer schnellen Steuerung durch menschliche Maßnahmen entzieht und daher mittelfristig als unabwendbar angesehen werden muss, gibt es für die anderen Bereiche kurzfristige steuernde politische/sozioökonomische und wissenschaftliche Einflussmöglichkeiten, die die Rahmenbedingungen für die Pflanzenproduktion gestalten können (z. B. die gemeinsame Agrarpolitik). Es ist zu erwarten, dass sich die klimatischen Bedingungen weiter verschärfen (DWD, 2020). Dies stellt bei gleichzeitig angestrebter Reduktion der Anwendung chemischer Pflanzenschutzmittel und der Verminderung von Nährstoffeinträgen durch Düngemittel eine erhebliche Herausforderung an eine bedarfsdeckende Pflanzenproduktion dar. Dieses Problem wird weiter verschärft, da die

Der Pflanzenproduktion stehen verschiedene Maßnahmenoptionen bzw. Werkzeuge zur Verfügung (vorhandene und in der Entwicklung befindliche), um den genannten Herausforderungen zu begegnen. Solche Maßnahmen können technisch/methodisch sein (z. B. Bewässerungssysteme), das Anbaumanagement betreffen (z. B. erweiterte Fruchtfolgen) oder über die Sortenwahl auf züchterischen Fortschritt zurückgreifen (z. B. Krankheitsresistenzen). In der Pflanzenzüchtung eröffnen die klassische Gentechnik wie auch die NMT (BROOTHAERTS et al., 2021) Optionen, die Züchtungsziele schneller zu realisieren und somit auch das Kulturarten- und Sortenportfolio zu erweitern (s. Tabelle 2.1). Die Nutzung und explizit die Kombination der verschiedenen Maßnahmen bietet ein hohes synergistisches Potenzial für die Pflanzenproduktion.

landwirtschaftlich genutzte Fläche in Deutschland und international seit 2000 schrumpft² und somit

In der landwirtschaftlichen Praxis sind lokale Standortfaktoren von unmittelbarer Bedeutung und regional angepasste Anbaustrategien notwendig. Diese werden jedoch in der Züchtung heute im Allgemeinen nicht umfassend berücksichtigt. In Deutschland wurden 53 sogenannte "Boden-Klima-Räume" (BKR) identifiziert, die die unterschiedlichen Einflüsse von Bodengüte und Klima berücksichtigen (ROßberg et al., 2007).

Unter dem Aspekt der Förderung der Nachhaltigkeit sind die Maßnahmenoptionen an die jeweiligen Kulturarten und Standorte gebunden und stellen keine einfachen, beliebigen und quantitativ gleichwertigen Alternativen zu herkömmlichen Produktionsverfahren oder zueinander dar. Darüber hinaus können unterschiedliche Maßnahmen kontrastierende Effekte hervorrufen (z. B. Beregnung ~ Pflanzenschutz ~ Wasserverbrauch). Auch die zeitgerechte Verfügbarkeit spielt für die Planung eine

https://de.statista.com/statistik/daten/studie/1196555/umfrage/anbauflaechen-und-weideflaechen-weltweit/#professional; Statista 2021

² 24.8.2021: https://www.umweltbundesamt.de/daten/flaeche-boden-land-oekosysteme/flaeche/struktur-der-flaechennutzung#die-wichtigsten-flachennutzungen; UBA 2020 und

wesentliche Rolle (Sortenanpassungen sind an die zeitlichen züchterischen Möglichkeiten seitens der Arten und Verfahren sowie der Zulassung geknüpft und so eher mittelfristige Optionen). Das Portfolio an Maßnahmen in Bezug auf eine bestimmte Herausforderung ist in Tabelle 2.2 zusammengestellt und der mögliche Beitrag zur Problemlösung allgemein klassifiziert.

Hinzu kommt, dass sowohl das Klima als auch die Sozioökonomie des Pflanzenbaus keine statischen Prozesse, sondern fortschreitende Entwicklungen und nur begrenzt steuerbar sind. Vor diesem Hintergrund spielt eine flexible Auswahl und zeitgerechte Fortentwicklung möglicher pflanzenbaulicher Maßnahmen eine wichtige Rolle. Hier kämen die zeitlichen Vorteile und Möglichkeiten der NMT sowie der klassischen Gentechnik zum Tragen (s. Tabelle 2.1).

Die klassische Gentechnik und die NMT sind an eine methodische Zugänglichkeit der zu bearbeitenden Pflanzen (*in-vitro-*Kulturen, Zellkulturen, Transformierbarkeit) und an weitreichende Informationen zu den merkmalsbestimmenden Gensequenzen bzw. zum Gesamtgenom gebunden. Nicht alle Pflanzenarten und alle Merkmale sind daher entsprechend methodisch schon "erreichbar". So ist eine Regeneration von Roggenpflanzen aus Zellkulturen heute kaum möglich, bei Wildarten stehen aktuell noch keine Sequenzdaten zur Verfügung.

Die genannten allgemeinen Herausforderungen werden in den Abschnitten 2.2 bis 2.5. detaillierter aufgeschlüsselt und einem Katalog an Maßnahmenoptionen der nachhaltigen Pflanzenproduktion gegenübergestellt. Dabei wurden die Maßnahmen nicht gegeneinander gewichtet, da sie komplementär zu verstehen und situationsgerecht zu bewerten bzw. einzusetzen sind. Es werden spezifische Aspekte/Situationen der acker- und gartenbaulichen Kulturen einschließlich Obst und Rebe dargestellt. Kapitel 2.6 thematisiert exemplarisch am Weizen die Vernetzung und Wechselwirkungen der verschiedenen Herausforderungen und Maßnahmen.

2.1.1 Anpassung an den Klimawandel

Der Klimawandel berührt die Pflanzenproduktion auf vielfache Weise: zunehmender Stress durch Hitze, Trockenheit, Extremwetter, Verschiebung und Variabilität der saisonalen Dynamik des Klimas und der pflanzlichen Entwicklungsphasen. Hinzu kommen Änderungen im Auftreten und der Bedeutung von Schädlingen und Krankheiten. Mit kulturartspezifischen, anbautechnischen Maßnahmen (z. B. Bewässerung, Untersaaten, pflugloser Anbau, Sortenwahl) sowie der Züchtung (z. B. Pflanzenarchitektur, Phänologie, Anpassung an abiotischen Stress, Schädlingsresistenzen) lassen sich verschiedenen Auswirkungen des Klimawandels begegnen. Die einzelnen möglichen Maßnahmen kompensieren die Klima- bzw. Wetterauswirkungen insbesondere bei Extremen jedoch nur teilweise und können auch zu sekundär negativen Effekten führen, wie z. B. Wasserverbrauch, Auftreten von Schädlingen oder Krankheiten usw. einschließlich Zusatzkosten. Je nach Kulturart hängt daher eine effiziente und nachhaltige Klimaanpassung des Anbaus von der Verfügbarkeit und Kombination verschiedener Ansätze ab. Aufgrund der hiermit verbundenen komplexen Genetik sehen sich züchterische Ansätze oft der Notwendigkeit zur Kombination von vielen Genomregionen im Rahmen konventioneller Züchtungsschritte gegenüber. Der Einsatz von Gentechnik und Genomeditierung kann Synergien bieten: Trotz der hochkomplexen Merkmalsinteraktion zeigen verschiedene Studien, dass die Modifikation von Einzelgenen, die für Schlüsselfunktionen kodieren, effektive Verbesserungen z. B. unter Trockenstress bewirken können (DOS REIS et al., 2018; MENZ et al., 2020). Insbesondere die Genomeditierung kann durch die gezielte Modifikation einzelner Gene schon im Rahmen der Forschung dazu beitragen, wesentliche züchterische Informationen zu Genfunktionen zu gewinnen. Einige Entwicklungen zur Trockentoleranz sind bereits fortgeschritten. Eine transgene Maissorte (MON 87460) mit verringerten Ertragsverlusten bei Trockenheit wird in den USA bereits vermarktet. Zudem widmen sich eine Reihe von Arbeiten zur Genomeditierung bei unterschiedlichen Kulturarten einer Anpassung der Pflanzenentwicklung und -architektur (=> "Escape-Strategien", s.u.). In Bezug auf Klimaauswirkungen greifen verschiedene treibende Faktoren und züchterische Anpassungsziele gerade auch zeitlich ineinander - so z. B. abiotischer Stress, biotischer Stress, Pflanzenarchitektur/morphologie und -entwicklung (XIE & ZHAO, 2019)

2.1.2 Nachhaltiger Pflanzenschutz

Durch einwandernde Schadorganismen und solche, die aufgrund der sich ändernden klimatischen Bedingungen wieder an Bedeutung gewinnen, sowie durch gesellschaftliche bzw. regulatorische Anforderungen und Hemmnisse, steht der Pflanzenschutz in den kommenden Jahren vor der Herausforderung, Ertrag und Qualität der pflanzenbaulichen Produkte weiterhin auf hohem Niveau zu sichern und gleichzeitig Anforderungen zum Schutz der Umwelt (Biodiversität, Boden, Grundwasser u. a.) gerecht zu werden. Die zur Verfügung stehenden chemischen Pflanzenschutzmittel und insbesondere ihre Anwendungsmengen sollen in den kommenden Jahren weiter beschränkt werden. Technische Maßnahmen wie ziel- und punktgenaue Applikation von Pflanzenschutzmitteln (Spotspraying; LATI et al., 2021) oder Prognosemodelle können hier helfen, die Anwendungsmengen deutlich zu reduzieren. Als Beispiel sei das Prognosemodell CERCBET³ genannt, das die Wahrscheinlichkeit des Erstauftretens der Zuckerrübenblattkrankheit Cercospora beticula sowie das Überschreiten der Bekämpfungsschwelle berechnet. Für einige Kulturarten und Regionen bzw. Anbausituationen wurde gezeigt, dass die Kombination technischer Maßnahmen mit Anbaumaßnahmen für den biologischen Pflanzenschutz (z.B. durch Blühstreifen) den Bedarf an chemischen Pflanzenschutzmitteln ebenfalls reduzieren kann (TSCHUMI et al., 2016; TOIVONEN et al., vollständige Substitution chemischer Pflanzenschutzmittel Flächenproduktivität ist jedoch mit den derzeitig verfügbaren Mitteln und Verfahren nicht erreichbar (SCIENTIFIC FORESIGHT UNIT, 2019). Ein neuer Ansatz sind RNAi-Spritzmittel basierend auf doppelsträngiger RNA (dsRNA), welche gezielt den jeweiligen Schaderregern angepasst werden können (und müssen), aber nicht für alle Schaderreger gleich geeignet sind. Erste Formulierungen sind international in verschiedenen Zulassungsverfahren.

Der Klimawandel und die damit assoziierten Probleme wie erhöhter Schädlingsdruck, aber auch neue biologische Stressfaktoren, stellen die Resistenzzüchtung vor große Herausforderungen. In den vergangenen dreißig Jahren konnten in vielen Kulturen erhebliche Erfolge erzielt werden, indem neue komplexe quantitative Resistenzen erschlossen und neue Resistenzgene (R-Gene) kartiert und Markergestützt genutzt wurden. Jedoch beschränkt sich eine Vielzahl dieser Erfolge auf die großen ackerbaulich genutzten Kulturen. Für viele Sonder- und kleinere Kulturen fehlt es an entsprechenden Züchtungsprogrammen und somit auch an einer geeigneten Anzahl resistenter Sorten. Auch kommt es in allen Kulturen immer wieder zu einer Brechung von Resistenzen insbesondere bei den klassischen R-Genen. Ein Trend, der sich in den letzten Jahren durch eine Vielzahl von Faktoren (z. B. breiter Einsatz einzelner R-Gene, klimabedingte Änderung der Populationsdynamik der Schaderreger) beschleunigt hat (SINGH, 2012). Auch steht der Züchtung immer weniger Zeit zur Verfügung, um auf neue Stressoren zu reagieren, da diese häufiger und schneller auftreten.

Die Kombination (Pyramidisierung) verschiedener R-Gene kann hier helfen, aber es kommt auch zum Durchbrechen solcher Resistenzen (SINGH, 2012). Die Pyramidisierung ist zudem zeitaufwendiger als die Nutzung einzelner Gene. Sogenannte Anfälligkeits- oder S-Gene (Suszeptibilitätsgene), die eine

_

³ http://www.zepp.info/component/content/article?id=52 (24.8.2021)

oftmals länger anhaltende Resistenz vermitteln, lassen sich in vielen Kulturen, insbesondere in polyploiden, nur schwer bearbeiten, da sie oft rezessiv vererbt werden, homozygot vorliegen müssen und ggf. auch phänotypische Nachteile für die Pflanzen haben können, was möglichst frühzeitig im Züchtungsansatz erkannt werden muss (VAN SCHIE & TAKKEN, 2014). Gegen einige Schaderreger, insbesondere tierische, konnten trotz jahrzehntelanger Forschung keine Resistenzen in den natürlichen Genpools identifiziert werden. Hier können die Gentechnik und die Genomeditierung Wege erweitern und eröffnen, bzw. zeitlich erheblich verkürzen, z. B. durch Pflanzen, die eine gezielte "innere" Abwehr tragen (wie Bt-Pflanzen). So hat die klassische Gentechnik international insbesondere für Maissorten mit Resistenzen gegen Insekten einen erheblichen Marktanteil gewonnen. Sowohl die Genomeditierung als auch die klassische Gentechnik wird mittlerweile bei vielen Kulturen gegen Schaderreger und Krankheiten eingesetzt bzw. erfolgreich getestet (PARISI & RODRÍGUEZ-CEREZO, 2021). Die Pyramidisierung verschiedener Resistenzen (R- und S-Gene) kann mittels Gentechnik und Genomeditierung schneller voranschreiten. Bei der Etablierung von S-Genen kann Genomeditierung erste Erfolge vorweisen: Beim Weizen konnte durch das Ausschalten des *mlo-*Gens auf allen Subgenomen eine Mehltauresistenz erzeugt werden (WANG et al., 2014), was über klassische Züchtung nur bedingt und aufwändiger möglich wäre (z. B. durch TILLING). Das Prinzip wurde auch auf weitere Kulturpflanzen übertragen (NEKRASOV et al., 2017).

Synergien im Pflanzenschutz (etwa eine breite Schutzwirkung) können sich aus der Kombination rascherer Sortenanpassung mittels Genomeditierung oder Gentechnik, z.B. in Kombination mit der Erfassung von Befallsdynamiken und unter Einsatz natürlicher Gegenspieler und geeigneter Anbaumaßnahmen, ergeben. Spielen verschiedene Schaderreger eine Rolle, ist der flexible Einsatz spezifischer Maßnahmen ein weiterer Vorteil.

2.1.3 Nachhaltige Nährstoffversorgung der Kulturpflanzen

Mit verschiedenen technischen und Anbaumaßnahmen, wie z. B. precision farming, kann die Menge an ausgebrachten organischen und anorganischen Düngemitteln reduziert und darüber hinaus auch wichtige Nährstoffe wie z. B. Phosphat zu einem hohen Grade recycelt werden (ВÖНМ et al., 2020). Die technischen und pflanzenbaulichen Methoden können zwar Nährstoffausträge, aber nicht den Nährstoffbedarf der Pflanze verringern. Komplementär lässt sich der Einsatz von Düngern mit der züchterischen Verbesserung der Nährstoffeffizienz sowie der Erweiterung der Fruchtfolge, z. B. mit Leguminosen, oder durch den Anbau in Mischkultur reduzieren. Wenn eine Pflanze weniger Nährstoffe benötigt, da sie die vorhandenen effizienter nutzt, kann eine gute Synergie mit den technischen Maßnahmen, z. B. lokal begrenzte Düngung (precision farming, spot farming), erreicht werden. Dies erhöht die Nachhaltigkeit des gesamten Systems. Die Züchtung von Pflanzen mit einer effizienteren Nährstoffnutzung lässt sich aufgrund komplexer Stoffwechselprozesse auch mit Gentechnik und Genomeditierung nur mittel- bis langfristig erreichen. Durch Einbringung von Genen, die die Nährstoffaneignung erhöhen, ist ein erheblicher Zeitgewinn im Vergleich zur konventionellen Züchtung gegeben (s. Tab 2.1). Noch eleganter und ebenfalls deutlich schneller als bei der konventionellen Züchtung lassen sich mit Genomeditierung kleinere Veränderungen in bestehenden Sorten durchführen, die dem Ziel nährstoffeffizienterer Pflanzen nahekommen. Als ein sehr gutes Beispiel kann hier der Austausch eines Allels von NRT1.1B aus Japonica-Reis durch Homologie gerichtete Reparatur mit dem effizienteren NRT1.1B aus Indica-Reis angeführt werden (Lı et al., 2018). Dieser Vorgang wäre prinzipiell auch durch konventionelle Züchtung möglich, würde aber erheblich mehr Zeit in Anspruch nehmen.

2.1.4 Sicherung der Ertragspotenziale

Verbesserungen des Ertragspotenzials, aber auch Transport- und Lagerfähigkeit sind kulturartspezifische Züchtungsziele (SHIPMAN et al., 2021). Technische Maßnahmen bieten begrenztes Potenzial, ertragsbeschränkende biologische Eigenschaften zu kompensieren bzw. aufzufangen. Der zeitliche Züchtungsaufwand ist insbesondere bei Dauerkulturen ein wesentlicher Faktor, der zeitnahen Problemlösungen entgegensteht. Soweit möglich werden zeitsparende Züchtungsverfahren für alle Kulturarten realisiert (z. B. gestützt auf Markeranalysen, Doppelhaploidtechnik). Gentechnische bzw. genomeditierende Eingriffe bieten weitere Möglichkeiten der zeitlichen Verkürzung des Züchtungsaufwandes für geeignete Kulturarten, die im Rahmen von einigen Jahren bis Jahrzehnten liegen. Insbesondere bei der Domestizierung "neuer" Kulturpflanzen, die die Modifikation mehrerer Schlüsselgene erfordert, und der Hybridzüchtung kommt der geringere Zeitaufwand zum Tragen. Für die in Deutschland relevanten Dauerkulturen Obst und Reben steht eine umfassendere Etablierung der Genomeditierung als Verfahren noch aus, während Ansätze unter Einsatz konventioneller Gentechnik in einigen Züchtungsschritten (Apfel – "Speed Breeding"; FLACHOWSKY et al., 2011) bereits erfolgreich erprobt, aber unter den gegebenen Bedingungen am europäischen Markt nicht etablierbar sind.

Wichtige ackerbauliche Kulturen sind hinsichtlich der Ertragsleistung unter verschiedenen Anbaubedingungen zwar weitreichend optimiert (z. B. Weizen: Voss-Fels et al., 2019), aber ebenso zukünftigen Herausforderungen und Ansprüchen anzupassen. Dabei sind Introgressionen zukünftig relevanter Gene bzw. Allele (z. B. Resistenzgene aus Wildarten) in Elitesorten bzw. Zuchtmaterial häufig problematisch, weil unerwünschte Eigenschaften mit vererbt werden und durch Rückkreuzungen eliminiert werden müssen (linkage drag). Gentechnische bzw. genomeditierende Eingriffe bieten - soweit in der Kulturart und für die Merkmale anwendbar - zeitliche Verkürzungen des Züchtungsaufwandes um mehrere Jahre durch Vermeidung von linkage drag.

Hinsichtlich der benannten Züchtungsziele werden transgene Produkte der bedeutenden Kulturarten weiterhin auf dem internationalen Markt eingeführt. In den nächsten 5 bis 10 Jahren werden genomeditierte Produkte folgen.

2.1.5 Zeitnahe Integration verschiedener Maßnahmen und Synergiepotenziale

Die drängenden Anpassungen an den Klimawandel und eine nachhaltige Produktion erfordern eine Kombination des Einsatzes von Anbau-, technischen und züchterischen Maßnahmen, um Synergien zu nutzen. Angesichts der Dringlichkeit, des Ausmaßes und der Komplexität der Herausforderungen für die Landwirtschaft können einzelne Maßnahmen im Allgemeinen nicht als Alternativen, sondern nur als komplementäre Werkzeuge im Sinne eines zu optimierenden Einsatzes gesehen werden.

In der Pflanzenzüchtung spielt der Zeitfaktor eine wesentliche Rolle. Mit modernen Züchtungsverfahren wie den NMT kann dem zum Teil begegnet werden. Die Verkürzung des Züchtungsaufwandes um Jahre und Jahrzehnte (Tabelle 2.1) eröffnet gleichzeitig Möglichkeiten, eine breitere Auswahl an Merkmalen zu bearbeiten. Der Gewinn liegt so in einer Flexibilisierung der Management-Optionen – gerade auch im Sinne einer nachhaltigen Intensivierung. Als zeitnah realisierbar erscheinen hier Nutzungen im Pflanzenschutz und einfache Merkmale der Klimaanpassung und Nährstoffeffizienz. Der Pathogenbefall an einer Pflanze kann durch Anbau und technische Maßnahmen (einschließlich biologischer Schädlingsbekämpfung) eingedämmt und durch züchterische Maßnahmen weiter vermindert werden. Die gleichen technischen/methodischen Maßnahmen angewandt auf Pflanzen, die toleranter oder resistenter gegen Pathogene sind, heben die erfolgreiche Pathogenabwehr auf ein höheres Niveau und ersparen so die Anwendung chemischer

Pflanzenschutzmittel im Sinne des integrierten Pflanzenschutzes. Auch hinsichtlich der Nährstoffeffizienz und Düngung können Anbau- und technische Maßnahmen den Einsatz von mineralischen und organischen Düngern bis zu einem gewissen Maß reduzieren. Pflanzen, die mit Hilfe der Züchtung nährstoffeffizienter geworden sind, benötigen weniger Dünger. Beide Maßnahmen zusammen ergeben einen hohen Synergieeffekt.

Neue synergistische Aspekte der Züchtung können sich in der Kombination mit (neuen) Anbauverfahren (wie beispielsweise dem Spot Farming, aber auch für Mischkulturen) ergeben, wo anbauspezifische Pflanzeneigenschaften (etwa für Gleichstandsaat oder Pflanzenwechselwirkungen) gezielt gefördert werden.

Neben dem unmittelbaren züchterischen Einsatz eröffnet die Genomeditierung (z. B. durch Ausschalten von Genen mit unbekannter Funktion) auch weitere Wege, Genfunktionen aufzuklären (ZHOU et al., 2019). Gerade bei komplexen Merkmalen z. B. im Bereich der Klimaanpassung und Nährstoffeffizienz können so für den Züchtungsprozess zentrale Informationen gewonnen und ggf. unmittelbar genutzt werden.

Wie bei allen züchterischen Bemühungen ist die Möglichkeit der Testung unter Feldbedingungen notwendig, um zu praktisch verwertbaren Aussagen zu kommen.

Explizite und umfassende systemare Untersuchungen mit Nutzung gentechnisch veränderter oder genomeditierter Pflanzen sind bisher nicht bekannt. Entsprechend allgemeinen Züchtungszielen bzw. gewünschten Eigenschaften können sich geeignete Pflanzen in verschiedene Anbausysteme einfügen. Gentechnik und Genomeditierung können im ökologischen Landbau aufgrund bestehender Vorgaben bisher nicht angewendet werden. Auf internationaler Ebene stehen genomeditierte Pflanzen am Anfang einer breiteren Markteinführung und Verwendung.

Tabelle 2.1: Zeitaufwand der Genomeditierung (SDN1, SDN2) und klassischer gentechnischer Ansätze im Vergleich zur klassischen Züchtung und in Bezug auf derzeit bearbeitete/bearbeitbare Kulturarten und Herausforderungen (Kap 2.3-5).

Anmerkungen:

- *) Zeitraum zum Übertragen eines neuen Merkmals in (eine) züchterisch verwertbare Linie(n); d. h. der reine Sortenaufbau und die Saatgutvermehrung bleiben ausgeklammert, da diese für alle Zuchtlinien ungefähr gleichbleiben.
- +) Genomeditierung: bedingt zugänglich; Problem durch Bildung von Chimären; transiente Verfahren wenig bis gar nicht effektiv, Auskreuzung notwendig, dadurch Veränderung des Genotyps FB) Fast Breeding: mit Auskreuzung des Transgens (es liegen 0-Seggregaten vor)

Graue Felder = keine Daten verfügbar; leere Felder = Daten liegen z. Z. noch nicht vor; "-" = z. Z. methodisch nicht erfolgreich bearbeitbar; X = vorhanden.

Table 2.1: Time required for genome editing (SDN1, SDN2) and classical genetic engineering approaches compared to classical breeding and in relation to crop types and challenges currently being worked on/edited (Section 2.3-5).

Notes

- *) Time period to transfer a new trait into (a) breedable line(s); i.e. variety establishment and seed multiplication are excluded as these remain approximately the same for all breeding lines.
- +) Genome editing: conditionally accessible; problem due to formation of chimeras; transient procedures are little to not at all effective, outcrossing necessary, thereby changing the genotype. FB) Fast Breeding: with outcrossing of the transgene (0-segregants).

Gray fields = no data; empty fields = data currently not available; "-" = currently methodologically not successful; X = available.

Art	Referenz- genom	Klassische Züchtung	Molekulare Techniken der Pflanzenzüchtung (T= nur Transgenese/klass. GVO)												
		Zeitaufwand* (Jahre)	Zugänglichkeit	Zeitaufwand* (Jahre)	Klima	Pflanzen- schutz	Nährstoff- effizienz	Opt. Ertrag/Anbau/ Ernte/Zucht							
Getreide															
Weizen	Х	8-15	Х	2 - 3	Х	Х	Х	Х							
Gerste	Х	6-15	Х	2 - 3	T	Х	Т								
Roggen	Х	8-15; << Hybrid +	-	-	-	-	-	-							
Mais	Х	6-12	Х	2 - 3	Х	Х	Х	Х							
Hackfrüchte															
Zuckerrübe	Х	8-15	X	(3 - 4)		Т									
Kartoffel	Х		X	3 - 4	Х	Х		Х							
Ölfrüchte															
Raps	Х	8-20	Х	2 - 3		Х	Т	X							

Art	Referenz- genom	Klassische Züchtung	assische Züchtung Molekulare Techniken der Pflanzenzüchtung (T= nur Transgenese/klass. GVO)													
		Zeitaufwand* (Jahre)	Zugänglichkeit	Zeitaufwand* (Jahre)	Klima	Pflanzen- schutz	Nährstoff- effizienz	Opt. Ertrag/Anbau/ Ernte/Zucht								
Hülsenfrüchte																
Erbse	Х	3-6	X	2 - 3		Т										
Soja	Х		X	2 - 3	Х	Х		Х								
Lupine	Х		(X)													
Wein	Х	10-20	Х	2 - 3		Х										
Obst																
Apfel	х	20-40	T, x ⁺	2-3 ; T/FB: 8- 11		T, FB		Т								
Birne	Х	20-40	T, x ⁺	2-3		T, FB										
Süßkirsche	Х	15-30	Т	-	-	Т	-	-								
Sauerkirsche	(X)	15-30	-	-	-	-	-	-								
Erdbeere	Х	15-20	T, x ⁺	1-2				Т								
Himbeere	(X)	15-20	T, x ⁺	2+?		Т		Т								
Pflaume	Х	15-20	T, x ⁺	3+?	T	T, FB										

Art	Referenz- genom	Klassische Züchtung	Molekulare Techniken der Pflanzenzüchtung (T= nur Transgenese/klass. GVO)												
		Zeitaufwand* (Jahre)	Zugänglichkeit	Zeitaufwand* (Jahre)	Klima	Pflanzen- schutz	Nährstoff- effizienz	Opt. Ertrag/Anbau/ Ernte/Zucht							
Gemüse															
Spargel	Х	10-15	Х	4+?											
Karotte	Х	8-10	X	2-3	Х	X									
Zwiebel	Х	8-10	X	2-3		X									
Kohl	(X)	8-10	Х	2		Х		Х							
Tomate	Х	3-6	Х	2-3		X		Х							
Gurke	Х	3-6	Х	2-3	Х	Х									
Bohne	Х	3-6	Х	2-3	Х	Х									
Salat	Х	3-6	Х	2		X									

Tabelle 2.2: Vergleichende Darstellung wesentlicher Herausforderungen und komplementärer Maßnahmen einer nachhaltigeren Pflanzenproduktion im Freiland. Wirkung im Sinne einer nachhaltigen Pflanzenproduktion: + positiv/unterstützend, o neutral, - negativ, ? unklar und "graue Felder" nicht zutreffend/irrelevant. "Biodiversität" wurde nicht explizit aufgeführt, da alle Herausforderungen Aspekte der Biodiversität und der Nachhaltigkeit adressieren.

Table 2.2: Comparison of essential challenges and complementary measures for a more sustainable plant production. Impact in terms of sustainability: + positive/supportive, o neutral, - negative, ? unclear and "gray fields" not applicable/irrelevant. "Biodiversity" was not explicitly listed, as all challenges address aspects of biodiversity and sustainability.

	Maßnahmen (Wirkung: + o - ?)																		
Anbaumaßnahmen							technische Maßnahmen								züchterische Maßnahmen				
Herausforderungen		Fruchtfolge	Sortenwahl	Bestandsführung (Aussaattermin,	Untersaaten/ Zwischenfrüchte	Blühstreifen/ Pufferstreifen	wendende Bodenbearbeitung	Mulch- Direktsaatverfahren	Bewässerung	Hagel-/ Sonnenschutznetze	mechanische Unkrautbekämpfung	biologischer Pflanzenschutz	Emissionsarme/abdriftfreie	Düngebedarfsermittlung/ Bodenproben	Prognosemodelle/ Schadschwellenkonzepte	Resistenzmonitoring	konventionelle Züchtung	transgene Ansätze	Genomeditierung (NMT)
	Trockenheit	+	+	+	0/-		-	0/+	+		-				0		+	+	+
Klima	Extrem- temperaturen	+/-	+	+	+	?	-	o/+	+	+	-				0		+	+	+
	Extremwetter- ereignisse	+	?		+	+	-	o/+		+	-				О				
	Reduktion chem. Pflanzenschutz	+	+	+	+/0	+/o	+	+/-	+/-		+	+	+		+	+	+/0	+	+/0
Pflanzenschutz	Förderung biolog. Pflanzenschutz	+	+	+	+/0	+	0/-	?			?	+	+		?	?	+/0	+	+/0
Pflanzenschutz	Vermeidung Resistenzentwicklung	+	+	+/0		?	+	0/-			+	+/-			+	+	+/-	+/-	+/-
	Neue Schadorganismen	+/0	+/0	+/0	?	?	?	?			?	+			+		+/0	+	+/0

	Maßna	hmen (Wirkur	ng: + o	- ?)													
			Anbaumaßnahmen							technische Maßnahmen								züchterische Maßnahmen	
Herausforderungen		Fruchtfolge	Sortenwahl	Bestandsführung (Aussaattermin,	Untersaaten/ Zwischenfrüchte	Blühstreifen/ Pufferstreifen	wendende	Mulch- und Direktsaatverfahren	Bewässerung	Hagel-/ Sonnenschutznetze	mechanische Unkrautbekämpfung	biologischer Pflanzenschutz	Emissionsarme/abdriftfreie Ausbringung	Düngebedarfsermittlung/ Bodenproben	Prognosemodelle/ Schadschwellenkonzepte	Resistenzmonitoring	konventionelle Züchtung	transgene Ansätze	Genomeditierung (NMT)
	Reduktion Düngung und des Nährstoffaustrags	+	+	?	+		0	+/0	-		?		+	+	+		+	+	+
Nährstoffeffizienz	Steigerung Humusgehalt	+	0		+		-	+	?		?								
	Vermeidung Erosion	+	?	+/-	+	+	-	+	?		?				?				
	Domestizierung																+		+
Ertragspotenziale	unmittelbare Ertragseigenschaften		All	e Maßr	nahmen	dienei	n direk	t oder i	ndirek	t der Erti	ragsoptii	mierun	g/-sich	erung; s	5.0.	•	+	+	+
Litiagspotenziale	Reduktion Ernte-/ Nachernteverluste			Pfl	anzenso	hutzm	aßnah	men, s.o	o.; Ern	tetechnil	ken nich	t aufge	schlüss	elt.			+	+	+
	Hybridzüchtung																+	+	+

2.2 Anpassung an den Klimawandel

Die Kulturpflanzenproduktion muss sich in Zukunft noch stärker auf sich verändernde Klimabedingungen, wie höhere Temperaturen, veränderte Niederschlagsverteilungen sowie häufigere und intensivere Extremwetterlagen und –ereignisse, einstellen (DWD, 2020). Es wurden Anzeichen für eine Veränderung des für das europäische Klima so wichtigen Golfstromes beobachtet (CAESAR et al., 2021). Welche Wetterdynamik regional mittelfristig zu erwarten ist, lässt sich bisher nicht quantitativ vorhersagen. Wie das Jahr 2018 mit extremer Trockenheit gezeigt hat, sind lokal je nach Kulturart auch Ertragsverluste über 50 % (gegenüber dreijährigem Mittel) nicht auszuschließen (s. Praktikerbefragung Abb. 2.1).

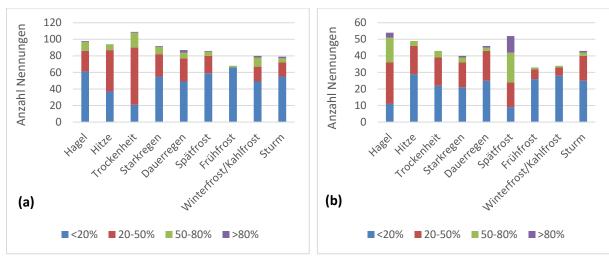


Abbildung 2.1: Schätzung der Ertragsverluste durch aufgetretene Extremwetterereignisse und -lagen im Ackerbau (a) und Obstbau (b). Ergebnisse einer Befragung von Anbauern; Befragungszeitraum 18.01.-31.12.2018, n=120 (a), n=70 (b). [Unveröffentlichte Auswertung des Projekts Entwicklung eines Extremwettermonitorings und Risikoabschätzungssystems zur Bereitstellung von Entscheidungshilfen im Extremwettermanagement der Landwirtschaft (EMRA), FKZ (BMEL/BLE): 2815707715, KRENGEL-HORNEY et. al, 2021]

Figure 2.1: Estimation of yield losses due to extreme weather events in arable farming (a) and orchards (b). Results of a survey with growers; survey period Jan 18 - Dec. 31, 2018, n=120 (a), n=70 (b). [Unpublished evaluation of the project Development of an extreme weather monitoring and risk assessment system to provide decision support in extreme weather management in agriculture (EMRA), FKZ (BMEL/BLE): 2815707715, KRENGEL-HORNEY et. al, 2021]

Zu den allgemein zu erwartenden Herausforderungen gehören unter anderem häufigere Dürreperioden, verursacht durch geringere Niederschläge in den Frühjahrs- und Sommermonaten, sowie Hitzestress in den Sommermonaten (LÜTTGER & FEIKE, 2018). Steigende Herbst- und Winterniederschläge begünstigen dagegen Staunässe auf den Ackerflächen, sodass die Bearbeitungszeiträume für Kulturmaßnahmen angepasst werden müssen. Schutz vor plötzlichen und unvorhersehbaren Extremwetterereignissen wie Stürmen, Starkregen oder Hagel ist im Freiland-Pflanzenbau so gut wie nicht möglich. Neben Ertragseinbußen bis hin zu vollständigen Ertragsausfällen durch zunehmende Wetterextreme werden für einzelne Regionen und für einige ("neue") Kulturarten durch Klimawandel ertragsfördernde Teileffekte, beispielsweise durch Vegetationsperioden, höhere Temperaturen und steigende CO₂-Konzentrationen in der Atmosphäre, erwartet (AINSWORTH & LONG, 2021).

Während die Anpassungsfähigkeit annueller Kulturen an klimatische Veränderungen bisher grundsätzlich mittelfristig gegeben war, ist dies im Obst- und Weinbau ein langfristiger (>10 Jahre) und komplexer Prozess. Zum einen weisen diese Dauerkulturen eine durchschnittliche Standzeit von etwa 15-20 Jahren auf. Zum anderen ist die Anpassungsfähigkeit im Obst- und Weinbau auch durch das Marktverhalten eingeschränkt. Die Verbraucher bevorzugen ihnen bekannte Sorten, was einen kurzbis mittelfristigen Wechsel zu resistenteren bzw. toleranteren Sorten zur Bekämpfung akuter Probleme erschwert. Es bestehen züchterische Lösungsansätze für die genannten Herausforderungen im Obst- und Weinbau, jedoch erschwert die lange Dauer der Etablierung neuer Sorten (ca. 25 Jahre) eine schnelle Reaktion.

Im Folgenden werden spezifische Herausforderungen im Zusammenhang mit dem fortschreitenden Klimawandel und im Weiteren die Anpassungsoptionen hinsichtlich der Züchtung mit und ohne gentechnische oder genomeditierende Methoden, technische Maßnahmen sowie Anbauverfahren vorgestellt.

<u>Trockenheit / Trockenstress</u>

Während die Gesamtjahresniederschläge entsprechend der prognostizierten klimatischen Veränderung tendenziell eher zunehmen werden, nehmen die Niederschlagsmengen in den Frühjahrsund Sommermonaten voraussichtlich ab (DWD, 2020). Diese veränderte Niederschlagsverteilung und die damit einhergehende Zunahme von Häufigkeit und Intensität von Trockenstressperioden und ggf. Extremwetterereignissen stellt eine besondere Herausforderung für Kulturpflanzen dar. Dies zeigte sich bereits in den Trockenjahren 2018 und 2019 durch entsprechende Ertragsauswirkungen besonders im Obst- und Weinbau (Abb. 2.1). Trockenstress wirkt sich besonders negativ in Entwicklungsphasen aus, in denen wichtige Ertragskomponenten gebildet werden (EHLERS & GOSS, 2016; SAMARAH et al., 2009; HLAVÁČOVÁ et al., 2017; BISBIS et al., 2019). Zudem ist durch vermehrte Trockenperioden und verringerte Wasseraufnahme die Nährstoffversorgung der Kulturpflanzen beeinträchtigt. Betroffen sind alle Pflanzenarten, insbesondere Kulturen mit einem hohen Wasserbedarf (hoher Transpirationskoeffizient) und einer geringen Wassernutzungseffizienz (MATRES et al., 2021).

Trockenstresseffekte hängen stark vom Entwicklungsstand der Kulturpflanzen zum Zeitpunkt des Trockenstresses ab (HLAVÁČOVÁ et al., 2017). So können Eigenschaften, die positiv mit Trockenstresstoleranz in der Jugendphase einhergehen, bei späterem Trockenstress gegenteilige Effekte zeigen. Trockenstresstoleranz kann nicht als ein abgegrenztes Merkmal verstanden werden, sondern bildet ein vielschichtiges Gefüge von Einzelmerkmalen. Je nach konkreter Stresssituation erlangen dabei unterschiedliche – z. T. antagonistisch wirkende – phänologische/morphologische, physiologische oder biochemische Eigenschaften der Kulturarten an Relevanz.

Extreme Temperaturen und mittlerer Temperaturanstieg

Seit Beginn des 20. Jahrhunderts, und besonders über die letzten Jahrzehnte, zeigte sich sowohl ein Anstieg der Durchschnittstemperaturen als auch eine Zunahme von Extremtemperaturen in Deutschland (DWD, 2020; LÜTTGER & FEIKE, 2018). Die Auswirkungen von Hitzestress auf Quantität und Qualität der Erntegüter hängt neben Dauer und Intensität maßgeblich vom Zeitpunkt des Auftretens ab. Als besonders sensitiv sind hier ebenfalls (s. o.) die für die Ertragsbildung relevanten Entwicklungsstadien wie zum Beispiel Blüte, Fruchtansatz und Fruchtentwicklung zu bewerten (z. B. AKSOUH et al., 2001; AKTER & ISLAM, 2017). Im Zusammenhang mit Hitze und starker Sonneneinstrahlung wurden in den vergangenen Jahren im Garten-, Obst- und Weinbau vermehrt Schäden durch

Sonnenbrand beobachtet. Die Schäden führten im Obstbau zu Verlusten in Höhe von 10 bis 40 % (Wang et al., 2020), und zogen erhebliche ökonomische Auswirkungen nach sich.

Steigende Temperaturen führen aufgrund steigender Transpirationsraten zu einem höheren Wasserverbrauch z. B. in Obst-, Wein- (z. B. Greer, 2012) und Ackerbau (z. B. Yang et al., 2012). Die erhöhte Transpiration erklärt auch, weshalb Hitzestress unter deutschen Anbaubedingungen zumeist in Kombination mit Trockenstress auftritt. Unter ausreichender Wasserversorgung und entsprechender Transpiration reduziert die Verdunstungskälte die Temperaturen im Pflanzenbestand signifikant. Im Gegensatz hierzu erwärmen sich trockengestresste Pflanzenbestände z. T. weit über die gemessene Lufttemperatur hinaus (Siebert et al., 2014).

Die beobachteten sortenspezifischen Unterschiede weisen auf Anpassungsmöglichkeiten hinsichtlich Sortenwahl und Züchtung hin.

Extremwetter

Extremwetterereignisse wie Kahlfrost, Sturm, Hagel oder Starkregen können innerhalb weniger Stunden oder gar Minuten zu massiven Schäden an landwirtschaftlichen Kulturen führen.

Nässe, Staunässe kann durch die vermehrten Herbst- und Winterniederschläge weiter zunehmen und hat Folgen für die Sauerstoffversorgung der Pflanzenwurzeln und der Bodenlebewesen. Ferner ergeben sich Implikationen für die Bodenbearbeitung, denn bei zu feuchtem Boden ist eine Bearbeitung nur mit hohem energetischem Aufwand möglich und es besteht die Gefahr von Bodenverdichtung. Wenn die Wasserhaltekapazität des Bodens überschritten wird, werden Nährstoffe durch Versickerung in tiefere Schichten verfrachtet und stehen den Pflanzenwurzeln nicht mehr zur Verfügung. Zudem fördert Staunässe den Befall der Wurzeln mit bodenbürtigen Pathogenen.

Starkregen kann bei Niederschlagssummen > 20 mm innerhalb kurzer Zeit zu erheblichen Schäden in Ackerkulturen (z. B. Lagerbildung) führen. Je nach Bodenart und Bodenfeuchte können die Wassermengen ggf. nicht vom Boden aufgenommen werden, und es kommt zu Bodenerosion. Lange Feuchteperioden können zudem das Risiko von Schäden durch biotische Stressoren erhöhen.

Hagel ist meist ein sehr lokales und kaum vorhersehbares Ereignis, das zu hohen wirtschaftlichen Schäden in allen Kulturarten führen kann.

Sturm kann im Pflanzenbau in verschiedenen Kulturen, vorrangig im Getreide, zu Lager führen, was quantitative und qualitative Ertragseinbußen nach sich ziehen kann.

Kahlfrost schadet insbesondere im Obst- und Weinbau vor allem in frühen Wachstumsstadien und während der Blüte sowie generell kälteempfindlichen Kulturen wie z. B. Mais.

Phänologische Verschiebung und Anpassung der Anbauzeiträume

Der kontinuierliche Temperaturanstieg führt tendenziell zu einer Veränderung der Vegetationsperiode in Deutschland. Zusätzlich beschleunigt sich die phänologische Entwicklung der Kulturpflanzen. Die schnellere Entwicklung lässt den Pflanzen weniger Zeit für Wachstum, Photosynthese und Einlagerung von Assimilaten, was grundsätzlich in negativem Zusammenhang mit hoher Ertragsleistung steht (NGUYEN-SY et al., 2019; Wu et al., 2019). Untersuchungen von langen Zeitreihen zeigen zudem, dass es aufgrund der stetigen Weiterentwicklung der Sorten und der permanenten Anpassung der landwirtschaftlichen Praxis an die klimatischen Veränderungen zu einer Vermischung der Effekte im Zusammenspiel von Sorte, Umwelt und Management kommt und man den reinen Klimaeffekt daher nur schwer unabhängig von anderen Faktoren bewerten kann (BÖNECKE et al., 2020).

Zudem führt die globale Erwärmung zu früheren Blühzeitpunkten in allen Kulturen. So blühen auch viele Baumobstarten heute 10 bis 14 Tage früher als noch vor 50 Jahren (LEGAVE et al., 2013). Die

Vorverlegung der Blüte erhöht jedoch in den deutschen Anbaugebieten die Wahrscheinlichkeit von Frostschäden durch Nachtfröste während der Blüte, was zum Teil zu erheblichen wirtschaftlichen Einbußen im Obstbau führt (DALHAUS et al., 2020). Im Weinbau können ein verfrühter Austrieb und ein darauffolgendes Spätfrostereignis sogar zu einem Komplettausfall der Ernte führen, wenn die jungen Triebe absterben.

Im Obst- und Weinbau hat die kalendarische Verschiebung der phänologischen Phasen bereits jetzt Auswirkungen auf Ertragsbildung und Vermarktung. Wärmere Temperaturen im Herbst beeinflussen Zeitpunkt und Verlauf der Fruchtreife, so dass in einigen Regionen rote Sorten bei Apfel und Birne nicht mehr richtig ausfärben, was zu Qualitätseinbußen führt. Spät reifende Sorten können dagegen auch in kühleren Regionen erfolgreich angebaut werden. Es ist zu erwarten, dass es in Folge der klimatischen Veränderungen auch zu Veränderungen im Sortenspektrum bzw. zu Verschiebungen der Anbauregionen kommt.

Erhöhter CO₂-Gehalt

Ein erhöhter CO₂-Gehalt in der Atmosphäre sollte sich erwartungsgemäß aufgrund des "CO₂-Düngeeffektes" positiv auf das Pflanzenwachstum auswirken. Die Photosyntheseleistung steigt, gleichzeitig ist die stomatäre Leitfähigkeit deutlich reduziert (AINSWORTH & ROGERS, 2007). In bisherigen Freilandversuchen mit CO₂-Anreicherung (Free Air Carbondioxide Enrichment - FACE) wurde bei C3-Pflanzen (u. a. Weizen, Gerste, Reis) beispielsweise ein mittlerer Zuwachs von 19 % an oberirdischer Biomasse festgestellt, wenn die CO₂-Konzentration um 200 ppm gegenüber der aktuell vorherrschenden CO₂-Konzentation erhöht wurde (KIMBALL, 2016). Nach den Berechnungen von SMITH & MYERS (2018) ist eine derartige zusätzliche Erhöhung erst in einigen Jahrzehnten zu erwarten. In diesem Zeitraum würden sich aber alle Klimafolgen ebenfalls verstärken. Auch neuere FACE-Studien (AINSWORTH & LONG, 2021) zeigten, dass sich die Ertragseffekte für verschiedene Umwelt(stress)bedingungen überlagern, so dass mittelfristig allenfalls marginale positive Effekte zu erwarten wären, die keinesfalls die Auswirkungen anderer Klimafaktoren wie Trockenheit kompensieren.

Im Folgenden werden Maßnahmen zur Anpassung an den fortschreitenden Klimawandel getrennt nach Züchtung, technischen Maßnahmen sowie Anbauverfahren betrachtet.

2.2.1 Züchterische Maßnahmen

Züchtungsbemühungen zur Klimaanpassung stehen der relativ komplexen Stressregulation der Pflanzen gegenüber (NGUYEN et al., 2018; SINGH et al., 2019; MATRES et al., 2021). Eine große Herausforderung besteht darin, dass vielversprechende Pflanzeneigenschaften im Hinblick auf die Klimaanpassung meist quantitative genetische Merkmale sind, die von einem Komplex verschiedener Gene kontrolliert werden. Züchterische Ansätze umfassen sowohl morphologische (z. B. Wurzelarchitektur) und phänologische (z. B. Blühzeitpunkt) als auch physiologische Eigenschaften (z. B. Regulation der Spaltöffnungen). Die Züchtung klimaresilienter Kulturpflanzen umfasst daher verschiedene Merkmale bzw. Zuchtziele – unabhängig von Züchtungsverfahren. CHÁVEZ-ARIAS et al. (2021) haben für Mais verschiedene Merkmale zusammengestellt, die im Zusammenhang mit Klimaveränderungen stehen, und die (potenzielle) Ziele züchterischer Bearbeitung darstellen (s. Abb. 2.2). Je nach den spezifischen regionalen Bedingungen und je nach Kulturart unterscheiden sich die ggf. anzupassenden Merkmalsausprägungen.

Anpassung von Maispflanzen an Trockenheit und Hitze

(n. Chávez-Arias et al. 2021)

"Escape"-Strategie

Vermeidung Wassermangel

"Toleranz"-Strategie

- Frühere Blüte
- Wasserverlust Frühere Reife
 - Regulation Spaltöffnung
 - Wasseraufnahme
 - tiefere Verwurzelung
 - Pflanzenarchitektur
 - Blattstellung
 - Blattrollen
 - · Wachsschicht der Blätter
- Osmoregulation
- Regulation von antioxidativen Enzymen
- Ausprägung spez. Stressproteine
- Regulation Genaktivitäten (Transkription)
- · Regulation der Pflanzenhormone

Abbildung 2.2: Beispiel-Optionen für physiologische Anpassungen von Maispflanzen an Hitze und Trockenheit mit Bezug zu Sortenwahl und Züchtung.

Figure 2.2: Example for physiological adaptations of maize plants to heat and drought with reference to variety selection and breeding.

Die Aussagekraft vieler züchterischer und genetischer Studien insbesondere zur Trockenstresstoleranz bleibt derzeit meist jedoch eingeschränkt oder unklar. Viele Studien wurden entweder nur an einzelnen Feldversuchen, nur in Topf- oder hydroponischen Versuchen im Gewächshaus oder in Klimakammern durchgeführt. Diese besonders artifiziellen Bedingungen erschweren die Übertragbarkeit der gewonnenen Erkenntnisse auf die landwirtschaftliche Praxis. Es ist daher wichtig zu hinterfragen, ob die betrachteten Einzelmerkmale nicht nur unter speziell definierten (Versuchs-) Szenarien eine erhöhte Trockenstresstoleranz ermöglichen, oder ob sich eine Merkmalsausprägung in einer angemessenen Anzahl von Szenarien als vorteilhaft erweist (TARDIEU et al., 2012). Dies bleibt bei vielen betrachteten Studien aus und bedarf weiterer Evaluierungen. Zudem werden die Erkenntnisse oft nur an Einzelgenotypen und/oder genetisch wenig adaptiertem Material erhoben (exotischen Diversitätssets, diverses Genbankmaterial). Für eine Übertragbarkeit der Erkenntnisse ist es allerdings entscheidend, dass die betrachteten Merkmale ihre leistungssteigernde Wirkung auch vor dem genetischen Hintergrund der Elitesorten zeigen.

2.2.1.1 Klassische Züchtung

Trockenheit / Trockenstress

Die Entwicklung trockenstresstoleranter Sorten durch konventionelle Züchtung fokussiert sich u. a. auf die Verbesserung der Wurzelarchitektur sowie die Identifizierung von QTLs (Quantitative Trait Loci = Sequenzbereiche des Genoms, die die Ausprägung eines quantitativen Merkmals beeinflussen bzw. einem Merkmal zuzuordnen sind), die im Zusammenhang mit erhöhter Trockenstresstoleranz stehen (Luo et al., 2019). Zudem bietet die sogenannte "Escape-Strategie" Anpassungsmöglichkeiten. Diese zielt darauf ab, ertragsrelevante Entwicklungsschritte vor (bzw. nach) Perioden mit erhöhtem Stressrisiko für Trockenheit und/oder Hitze abzuschließen. Die Kontrolle des Blühzeitpunkts ist u. a. bei den Getreidearten ein wichtiges Züchtungsziel. Die Verfrühung ist Teil der Escape-Strategie gegen Sommertrockenheit bzw. Hitzestress (SHAVRUKOV et al., 2017). So kann die Züchtung bestimmte Anbauregionen und deren spezifische klimatische Bedingungen berücksichtigen, z. B. durch die Züchtung von sehr frühen Sorten (ESHED & LIPPMAN, 2019). Hierbei ist jedoch stets eine Abwägung zwischen der Verminderung des Ertragsrisikos durch "Escape" in Trockenjahren und der damit ggf. einhergehenden Verringerung der Ausschöpfung des vollen Ertragspotenzials in guten Jahren notwendig.

Aufgrund der historischen Ausgangslage war Trockenstresstoleranz in der Vergangenheit kein vordergründiges Zuchtziel bei den Hauptkulturen in Deutschland. Dennoch kann man konstatieren, dass die aktuellen Sorten die best-angepassten Genotypen darstellen, die historisch verfügbar sind (z. B. LOEL et al., 2014; LAIDIG et al., 2017a, b; s. a. 2.5). Notwendige weitere Anpassungen der Fähigkeit, unter Trockenstress eine quantitative und qualitativ hohe Leistung zu erbringen, wird aber von einer Vielzahl von Einzelmerkmalen bestimmt, die jeweils für sich betrachtet nur einen marginalen Beitrag zum Erscheinungsbild beitragen (quantitativer Erbgang) (BERNARDO, 2008; HU et al., 2014). Die klassischen Züchtungsmethoden führten so nur über lange Zeiträume zu den entsprechenden Leistungssteigerungen und (immanenten) Anpassungen an Trockenperioden – in sämtlichen bedeutenden Kulturarten wie bspw. Weizen (CRESPO-HERRERA et al., 2018; FISCHER & EDMEADES, 2010; PELTONEN-SAINIO et al., 2009; SANCHEZ-GARCIA et al., 2012), Mais (BADU-APRAKU et al., 2016; CI et al., 2011; CAMPOS et al., 2006; DUVICK; 2005; RUSSELL, 1991), Raps (STAHL et al., 2017; 2019), Sojabohne (USTUN et al., 2001; RINCKER et al., 2014), Gerste (LAIDIG et al., 2017a), Zuckerrübe (LOEL et al., 2014) und Roggen (LAIDIG et al., 2017b). Der Ertragsfortschritt zeigt sich nicht nur unter günstigen Wachstumsbedingungen, sondern auch unter Trockenstress (DUVICK, 2005; COOPER et al., 2014) und bei geringerem Fungizideinsatz (BRISSON et al., 2010; Voss-FELS et al., 2019). Selbst wenn moderne Sorten je nach Umwelt eine verminderte Stabilität aufweisen, führt ihr überlegenes Ertragspotenzial zu einer höheren Ertragsleistung gegenüber älteren Sorten (CALDERINI & SLAFER, 1999). Die klassische Züchtung hat sehr viele "verdeckte" Merkmale rekombiniert, die sich in einem leistungsfähigeren Genotyp ausprägen. Allele, die unter mehreren Bedingungen negativ waren, wurden/werden somit ausselektiert. Die Verbesserung der Ertragsleistung durch Rekombination und strategisch günstige Selektion von unzähligen Genomregionen im Rahmen der konventionellen Züchtung bildet das Rückgrat für die Erstellung der an Trockenstress angepassten zukünftigen Sorten. Die konventionelle Züchtung wird dabei zunehmend durch die Nutzung von genomweiten Markern zur Steigerung der Selektionsgenauigkeit, des Selektionsdifferenzials und der Beschleunigung des Zuchtfortschrittes unterstützt (MEUWISSEN et al., 2001; HEFFNER et al., 2009).

Weitere Aspekte bieten die züchterische Anpassungen mit Bezug auf "Escape-Strategien" (früher blühende Sorten, frosttolerante Winterformen) und neue Anbausysteme bzw. Nutzungsarten etablierter Kulturarten, etwa in einem Gemenge- oder Zweitkulturanbau (WEHLING et al., 2017). Darüber hinaus bleibt es ein wichtiger Bestandteil, Potenziale genetischer Ressourcen zu erforschen und zu erhalten, da der Klimawandel ebenfalls den Fortbestand von Wildarten des primären, sekundären und tertiären Genpools unserer Kulturarten bedroht, die wiederum eine essentielle Ressource für die züchterische Anpassung dieser an den Klimawandel darstellen (HODGKIN & BORDONI, 2015). Dies gilt sowohl für den Ackerbau wie für den Obst-, Wein- und Gemüsebau.

Die Anpassung der Sorten an die sich stetig verändernden klimatischen Bedingungen ist im Obst- und Weinbau besonders zeitaufwändig und ist aufgrund der langen Standzeiten der Anlagen wesentlich langsamer als bei Ackerbaukulturen. Durch an Trockenheit angepasste Unterlagensorten, die momentan eher in Südeuropa verwendet werden, lässt sich die Trockenheit im Weinbau teilweise kompensieren, und auch die klassische Züchtung neuer Edelreis- und Unterlagensorten mit verstärkter Trockenresistenz sind Lösungsansätze für die Zukunft. Jedoch dauert es ca. 25 Jahre, bis eine neue Edelreissorte marktreif ist. Unterlagensorten werden normalerweise noch länger geprüft.

Extreme Temperaturen und mittlerer Temperaturanstieg

Viele der oben im Hinblick auf Züchtung gegen Trockenstress beschriebenen Aspekte und Zusammenhänge gelten ähnlich für Hitzestress.

Die Züchtung von Wechselgetreide mit hoher Flexibilität der Saatzeit ermöglicht, den klimawandelbedingten Risiken beim Anbau von Winterkulturen zu begegnen, wie Spätsommer- und Herbsttrockenheit sowie erhöhte Herbst- und Wintertemperaturen mit verstärkten Virusinfektionen. Für Weizen und Triticale wurden mit Hilfe konventioneller und markerbasierter Selektion bereits Sorten entwickelt, bei denen durch Kombination eines geringen Vernalisationsbedarfs und guter Winterhärte eine hohe Aussaatflexibilität gegeben ist (MEYER & SPANAKAKIS, 1998; JACOBI 2012).

Im Obst- und Weinbau ist es Ziel der klassischen Züchtung, möglichst sonnenbrandresistente Sorten zu züchten, um somit die Gefahr von Schäden zu minimieren. Erste Kandidatengene sind identifiziert. Die Funktion dieser Gene und der Mechanismen, in welche sie eingebunden sind, müssen weiter aufgeklärt werden. Eine praktische Anwendung dieses Wissens in der Züchtung ist in den nächsten 10-15 Jahren noch nicht zu erwarten.

Phänologische Verschiebung und Anpassung der Anbauzeiträume

Um der Gefahr von Spätfrösten zu begegnen, konzentrieren sich die Arbeiten der Obstzüchtung auf eine Verlegung der Zeitpunkte der Brechung der Endodormanz (tiefe Winterruhe) und des Knospenaufbruchs (Beginn der Blüte). Dieses Ziel ist sowohl mit klassischen Züchtungsverfahren (ca. 25 Jahre) als auch mit neuen Züchtungstechnologien (ca. 10 Jahre) zu erreichen. An der Erforschung der genetischen Mechanismen, die diese Prozesse bedingen, wird international sehr intensiv gearbeitet. Erste Schlüsselgene wurden bereits identifiziert. In der Zuckerrübenzüchtung wird seit längerem an sogenannten Winterrüben geforscht, die im Winter eine verbesserte Frosthärte aufweisen und die im Frühjahr nicht vorzeitig durch Kältevernalisation blühen (DALLY et al., 2018). Mildere Winter könnten hier die pflanzenbaulichen Veränderungen unterstützen.

Extremwetter (Sturm, Hagel, Starkregen)

Gegen Hagelschäden sind keine züchterischen Aktivitäten bekannt. Jedoch ist die Reduzierung der Lageranfälligkeit, was bei Sturm und Starkregen von Relevanz ist, ein wichtiges Prüfmerkmal und auch Zuchtziel, besonders im Getreide. Allerdings ist festzustellen, dass die Lageranfälligkeit trotz signifikant reduzierter Pflanzenlängen in Weizen, Gerste und Triticale über die vergangenen Jahrzehnte nicht abgenommen hat (LAIDIG et al., 2021). Dies ist vorrangig auf die höhere Anzahl ährentragender Halme, und besonders das erhöhte Einzelährengewicht zurückzuführen. Im Roggen, bei dem die Pflanzenlänge über die vergangenen Jahrzehnte noch nicht reduziert wurde, laufen züchterische Aktivitäten zur Züchtung von Halbzwergen und der Reduzierung der Lageranfälligkeit (www.rye-sus.eu, 2021).

Erhöhter CO₂-Gehalt

Da der CO₂-Gehalt über den Verlauf der letzten Jahrzehnte stetig angestiegen ist, ist anzunehmen, dass dieser, wie oben bereits für andere Klimaadaptionen dargestellt, indirekt in den Züchtungsprogrammen abgebildet ist. Zeitnah ist aber keine züchterische Bedeutung zu erkennen, zumal etwaige positive Effekte von negativen Klimaauswirkungen überlagert werden (s. o.).

2.2.1.2 Transgene Pflanzen

Trotz der Notwendigkeit zur Kombination von zahlreichen Genomregionen zur Klimaanpassung kann sich der gezielte Einsatz von Gentechnik als vorteilhaft erweisen und Synergien zur Erreichung der Ziele öffnen. Denn trotz der hochkomplexen Merkmalsinteraktion zeigen verschiedene Studien, dass die Modifikation von Einzelgenen, die für Schlüsselfunktionen kodieren, eine Erhöhung der Stresstoleranz bewirken kann.

Ansätze zur Stärkung der Stresstoleranz mit gentechnischen Verfahren setzen auf direkte Beeinflussung von Stoffwechselwegen unter Ausnutzung (Übertragung) der genetischen Ausstattung trockenresistenter Wildpflanzen. Bei CAM-Pflanzen (Crassulacean Acid Metabolism) wird das für die Photosynthese notwendige CO₂ nachts fixiert, eine Stoffwechselstrategie, die es ihnen ermöglicht, die Spaltöffnungen ihrer Blätter zum Gasaustausch nachts zu öffnen, wenn die damit einhergehende Verdunstung am niedrigsten ist. Transfer von Genen aus diesem Stoffwechselweg in Nicht-CAM-Pflanzen könnte zu einer Erhöhung der Trockenresistenz führen (YANG et al., 2020). Weitere durch Austrocknung induzierbare Gene stehen im Fokus: So wurde z. B. durch die Übertragung eines Genes aus Reis, das für einen Nitrattransporter kodiert, eine erhöhte Widerstandkraft gegen Wassermangel in *Arabidopsis* erreicht (CHEN et al., 2019). Es gibt weitere Beispiele bzgl. der Übertragung oder dem Ausschalten (knockout) von stoffwechselregulierenden Transkriptionsfaktoren mit ähnlichen Effekten (RAZZAQ et al., 2019; YANG et al., 2020).

Für eine Übertragbarkeit der Erkenntnisse ist es allerdings entscheidend, dass die betrachteten Merkmale ihre leistungssteigernde Wirkung auch vor dem genetischen Hintergrund der Elitesorten zeigen. Einige Studien mit transgenen Ansätzen, die eine Leistungssteigerung im Feld demonstrieren, sind nachfolgend gelistet:

- Das Herabregulieren des Farnesyltranferase-Enzyms (ein Regulator für die Kontrolle der Spaltöffnung) führte in Raps zur Dämpfung der Ertragsminderung unter Trockenstress⁴ (Ertragsverluste von ca. 20 % beim Wildtyp auf 1-11 % bei transgenen Linien) unter Feldbedingungen (WANG et al., 2009).
- Höhere Ertragsleistung von Weizen durch das Sonnenblumen-Gen *HB4* im Feld (nicht speziell unter Trockenstress; +6 % im Durchschnitt von 37 Experimenten und Standorten) (GONZALEZ et al., 2019).
- Überexpression der *Galactinol-Synthase* verbessert die Trockenstresstoleranz in transgenem Reis und die Ertragsleistung unter Feldbedingungen: Verdopplung des Kornertrags in einigen transgenen Linien (Selvara) et al., 2017).
- Überexpression von *Arabidopsis Enhanced Drought Tolerance* 1 (EDT1) Genen zeigt für Luzerne in zweijährigem Feldversuch bessere Trockenstresstoleranz: Überlebensfähigkeit ca. 50-100 % transgener Linien gegenüber ca. 20 % des Wildtyps; kein bis geringer Ertragsverlust der transgenen Pflanzen gegenüber >50 % beim Wildtyp (ZHENG et al., 2017).

Unter den wenigen weltweit vermarkteten, transgenen, trockentoleranten Pflanzen finden sich mit Relevanz für Europa nur Mais (Drought Guard™ MON87460) und Soja (HB4 Soy, IND410). Die Modifikationen beziehen sich auf regulatorische Proteine, die den Wasserhaushalt der Pflanzen bei Trockenheit beeinflussen. NEMALI et al. (2015) und ADEE et al. (2016) postulierten nach Feldversuchen in den USA mit Drought Guard Mais einen bei trockenen Klimabedingungen⁵ um ca. 6 % erhöhten Ertrag; unter "normalen" Klimabedingungen zeigten sich keine Unterschiede von Kontrolle und trockentoleranten Linien.

2.2.1.3 Genomeditierung

Es gibt eine Reihe von Untersuchungen zum Einsatz von Genomeditierung zur Adaptation von Kulturpflanzen an eine geänderte Klimadynamik. Diese umfassen Arbeiten zur Stresstoleranz (Hitze, Trockenheit) und Entwicklung (Wachstum, Blüte) (XU et al., 2019; MATRES et al., 2021). Das Gros der

⁴ bei verminderter Beregnung

⁵ aber mit Beregnungsmaßnahmen

Arbeiten befindet sich im Stadium von Labor- und Gewächshausversuchen. Im Folgenden sind einige fortgeschrittene Arbeiten hervorgehoben, die bislang noch keine Marktreife erlangt haben. Eine Übersicht von Genomeditierungsanwendungen (mit Stand Juni 2019 nach MENZ et al., 2020) mit Merkmalen, die für eine Klimaanpassung von Kulturpflanzen relevant sein können, ist in Abbildung 2.3 dargestellt.

Genomeditierung und Klimaanpassung

[Mit Genomeditierung bearbeitet Merkmale und Arten; Stand 2019, n. Menz et al. 2020]

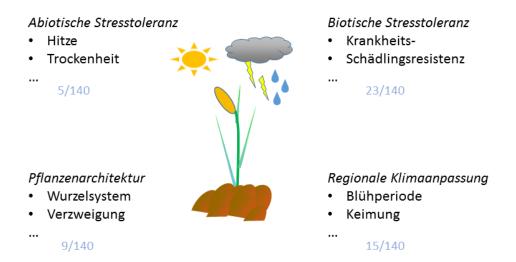


Abbildung 2.3: Anwendungen von Genomeditierung an Kulturpflanzen, die Eigenschaften einer umfassenden Klimaanpassung berühren. Die Angaben beziehen sich nach MENZ et al., 2020 auf Entwicklungen (Pflanzen und Merkmal) jenseits der Grundlagenforschung (marktorientiert). Die Zahlenangaben beziffern die Anzahl der Anwendungen im Themenbereich gegenüber allen dokumentierten Anwendungen bis Juni 2019.

Figure 2.3: Genome editing with crops for applications with traits relevant for climate adaptation. According to MENZ et al., 2020, the data refer to applications (plants and trait) beyond basic research (market-oriented). Figures quantify the number of applications in the topic area versus all documented applications through June 2019.

Trockentoleranz

Derzeit gibt es einige Arbeiten im internationalen Umfeld, welche sich mit der gezielten Veränderung des Genoms über Genomeditierung zur Erzeugung von Trockentoleranzen beschäftigen. Das Ziel der derzeitigen Genomeditierungsansätze beruht auf der Änderung von Schlüsselgenen, welche im Stressstoffwechsel eine regulierende Rolle spielen. So wurden z. B. Gene adressiert, welche die Ethylen-Empfindlichkeit steuern (SHI et al., 2017). Dies erhöhte den Ertrag bei Trockenstress während der Blühperiode um ca. 4 %⁶. Arbeiten in den USA werden an Mais (z. B. NJUGUNA et al., 2018), Weizen (KIM et al., 2018) und Sojabohne (CURTIN, 2017) durchgeführt, bei der eine kombinierte Toleranz gegenüber Trockenheit und erhöhtem Salzgehalt angestrebt wird. Darüber hinaus gibt es mehrere Forschungsansätze bei Reis, die sich Genen widmen, die die Anzahl der Spaltöffnungen und damit die Transpiration bei Trockenstress reduzieren (CAINE et al., 2019; SANTOSH KUMAR et al., 2020; YIN et al., 2017; 2019), eine effiziente Reduktion des Wasserverlustes durch Blattrollen ermöglichen und die Kornfüllung der Mutante unter Trockenstress zu mehr als 25 % sicherten, während der Wildtyp bei nur

⁶ bei einer Reduktion des Ertrages um ca. 35 % für Kontrolle und modifizierte Pflanzen

2,5 % lag (LIAO et al., 2019). Weitere aktuelle Laborarbeiten an Reis widmen sich der Aufklärung von Genfunktionen zur Osmoregulation (Review s. MATRES et al., 2021).

Salztoleranz

Derzeit gibt es wie zum Trockenstress nur relativ begrenzte Anwendungen von Genomeditierung in Nutzpflanzen, welche zu einer erhöhten Salztoleranz führen, da wie beim Trockenstress relevante Gene oftmals noch unbekannt sind. Ähnlich wie beim Trockenstress werden zur Induktion von Salztoleranz häufig regulatorische Elemente wie Transkriptionsfaktoren adressiert, welche im Stressstoffwechsel eine Rolle spielen. Beispiele gibt es auf internationaler Ebene an Kartoffeln in Russland (MAKHOTENKO et al., 2019) sowie an Reis in China (ZHANG et al., 2019) und an Sojabohne in den USA (CURTIN, 2017).

<u>Blühzeitpunkte</u>

Es gibt eine Reihe von Ansätzen, den Blühzeitpunkt bei verschiedenen Pflanzen in Bezug auf "neue" Lebensbedingungen bzw. spezifische Klimabedingungen zu verändern (Escape-Strategie). Es liegen erfolgreiche Versuche u. a. mit Mais, Raps, Soja und Tomate (Review s. MENZ et al., 2020), jedoch keine quantitativen Daten zum praxisnahen Anbau, vor.

2.2.2 Technische Maßnahmen

Trockenheit / Trockenstress

An technischen Maßnahmen gegen zunehmenden Trockenstress kommt insbesondere eine Zusatzbewässerung in Frage. Aktuell werden nur ca. 3,8 % der landwirtschaftlich genutzten Fläche im Ackerbau sowie Obst- und Weinbau Deutschlands bewässert (Statistisches Bundesamt, 2021). Ein Ausbau der Beregnungskapazitäten ist jedoch nicht ohne weiteres möglich, besonders aufgrund von nicht ausreichenden Grundwasserreserven oder rechtlichen Hemmnissen. Hierzu wird die in Bearbeitung befindliche Nationale Wasserstrategie der Bundesregierung Möglichkeiten und Grenzen aufzeigen.

In jedem Fall ist eine möglichst effiziente Nutzung der Ressource Wasser anzustreben. Aktuell ist die mobile Beregnungsmaschine mit Großflächenregner die am weitesten verbreitete Beregnungstechnik in Deutschland, insbesondere aufgrund der relativ geringen Anschaffungskosten. Effizienter wäre jedoch eine Beregnung mittels Tropfberegnung, die jedoch teuer und aufwendig einzusetzen ist (FRICKE, 2017).

Weitere Maßnahmen sind in diesem Zusammenhang der Ausbau der Bewässerungskapazitäten, unter anderem durch den Auf- und Ausbau von Regenrückhaltebecken und Wasserspeichern, oder die Nutzung von Grauwasser für die Feldberegnung.

Im Obstbau kann auch der geschützte Anbau unter Folie oder die Abdeckung der Pflanzreihen mit Mulch oder Mulchfolie helfen, die Evapotranspiration der Bestände und somit Trockenstress zu reduzieren. Solche Maßnahmen sind jedoch meist mit hohen Investitionskosten verbunden, die sich über das Endprodukt refinanzieren lassen müssen. Zudem ist die Nutzung von Mulchfolie im Zusammenhang mit Mikroplastik kritisch zu sehen.

Extreme Temperaturen und mittlerer Temperaturanstieg

Zur Bekämpfung von Hitzestress kann eine Zusatzbewässerung eingesetzt werden. Die entstehende Verdunstungskühle durch direkte Verdunstung von Bewässerungswasser im Bestand sowie erhöhte

Transpiration der Pflanzen kann helfen, den Hitzestress zu lindern. Auch im Obstbau wird eine solche Klimaberegnung eingesetzt, um Hitzeschäden und Sonnenbrand zu minimieren.

Auch hilft das Besprühen der Bestände im Obst- und Weinbau im Frühjahr bei Kahlfrösten, Schäden an Blüten und Knospen zu minimieren bzw. zu verhindern. Die Frostschutzberegnung nutzt hierbei das Phänomen der Kristallisationswärme. Alternativ können Frostschutzkerzen eingesetzt werden, um die Lufttemperatur in der Wein- oder Obstanlage bei Frostgefahr zu erhöhen.

Im Obstbau besteht auch die Möglichkeit, Sonnenschutzmittel auf Basis von Kaolin, Kalziumkarbonat oder Carnauba-Wachs auszubringen, um Sonnenbrand entgegenzuwirken (BAAB & BARNA, 2016).

2.2.3 Anbaumaßnahmen

Trockenheit / Trockenstress

Um sich an die Zunahme von Intensität und Dauer von Trockenperioden anzupassen, sind Maßnahmen auf unterschiedlichen Ebenen grundsätzlich möglich. Fruchtfolgegestaltung und Kulturartenauswahl spielen hierbei eine wichtige Rolle. Dies umfasst den Anbau von trockentoleranteren Kulturen, die sich z. B. durch eine hohe Wassernutzungseffizienz auszeichnen (z. B. Sorghum) und/oder tiefwurzelnde Kulturen, die das Wasser aus tieferen Bodenschichten erschließen (z. B. Roggen) können. Beim Anbau von Zwischenfrüchten und Untersaaten ist zu beachten, dass diese dem Wasserangebot des Standorts angepasst sein müssen. In Regionen mit Gefahr von Frühsommertrockenheit wird daher von Zwischenfrüchten vor Sommerungen abgeraten, da diese dem Boden nach der Winterruhe zusätzlich Wasser entziehen. Hingegen bietet sich der vermehrte Anbau von mehrjährigen Kulturen (z. B. Durchwachsene Silphie) an, die durch ein bereits gut entwickeltes Wurzelsystem meist besser an Trockenheit angepasst sind als einjährige Kulturen.

Auch die Sortenwahl kann zukünftig zu einer verbesserten Trockenstresstoleranz beitragen. In diesem Zusammenhang ist auch die "Escape-Strategie" zu nennen (s. o.).

Zudem kann die nicht-wendende Bodenbearbeitung Wasserverluste durch Evaporation reduzieren (z. B. Kurothe et al., 2014; Peng et al., 2019). Eine dauerhafte Bodenbedeckung, wie sie durch Mulchoder Direktsaatverfahren ermöglicht wird, kann ebenfalls zur Reduzierung der Wasserverluste durch Verdunstung beitragen. Auch trägt eine gute Infiltrationsfähigkeit zu effektiver Wasseraufnahme von Böden sowie eine gute Bodenstruktur und Durchwurzelbarkeit zu einer optimalen Erschließung der Bodenwasservorräte durch die Kulturpflanzen bei.

Extreme Temperaturen (auch Frost) und mittlerer Temperaturanstieg

Die möglichen anbautechnischen Maßnahmen zur Anpassung an den zunehmenden Hitzestress orientieren sich an den Anbaumaßnahmen zur Anpassung an Trockenstress. Dies umfasst den Anbau hitzetoleranterer Pflanzenarten (z. B. Sorghum, Mais), die Wahl hitzetoleranterer Sorten, soweit solche bereits verfügbar sind, sowie die "Escape-Strategie" (s. o.), um die sensitiven Entwicklungsphasen bereits vor Eintreten der Hitzeperioden abzuschließen. Allgemein, aber gerade im Obst- und Weinbau, bietet der Wechsel auf Sorten bzw. Kreuzungspartner aus wärmeren Anbaugebieten mittelfristiges Anpassungspotenzial. Der steigenden Gefahr durch Spätfrostschäden kann anbautechnisch nur durch die Wahl frosttoleranter Sorten begegnet werden. Im Weinbau kann zudem das Anschneiden einer Frostrute als Ersatz für erfrorene Knospen helfen, den Ausfall möglichst gering zu halten. Im Hinblick auf Sonnenbrand kann eine termingerechte Entblätterung helfen, Schäden zu reduzieren. Der Anstieg der Durchschnittstemperatur und die damit einhergehende Verlängerung der Vegetationsperiode kann langfristig die Möglichkeit bieten, zwei Ackerkulturen in einem Jahr anzubauen. Dies kann z. B. die Kombination aus einem frühen Wintergetreide mit einer

Sommerung mit geringem Wärmesummenbedarf sein. Voraussetzung hierfür ist allerdings eine ausreichende Wasserversorgung, die den Bedarf von zwei Kulturen decken kann.

Phänologische Verschiebung und Anpassung Anbauzeiträume

Auch hinsichtlich der Verschiebung phänologischer Phasen und der verlängerten potenziellen Vegetationsphase ist die Kulturarten- und Sortenwahl eine geeignete Maßnahme, die aber das Vorhandensein angepasster Sorten voraussetzt (und damit ggf. an Züchtung geknüpft ist), wie z. B. bei der Winterkultur von Zuckerrüben. So wird zukünftig der Anbau von Sorten mit höheren Temperaturansprüchen sowie höherem Temperatursummenbedarf und entsprechend längeren Wachstumsphasen möglich sein. Auch im Obstbau wird der Umstieg auf spätreifende Sorten auch in kühleren Regionen erfolgreich praktiziert werden können. Entsprechend ist zu erwarten, dass es in Folge der klimatischen Veränderungen auch zu Veränderungen im Sortenspektrum und zu Verschiebungen in den Anbauregionen kommt.

Die Verschiebung von Aussaat- und Ernteterminen hat grundsätzlich Einfluss auf den Zeitraum, in dem der Boden bedeckt und damit z. B. vor Erosionsereignissen geschützt ist.

Extremwetter (Sturm, Hagel, Starkregen)

Im Hinblick auf die Anpassung an Sturm, Hagel und Starkregen sind die Möglichkeiten im Ackerbau begrenzt. Eine bodenschutzgerechte Schlaggestaltung, inklusive Schlagunterteilung, Schutz- und Pufferstreifen sowie Hangmulden- und Tiefenlinienbegrünung sind Maßnahmen, die Folgen von Sturm, Hagel und Starkregen minimieren. Ziel muss es hierbei sein, die Folgen der Extreme abzumildern. So kann eine Erhöhung der Wasserinfiltration durch möglichst dauerhaften Bewuchs (Zwischenfrüchte und Untersaaten) und Erhöhung der Aggregatstabilität des Bodens das Erosionsrisiko minimieren. Außerdem kann die Diversifizierung des Anbaus im Hinblick auf Kulturarten und Sorten als Mittel der Risikostreuung helfen, negative agronomische und wirtschaftliche Folgen abzumildern. Auch die Ausweitung von Strukturelementen wie Hecken und Saumstreifen können im Sinne des Erosionsschutzes vorteilhaft sein.

2.3 Nachhaltiger Pflanzenschutz

Der fortschreitende Klimawandel, der Wegfall wichtiger Pflanzenschutzmittel durch Verbot und Wirkverluste sowie die Gefahr der weltweiten Verschleppung von Schaderregern stellen Herausforderungen an die Landwirtschaft dar. Hinzu kommen die gestiegenen gesellschaftlichen und politischen Erwartungen an einen nachhaltigen Pflanzenschutz, der die Risiken für die Umwelt (Biodiversität) sowie die menschliche und tierische Gesundheit umfassender berücksichtigt. Wobei der Parlamentarische Forschungsservice der EU (SCIENTIFIC FORESIGHT UNIT, EPRS) in seinem Bericht von 2019 für die aktuelle Situation schlussfolgerte: "Eine Pflanzenproduktion in der EU ohne [Pflanzenschutzmittel] ist derzeit nicht realistisch, aber [...] [eine] Reduzierungen ohne oder mit akzeptablen Ertragsverlusten [ist] möglich". Diese Möglichkeiten liegen in der synergistischen Nutzung der hier skizzierten "Werkzeuge".

Durch das Verbot ganzer Wirkstoffgruppen chemischer Pflanzenschutzmittel ergeben sich zunehmend Probleme. In vielen Bereichen nimmt die Anzahl verfügbarer Wirkstoffe und deren Anwendungsmöglichkeiten stetig ab. Die Entwicklung neuer Wirkstoffe ist kostenintensiv und zeitaufwändig; zudem besteht das Risiko, dass neue Wirkstoffe aufgrund steigender Anforderungen an die Zulassung für Freilandanwendungen nur beschränkt verfügbar werden (Beispiel Sulfoxaflor). Pilzliche Schaderreger und Insekten konnten in Europa und Deutschland in der Vergangenheit mithilfe wirksamer Fungizide und Insektizide effektiv bekämpft werden. Vor dem Hintergrund der gesellschaftlichen Anforderungen an eine umwelt- und verbraucherfreundliche Pflanzenproduktion und die Schonung der natürlichen Ressourcen (Boden, Wasser, Biodiversität) wird die Zulassung und Anwendung chemisch-synthetischer Pflanzenschutzmittelwirkstoffe jedoch zunehmend restriktiver. Diese Entwicklung führt zu weiteren Herausforderungen, da eine Einschränkung der Anzahl verschiedener Wirkstoffe zu einer beschleunigten Resistenzbildung bei Pathogenen und Schaderregern beiträgt und so zu einer weiteren Verringerung effektiv nutzbarer Pflanzenschutzmittel führen kann.

Angestrebte erweiterte Fruchtfolgen sind u. U. damit herausgefordert, wenn es an geeigneten Mitteln zur Eindämmung von Schaderregern fehlt (z. B. bei der Sonnenblume). Mittlerweile zeigen viele Ackerbauschädlinge breite Resistenzen gegen etablierte Wirkstoffe. Dies betrifft zum Beispiel die insektizide Kontrolle des Rapsglanzkäfers (*Brassicogethes aeneus*), des Rapserdflohs (*Psylliodes chrysocephalus*), der Grünen Pfirsichlaus (*Myzus persicae*) oder die Kontrolle von Blattkrankheiten mit Fungiziden wie der Ramularia-Sprenkelkrankheit (*Ramularia collo-cygni*) in Wintergerste. Bei allen fehlen aktuell ausreichend wirksame, nicht-chemische Alternativen zur Kontrolle.

Potenzielle Ertragsverluste schwanken je nach Kultur und Anbaugebiet und können bis zu 80 % bei Reis oder Kartoffeln ausmachen oder beispielsweise 55 % im Getreide, wobei Unkräuter am stärksten ertragswirksam sind (OERKE, 2006). Der potenzielle Ertragsverlust durch pilzliche und virale Pathogene sowie Insekten liegt bei den Hauptgetreidearten Weizen (Voss-Fels et al., 2019) und Gerste in Abhängigkeit von den jeweiligen Anbaugebieten bei durchschnittlich 20 bis 25 %, bei anderen Kulturarten wie Mais und Gemüse (z. B. durch *Fusarium* spp. bei Erbsen, 30 bis 50 %) noch deutlich darüber und kann bei Obst und Wein bis zu 80 % erreichen (OERKE, 2006; SAVARY et al., 2019).

Schadinsekten vernichten nach grober Schätzung bis zu 20 % der globalen Ernten. Das betrifft derzeit insbesondere tropische und subtropische Gebiete. Neben den etablierten Schaderregern bieten im Zuge des Klimawandels jedoch auch die gemäßigten Breiten für neu einwandernde Schadinsekten geeignete Lebensräume und auch bisher nicht relevante heimische Schädlinge können möglicherweise ein großes Schadpotenzial entwickeln (z. B. Zikadenarten). Nach Prognosen von DEUTSCH et al. (2018) sind vor allem in den gemäßigten Klimazonen steigende Ernteverluste durch Schadinsekten zu

erwarten. Ein Anstieg der Durchschnittstemperatur um zwei Grad Celsius könnte dazu führen, dass die Ertragseinbußen bei Weizen in Deutschland um fast 50 % zunehmen. Bereits heute führt die neu eingewanderte Kirschessigfliege zu massiven Schäden im Obst- und Weinbau.

Grundlage für eine planmäßige Züchtung von Pflanzen, die gegen Befall durch spezifische Schadinsekten resistent bzw. tolerant sind, ist eine genaue Kenntnis der Interaktionen zwischen der Kulturpflanze und dem jeweiligen Schadinsekt. Solche Untersuchungen sind zwar sehr aufwendig, werden jedoch zukünftig unverzichtbar sein. Die meisten in Europa angepflanzten Reb- und Apfelsorten sind anfällig für diverse Schadorganismen. Die Pflanzenschutzintensität der Reb- und Obstflächen in Deutschland ist daher im Vergleich zu den Ackerbaukulturen deutlich höher (https://papa.julius-kuehn.de/). Besonders der Echte und der Falsche Mehltau, aber auch der Grauschimmel zählen zu den wichtigsten Rebenkrankheiten und sind die Hauptgründe für die hohe Anwendung an Fungiziden (sowohl im konventionellen als auch im biologischen Anbau). Bakterielle Pathogene sind derzeit in Deutschland hauptsächlich in den Gemüsekulturen ein Problem, da es hier oftmals zu einer intensiven Bewässerung kommt und sich die Erreger häufig mit dem Spritzwasser verbreiten.

Im Folgenden werden züchterische, technische und Anbaumaßnahmen betrachtet, die aktuell oder zeitnah zur Verfügung stünden, um den Herausforderungen des nachhaltigen Pflanzenschutzes zu begegnen. Verdeutlicht werden hierbei die Potenziale, die aus den einzelnen Maßnahmen geschöpft werden können.

2.3.1 Züchterische Maßnahmen

Die Erschließung genetischer Ressourcen ist für die Resistenzzüchtung gegen jegliche Erreger notwendig, um die innerartliche Diversität sowie die Anpassung an Resistenzmechanismen und Umweltbedingungen zu verstehen. Ebenfalls sind für die Suche nach toleranten/resistenten Akzessionen eindeutige Symptome von Vorteil, welche für eine Phänotypisierung genutzt werden können, da erst durch eindeutige Symptome eine leichte und möglicherweise auch automatisierte Unterscheidung in anfällig und tolerant/resistent möglich ist. Gerade bei der Phänotypisierung besteht jedoch ein Flaschenhals und zusätzliche Forschung ist notwendig. Durch zunehmend effektivere Phänotypisierungsverfahren und Hochdurchsatzmarker-Technologien (COMADRAN et al., 2012; POLAND et al., 2012) können eine große Anzahl an Genotypen oder biparentale Populationen für assoziationsgenetische Studien kostengünstig analysiert und Resistenz-gekoppelte Marker identifiziert werden. Entsprechende Markertechniken ermöglichen auch die Nutzung genomischer Selektionsverfahren in der Pflanzenzüchtung (HEFFNER et al., 2009; HERTER et al., 2019), welche zu einer Verkürzung des Züchtungszyklus führen. Ferner stehen heute für die meisten Kulturarten die Genomsequenzen zur Verfügung, so dass eine effektive Markerabsättigung von Zielregionen und die Isolation von Kandidatengenen erleichtert wird.

Durch Anreicherung und Sequenzierung von resistenzspezifischen DNA-Loci (RenSeq, AgRenSeq) kann die Isolation von Resistenzgenen "R-Genen" beschleunigt werden (JUPE et al., 2013; ARORA et al., 2019).

PILZLICHE SCHADERREGER

2.3.1.1 Klassische Züchtung (Pilzresistenz)

Die Resistenzzüchtung als Alternative zum chemischen Pflanzenschutz hat unter Nutzung klassischer und Marker-gestützter Selektionsverfahren in Europa im Weizen und in der Gerste insbesondere gegen Mehltau und verschiedene Rostkrankheiten in den vergangenen Jahrzehnten erhebliche Erfolge erzielt. Auch in anderen Kulturen, wie im Gemüse, konnten R-Gene gegen Mehltau und weitere

pilzliche Erreger identifiziert werden. So verfügen moderne Weizensorten heute schon über Mehrfachresistenzen gegen verschiedene Mehltaurassen (Ahlemeyer & Friedt, 2011). Auch gegen nekrotrophe Pilzpathogene, wie *Fusarium spp.*, und *Septoria spp.*, konnten quantitative Verbesserungen durch klassische Züchtung erreicht werden. Es wurde gezeigt, dass es der Pflanzenzüchtung in den vergangenen fünf Jahrzehnten gelungen ist, das Ertragspotenzial und das Resistenzniveau z. B. bei Weizen simultan und unabhängig vom Pflanzenschutz- und Düngemittelaufwand zu steigern (Voss-Fels et al., 2019). Zudem leistet das verbesserte Resistenzniveau heute einen wesentlichen Beitrag zur Ertragsstabilität sowohl bei den Ackerbaukulturen als auch bei den Sonderkulturen (ZETZSCHE et al., 2020).

Neben rassenspezifischer Resistenzen, die durch R-Gene vermittelt werden, ist die generelle, quantitative, rassenunspezifische Resistenz attraktiv. Bezüglich der Getreideroste wurden resistente Akzessionen identifiziert, deren Kombination durch Kreuzung zu Nachkommen mit einer stärkeren, möglicherweise dauerhaften Rostresistenz führte (Gessese et al., 2019). Moderne Sorten in den Ackerbaukulturen weisen eher eine ausgewogene, moderate Widerstandsfähigkeit gegenüber verschiedenen Pathogenen auf als eine maximale Resistenz gegenüber einem oder wenigen Krankheitserregern. Untersuchungen weisen darauf hin, dass die Widerstandsfähigkeit auf einer Akkumulation von quantitativen, langlebigen Resistenzen basiert (Zetzsche et al., 2019).

Bei Gemüse und Kräuterkulturen ist der Befall mit Falschem Mehltau (z. B. *Peronospora parasitica*) sehr vom Beregnungsregime und den gewählten Sorten abhängig. Zudem kann hier eine Reihe weiterer Pilze und Oomyceten (z. B. *Rhizoctonia solani, Alternaria tenuis, Albugo candida*) zu erheblichen Schäden führen. Resistente Sorten sind im Gemüsebau bisher nicht verfügbar.

Die evolutive Anpassung der Pathogene führt zur Überwindung von Resistenzgenen in allen Kulturen. Besonders bei der Nutzung von R-Genen ist der Schutz oft nur von begrenzter Dauer, was für die Resistenzzüchtung eine fortwährende Herausforderung darstellt. Es gilt, in genetischen Ressourcen weitere und neue, effektive und möglichst dauerhafte Resistenzgene zu identifizieren, diese durch Pre-Breeding züchterisch nutzbar zu machen und zu kombinieren ("pyramidisieren") (TANKSLEY & MCCOUCH, 1997; SINGH & RAJARAM; 2002, SERFLING et al.; 2016). Das Entwickeln neuer Sorten mit pyramidisierten Resistenzen gegen pilzliche Schaderreger steht heute im Fokus der klassischen Züchtung.

Die Forschung in den Sonderkulturen, zu denen u. a. Obst, Rebe und Gemüse gehören, verfolgt einen ähnlichen Ansatz, da es auch hier zum Brechen von Resistenzen kommt. So sind verschiedene Resistenzen gegen den Falschen Mehltau und den Echten Mehltau auch in der Rebe bekannt. Im Obstbau sind für die wichtigsten Krankheiten bereits zahlreiche Resistenzen identifiziert und erste Resistenzgene isoliert worden (Hanke et al., 2020). Diese finden bereits in der Züchtung eine praktische Anwendung. Es ist zu erwarten, dass es bei einigen Obstarten (z. B. Apfel) in den nächsten 10 bis 20 Jahren erste qualitativ hochwertige Sorten mit kombinierten (pyramidisierten) Resistenzen gegenüber ausgewählten Schaderregern am Markt geben wird. Allerdings sind in den letzten Jahren eine Reihe neuer pilzlicher Schaderreger in Europa aufgetreten, welchen den Pflanzenbau in erheblichem Ausmaß beeinträchtigen. Gegenüber einigen Schaderregern, wie dem Erreger des frühzeitigen Blattfalls bei Apfel, *Marssonina coronaria*, sind züchterische Ansätze zur Verbesserung der Resistenz denkbar, aber noch nicht umgesetzt (Wöhner et al., 2021b).

2.3.1.2 Transgene Pflanzen (Pilzresistenz)

Die klassische Gentechnik setzt zum einen auf den Einsatz von Cisgenen (hier: Übertragung von arteigenen Genen mittels Transgenese) zur Erzeugung von pilzresistenten Pflanzen. Hierbei werden Gene aus mit der jeweiligen Kulturpflanze kreuzbaren Wildpflanzen genutzt, die in Kultursorten

eingebracht werden. So konnten bereits cisgene Äpfel, die gegen Apfelschorf und cisgene Kartoffeln, die gegen die Kraut- und Knollenfäule resistent sind, erzeugt werden (HAVERKORT et al., 2016). In den USA ist eine solche Kartoffel ("Simplot") bereits zugelassen. Eine weitere Möglichkeit ist das Einbringen von Genen, welche die Pilze zersetzen (Chitinasen und Glucanasen). Dieser Ansatz wurde bereits bei einer Vielzahl von Pflanzen erprobt und auch in Deutschland an Gerste im Feld getestet. Ein weiterer neuerer transgener Ansatz (RNAi Technik) beruht auf dem Einbau doppelsträngiger RNA-kodierender Sequenzen in das Pflanzengenom, welche ein wirtsinduziertes Gen ausschalten (Host induced gene silencing).

2.3.1.3 Genomeditierung (Pilzresistenz)

Ein Beispiel für Genomeditierung gegen pilzliche Erreger ist das mlo-Mehltauresistenzgen der Gerste, das ebenfalls in den mlo-Genen des A-, B- und D-Genoms des Weizens lokalisiert ist, und durch TALEN-Mutationen künstlich induziert werden konnte (WANG et al., 2014). Auch die Genetik einiger weiterer Eigenschaften ist artübergreifend bekannt und wird bereits genutzt, um bei verschiedenen Arten Resistenzen zu erzeugen. Hierbei wird vermehrt auf Suszeptibilitätsgene (Anfälligkeits-Gene oder "S-Gene") zurückgegriffen. Da Krankheiten durch physiologische und molekulare Interaktion zwischen Pathogen und Wirt manifestiert werden, kann eine geeignete genetische Veränderung eines S-Genes zu einer dauerhaften, meist quantitativen Resistenz führen. Bei einigen Kulturarten fehlt es jedoch an einem methodischen Zugang und ausreichenden Sequenzinformationen. Zudem kann es bei S-Genen immer zu einem negativen Effekt auf Ertrag, Architektur oder andere Eigenschaften kommen (VAN SCHIE & TAKKEN, 2014), weswegen jedes S-Gen vorab hinsichtlich der Funktion für die Pflanze analysiert werden muss. Die meisten Arbeiten finden im nicht-europäischen Ausland statt (MENZ et al., 2020). Für Deutschland ggf. relevant sind die Arbeiten an den ackerbaulichen Kulturen Weizen, Mais und Raps (ZHAI et al., 2019) oder auch an Tomate (NEKRASOV et al., 2017) und Wein (WANG et al., 2018). International gibt es zudem noch Arbeiten an Baumwolle (ZHANG et al., 2018), Kakao (FISTER et al., 2018) und an Reis (z. B. WANG et al., 2016).

Derzeit gibt es in Deutschland ein großes Forschungskonsortium (PILTON) vieler Züchter, welches sich zum Ziel gesetzt hat, Winter- und Sommerweizen mit einer breiten Pilzresistenz auszustatten. Das PILTON-Projekt ist 2020 gestartet und erste Pflanzen konnten bereits erzeugt werden (https://pilton.bdp-online.de/).

VIREN

2.3.1.4 Klassische Züchtung (Virenresistenz)

Ein Beispiel für erfolgreiche Resistenzforschung und -züchtung gegen Viruskrankheiten ist die gegen Gelbmosaikviren der Wintergerste. Bereits in den 1980er und 90er Jahren konnten eine Reihe von Resistenzträgern identifiziert werden. Inzwischen besitzt die Mehrzahl der deutschen Wintergerstensorten das rezessive rym4-Gen, welches Immunität gegen die Viren verleiht. Es herrscht unter Fachleuten Einvernehmen, dass der Anbau von Wintergerste auf verseuchten Flächen in den letzten beiden Jahrzehnten nur durch den konsequenten Einsatz resistenter Sorten aufrechterhalten werden konnte. Die konsequente Weiterführung der Suche von Resistenzträgern ist notwendig, um im Falle des Verlustes der Wirksamkeit einzelner Resistenzgene neue zur Verfügung zu stellen. In Deutschland kommen eine Vielzahl verschiedener bodenbürtiger Viren bei Weizen vor. Weitere, durch Insekten übertragene Viren im Getreide sind das Gerstengelbverzwergungsvirus, für welches es Resistenzgene in Weizen und Gerste gibt, sowie das vermehrt auftretende Weizenverzwergungsvirus (WDV), für welches bisher keine Resistenzgene bekannt sind. Es wurden diverse Wildformen der

Gattungen Aegilops und Triticum sowie Kulturweizen auf ihre Reaktion gegen WDV getestet. Möglicherweise finden sich nutzbare Resistenzen in Aegilops-Arten bzw. im D-Genom des Weizens (NYGREN et al., 2015). Fortschritte gibt es in der Resistenzzüchtung gegen Virosen des Kürbis (MARTÍN-HERNÁNDEZ & PICÓ, 2021). Zu den bedeutenden Viren zählen darüber hinaus die Gruppe der Vergilbungsviren bei Zuckerrüben, die erst vor wenigen Jahren entdeckten Nanoviren in Leguminosen, das potato virus Y (PVY) in Kartoffeln und viele weitere. Es zeigt sich, dass Pflanzenviren wie das Spargelvirus-1 (AV-1) sowie das Wasserrübenvergilbungsvirus deutschlandweit fast flächendeckend in allen Anbaugebieten vorkommen und somit ein bedeutendes Problem darstellen. Für Deutschland wird ein Durchseuchungsgrad der Anbauflächen mit AV-1 von 70-90 % zugrunde gelegt. Spargelsorten mit genetisch determinierter Resistenz sind nicht bekannt, jedoch konnte eine Resistenz in einer Wildform identifiziert und auf den Kulturspargel übertragen werden. Andere Gemüsekulturen besitzen bereits einige Resistenzen gegen Viren, z. B. Gurken und Salat, aber auch hier ist eine konsequente Weiterentwicklung notwendig. Im Anbau von Obst und im Weinbau spielen Viren eine eher untergeordnete Rolle, da durch strenge phytosanitäre Richtlinien weitgehend sichergestellt wird, dass zertifiziertes Pflanzgut frei von Viren ist. Innerhalb der normalen Umtriebszeit einer Rebanlage kann es zwar durchaus zu Infektionen von außen kommen, die Ertragsdefizite sind in diesem Zeitrahmen aber aktuell relativ gering. Bei Stein- und Beerenobst kommen einige Viren vor; Ziel der Bekämpfung sind aber hauptsächlich ihre Vektoren (Blattläuse etc.) und die Gesundhaltung von Vermehrungsanlagen. Auch einige resistente Sorten aus klassischer Züchtung sind bereits auf dem Markt.

2.3.1.5 Transgene Pflanzen (Virenresistenz)

Derzeit gibt es in der EU keine zugelassenen Pflanzen mit transgenen Virusresistenzen. Auf dem internationalen Markt (vgl. www.isaaa.org) finden sich vor allem mittels klassischer Gentechnik veränderte transgene virusresistente Papaya- und Kürbis-Pflanzen, welche durch das Einbringen eines Virusproteins in das Erbgut der Pflanzen resistent geworden sind. Für die EU könnten prinzipiell virusresistente Bohnen, Gurken, Kürbisse und Tomaten von Bedeutung sein, deren Resistenzen ebenfalls auf dem transgenen Einbau eines Virusproteins beruhen. Eine gegen das Sharkavirus resistente Pflaume wäre prinzipiell auch in Zukunft für Deutschland und die EU bedeutsam.

2.3.1.6 Genomeditierung (Virenresistenz)

Die Modifikation von Proteinen der Pflanze, die Viren zu ihrer Vermehrung benutzen können, ist ein wichtiger Ansatzpunkt, um Pflanzen mit Resistenzen gegen spezielle Viren auszustatten. Dieser Ansatz wird bei einer Vielzahl von Genomeditierungen verwendet und führt in der Regel zu einer zuverlässigen Resistenz gegen einzelne Viren oder ganze Virenstämme. Dieser Ansatz wurde insbesondere bei der Gurke gewählt (Chandrasekaran et al., 2016), weitere Arbeiten finden sich bei Gerste (Kis et al., 2019), Tomate (Mahfouz et al., 2017), Kartoffeln (Makhotenko et al., 2019) und Reis (Zhang et al., 2018). Ein weiterer Ansatz wurde bei Bananen verfolgt, wo mittels Genomeditierung ein endogenes Virus, welches sich im Genom der Banane integriert hatte und bei Stress zu Krankheitssymptomen führte, ausgeschaltet wurde (Tripathi et al., 2019). Die bisher erzeugten Resistenzen basieren zum größten Teil auf Wissen, welches man aus der klassischen Mutationszüchtung abgeleitet hat. Allerdings konnten durch Genomeditierung auch neue potenzielle Genorte als Resistenzen bestätigt werden (z. B. Zhang et al., 2018).

2.3.1.7 Klassische Züchtung (Abwehr bakterieller Schaderreger)

Bakterielle Erreger sind hauptsächlich bei den Gemüsekulturen und z. T. im Obst- und Weinbau ein Problem. Im Gemüseanbau treten bakterielle Krankheiten insbesondere aufgrund der notwendigen Beregnung und steten Feuchtigkeit auf. Besondere Gefahr besteht durch massiven Befall mit *Xanthomonas sp.* sowie *Erwinia sp.*, da diese Erreger hauptsächlich mit Spritzwasser verbreitet werden. Dieses Problem tritt besonders stark bei Kohl, Zwiebeln und Möhren in Erscheinung. Bei allen Kulturen findet zwar Vorlaufforschung statt, aber resistente Sorten fehlen bisher. Bei Feldsalat ist das europaweite Auftreten von bakteriellen Blattflecken, hervorgerufen durch *Acidovorax valerianella*, das größte Problem. Durch die Entwicklung resistenter Sorten kann hier Abhilfe geschaffen werden. Im Rahmen von Evaluierungen genetischer Ressourcen wurde in der Wildart *Valerianella rimosa* eine Resistenz gefunden, die z. Z. züchterisch bearbeitet wird. Es ist zu erwarten, dass mit fortschreitendem Klimawandel diverse neue Schaderreger einwandern (z. B. *Xylella fastidiosa*). Daher ist präventive Züchtung ein wichtiger Ansatz, um zukünftigen Gefahren rechtzeitig zu begegnen. Dies gilt besonders in Anbetracht der langen Züchtungsdauer auch bei Reben.

2.3.1.8 Transgene Pflanzen (Abwehr bakterieller Schaderreger)

Ein Beispiel für einen transgenen Ansatz gegen Bakterien ist der Einsatz eines Cisgens aus Wildapfel in heutigen Kulturäpfeln. So konnte mittels der klassischen Gentechnik ein Gen aus dem Wildapfel in eine Hochleistungssorte eingebracht werden und eine Resistenz gegen das Feuerbrandbakterium erzielt werden. Diese Pflanzen befinden sich seit 2016 in der Schweiz in einem Freisetzungsversuch⁷.

2.3.1.9 Genomeditierung (Abwehr bakterieller Schaderreger)

Bakterien nutzen Pflanzen, indem sie Gene kontrollieren, welche eigentlich für die Versorgung der Pflanzen zuständig sind. Mittels spezieller Proteine steuern sie diese pflanzlichen Gene und versorgen sich in sogenannten "Gallen". Viele Arbeiten mittels Genomeditierung setzen hier an und verändern die Promotoren dieser Gene, sodass die Bakterien diese nicht mehr kontrollieren können. Ein anderer Ansatz ist, Gene in der Pflanze zu verändern, welche die Bakterien als Co-Faktoren benötigen. Arbeiten zur Bakterienresistenz gibt es bei Zitrusfrüchten (z. B. JIA et al., 2017), bei Reis (z. B. BLANVILLAIN-BAUFUMÉ et al., 2017) und bei Tomate (TOLEDO THOMAZELLA et al., 2016).

TIERISCHE SCHADERREGER/INSEKTEN

2.3.1.10 Klassische Züchtung gegen tierische Schädlinge

Die Züchtung von Sorten mit Resistenz oder Toleranz gegen tierische Schaderreger, i. W. Insekten aber auch Nematoden, ist sehr schwierig und langwierig; einerseits dadurch, dass es an nutzbarer genetischer Variation in Kulturarten und Wildformen mangelt, und andererseits wegen der aufwändigen Methodik. In vielen Fällen steht die Resistenzzüchtung hier noch am Anfang, und es erfordert einen hohen Forschungsaufwand, die Interaktionen zwischen Insekten und Pflanzen, im Hinblick auf den Schutz der Pflanzen, bewerten zu können. So fehlt es im Obstbau gegenüber neuen Schaderregern, wie der Kirschessigfliege *Drosophila suzukii*, an entsprechenden Resistenzen im

⁻

⁷ https://www.agroscope.admin.ch/agroscope/de/home/themen/umwelt-ressourcen/biosicherheit/gv-pflanzen/protectedsite/projekte/cisgene-apfelbaeume-feuerbrandresistenz.html

jeweiligen Genpool der befallenen Kulturpflanzenarten (WÖHNER et al., 2021a). Auch bei den Gemüsekulturen gibt es in einigen Kulturen keine geeigneten Resistenzen, so z. B. bei der Zwiebel und der Möhre, wo Schadinsekten (*Phobia brassicae*, *Meligethes*-Arten) zu erheblichen Schäden führen.

Der Fokus im Ackerbau lag bisher auf der Erforschung von Insekten als Vektoren für Viren, die gerade bei zunehmender Temperatur für Schäden durch Virusbefall indirekt verantwortlich sind. Die Tatsache, dass beinahe jede fünfte (17,8 %) der zugelassenen Winterweichweizensorten in Deutschland als resistent gegen die Orangerote Weizengallmücke beschrieben wird (BRÖKER, 2021), fördert die Erwartung, dass eine effektive Resistenzzüchtung auch gegen weitere Schadinsekten erfolgreich sein kann und sich in Sorten etabliert. Auch andere Kulturen zeigen die Möglichkeit, Resistenzen zu entdecken und nutzbar zu machen. So konnten bei der Erbse erfolgreich Resistenzen gegen den Erbsenblattrandkäfer (BYRNE et al., 2008; ARYAMANESH et al., 2012), bei Salat Resistenzen gegen Nasonovia ribisnigri (Grüne Salatblattlaus) und Pemphigus bursaria (Salatwurzellaus) gefunden und genutzt werden. Allerdings werden diese Resistenzen regelmäßig überwunden. Für die aus einer Wildform übertragenen Nasonovia-Resistenz wurde 2007 der erste Durchbruch durch einen neuen Biotyp der Grünen Salatblattlaus berichtet, in 2009 bestätigt, und in den Folgejahren wurde die Ausbreitung des neuen Biotyps in der Schweiz untersucht (SAUER-KESPER et al., 2011).

Auch eine Pyramidisierung ist möglich und wurde bereits für Blattlausresistenzen gezeigt. So führte z. B. bei *Medicago truncatula* die Pyramidisierung zweier Resistenzgene zu einem additiven Effekt, wobei u. a. Blattlauskolonien der Art *Acyrthosiphon kondoi* kleiner ausfielen als auf Pflanzen mit den jeweiligen Einzelgenen (KAMPHUIS et al., 2019). Im Weinbau sind erste Resistenzen gegen Insekten oder virusübertragende Nematoden in züchterischer Bearbeitung. Auch Resistenzen gegen neue Schaderreger, die in anderen Teilen der Welt zu großen Schäden im Weinbau führen, in Deutschland jedoch noch keine Rolle spielen, sind beschrieben und werden als Präventivmaßnahme mittels klassischer Züchtung genutzt. Als Paradebeispiel ist die Nutzung resistenter Unterlagen im Obst und Weinbau zu nennen, ohne die eine Kultivierung von Reben in Deutschland bedingt durch die Reblaus nicht mehr möglich wäre.

Auch für Resistenzen gegenüber Insekten spielen Pflanzenproteine eine Rolle, welche als Interaktionspartner tierischer Effektoren fungieren. Um abzuschätzen, ob sich ein funktioneller "Knockout" negativ auf die Pflanze auswirkt, bedarf es jedoch Informationen zur physiologischen Funktion der pflanzlichen Zielproteine selbst und zur Interaktion auf molekularer Ebene. Gegebenenfalls muss versucht werden, die Proteinstruktur der Zielproteine dahingehend zu verändern, dass tierische Effektoren nicht mehr binden, physiologische Funktionen aber erhalten bleiben (SCHENKE & CAI 2020). Beispiele für Interaktionspartner von Effektoren liegen für *Myzus persicae* und Kartoffel (Rodriguez et al., 2017) und *Aphis gossypii* und Tomate (Chaudhary et al., 2018) vor. Es zeigt sich, dass Effektoren hierbei spezifisch für die jeweilige Blattlausart und Wirtspflanze sein können (Rodriguez et al., 2017; Boulain et al., 2019). Dies erschwert möglicherweise die Umsetzung dann, wenn viele verschiedene Schaderreger an einer Pflanze auftreten und durch den Wegfall einzelner Schaderreger "ökologische Nischen" frei werden könnten, die dann durch andere Schadinsekten besetzt werden.

2.3.1.11 Transgene Pflanzen gegen tierische Schädlinge

Derzeit wird Insektenresistenz in großen Umfang mittels Einbau eines Transgens erreicht und international auch kommerziell verwertet. Hierbei wird oft auf den Einsatz von natürlichen oder synthetisch erzeugten Bt-Genen zurückgegriffen. Bt-Toxine sind Proteine, welche im Darmtrakt von Insekten ihre toxische Wirkung entfalten. Bt-Präparate werden bereits seit 1938 als

Pflanzenschutzmittel verwendet. Bt-Proteine wirken wirtsspezifisch für unterschiedliche Insektengruppen. Natürlicherweise gibt es mehrere hundert verschiedene Bt-Proteine, von denen bislang nur relativ wenige in gentechnisch veränderten Pflanzen genutzt werden⁸. Durch ihren spezifischen Wirkmechanismus sind Bt-Proteine für Säuger und andere Organismen harmlos. Neben dem Einsatz einzelner Bt-Gene in Pflanzen wird in den letzten Jahren vermehrt auf die Kombination mehrerer Bt-Gene in einer Pflanze zurückgegriffen, um Resistenzbildung zu vermeiden. Derzeit sind in der EU weit mehr als 100 Events (Pflanzenart mit charakteristischer, gentechnischer Modifikation) mit mindestens einer Bt-Insektenresistenz für den Import zugelassen. Das einzige gentechnisch veränderte Event, das in der EU angebaut wird, ist ein Mais (MON810), welcher eine Bt-vermittelte Insektenresistenz gegen den Maiszünsler trägt.

Derzeit ist in der EU ein RNAi-Mais für den Import zugelassen, der eine Resistenz gegen den Maiswurzelbohrer vermittelt. In diesem Mais (MON87411) wird zusätzlich zu einem Bt-Gen ein doppelsträngiges RNA-Konstrukt gebildet, welches ein Gen des Zellhaushaltes der Käferlarve adressiert. Durch die RNAi vermittelte Verringerung der Produktion des entsprechenden Proteins kommt es zur Störung der Entwicklung und zum Absterben der Käferlarven. Durch diese Kombination soll eine schnelle Ausbildung von Resistenz auf Seiten des Käfers gegen einen der beiden Mechanismen verhindert bzw. verlangsamt werden.

2.3.1.12 Genomeditierung gegen tierische Schädlinge

Mit Hilfe von Genomeditierung wären Mutationen in Anfälligkeitsgenen gegen verschiedene Schaderreger denkbar, die dann zu neuen, widerstandsfähigen Sorten mit bekanntem Sortencharakter und bekannten Anbaueigenschaften führen könnten. Allerdings sind in diesem Kontext derzeit noch keine konkreten Arbeiten zu Insektenresistenzen bekannt.

UNKRÄUTER - HERBIZIDTOLERANTE KULTURPFLANZEN

2.3.1.13 Klassische Züchtung und Unkrautbekämpfung

Herbizidtoleranzen bei Pflanzen werden in der Regel durch die Veränderung von Zielproteinen der Herbizide in der Pflanze erzeugt. Dies kann durch klassische Züchtung mittels induzierter Mutagenese (chemisch, physikalisch oder durch Zellkultur) oder das Auftreten natürlicher Mutationen geschehen. Solche durch natürliche Mutationen erzeugte Toleranzen befinden sich in Europa in kommerziell genutzten Sorten bei Raps, Sonnenblume und Reis im Anbau. Sie unterliegen nicht der Anwendung des Gentechnikrechts. Außerhalb der EU werden auch transgene, herbizidtolerante Kulturpflanzen umfänglich angebaut.

2.3.1.14 Transgene Pflanzen und Unkrautbekämpfung

Auch das transgene Einbringen von neuen Enzymen in die Pflanzen ist ein Mittel, um Kulturpflanzen eine Resistenz gegen Herbizide zu vermitteln. Die am häufigsten eingesetzten und international bei Soja, Mais und Raps mit erheblichen Anteilen vermarkteten Herbizidresistenzen richten sich gegen die "Komplementärherbizide" Glyphosat (Roundup) und Glufosinat (LibertyLink). Weitere kommen hinzu oder befinden sich bereits in der Vermarktung (z. B. Sojabohnen mit einer Resistenz gegen Dicamba,

⁸ Die Datenbank EUginius listet sieben Klassen (Cry 1, 2, 9, 14, 34, 35 und 51) in 102 GVO (Stand 16.07.2021) https://euginius.eu/euginius/pages/gmo_searchview.jsf - Suchmaske: "Genetic Element – Coding Sequence – CS Crystal delta-endotoxin"

USA). In der EU sind derzeit 214 transgene Events (Datenbank EUginius) mit mindestens einer Herbizidresistenz für den Import (als Futtermittel) zugelassen.

2.3.1.15 Genomeditierung und Unkrautbekämpfung

Mittels Genomeditierung wurden bereits einige Pflanzen gegenüber Herbiziden toleranter gemacht. Einige dieser Arbeiten fallen ganz eindeutig in den Bereich der Grundlagenforschung, so zum Beispiel die an Kartoffeln (Butler et al., 2016) oder auch an Tomate (Danilo et al., 2019), da Herbizidtoleranz auch ein gutes Markergen für die Grundlagenforschung ist. Andere Arbeiten strebten direkt die Erzeugung von herbizidtoleranten Pflanzen an, so in Flachs, Mais, Raps, Maniok, Soja, Reis, Wassermelone und Weizen (zusammengefasst in Menz et al., 2020). Die adressierten Zielgene sind meist dieselben wie bei der klassischen Gentechnik, aber es wurde kein zusätzliches Gen eingebracht, sondern die vorhandenen, pflanzeneigenen Gene verändert.

2.3.2 Technische Maßnahmen

2.3.2.1 Biologischer Pflanzenschutz

Der biologische Pflanzenschutz setzt zur Regulierung und Bekämpfung von Schaderregern (Krankheiten und tierischen Schädlingen) an Kulturpflanzen natürliche Gegenspieler und Naturstoffe ein. Dabei spielen konservierende (Erhaltung und Förderung von natürlich vorkommenden Nutzorganismen) und augmentative (Massenausbringung von kommerziell produzierten Nützlingen bzw. bei Mikroorganismen und Naturstoffen i. d. R. als formuliertes Pflanzenschutzmittel) Verfahren eine entscheidende Rolle. Im Pflanzenbau wird dabei weitgehend auf die allgemeine Förderung von natürlichen Gegenspielern der Schädlinge oder ihren gezielten Einsatz, auf Lockstoffe und/oder Repellents gesetzt. Auch natürliche Insektizide, Fungizide und Herbizide auf der Basis von Mikroorganismen und Naturstoffen kommen zum Einsatz. Biologische Pflanzenschutzverfahren werden insbesondere in Sonderkulturen (z. B. Obst-, Wein- und Gartenbau) eingesetzt, in großflächigen Ackerbaukulturen finden sie hingegen nur mit Ausnahme (z. B. Bekämpfung des Maiszünslers) Anwendung. Hohe Kosten in der Zulassung und teilweise in der Anwendung stehen häufig der Einführung neuer biologischer Verfahren entgegen. Dennoch hat die Anzahl genehmigter Mikroorganismen und Naturstoffe im letzten Jahrzehnt rapide zugenommen. Die Vorteile des biologischen Pflanzenschutzes liegen in der hohen Spezifität und Wirksamkeit gegenüber Schaderregen mit weniger oder keinen Risiken für Nichtzielorganismen, die Umwelt und den Menschen. Für einen gezielten und effizienten Einsatz biologischer Verfahren bedarf es eines guten Verständnisses über die Interaktion zwischen natürlichen Gegenspielern oder Naturstoffen und Schädlingen, was längerfristige Studien und Untersuchungen nötig macht. Die Umweltverträglichkeit biologischer Verfahren führt auch zum Erhalt und Förderung der biologischen Vielfalt (insbesondere Insekten) im gesamten Agrarökosystem.

Die konservierenden Maßnahmen nutzen Habitatmanagement und den Erhalt und die Förderung natürlich vorkommender Gegenspieler durch eine bewusste Gestaltung des Lebensraumes, die Vielfalt und Häufigkeit natürlich vorkommender Nützlinge sowie des pflanzenassoziierten Mikrobioms. Insbesondere in der Rhizosphäre spielt die Ansiedlung nützlicher Mikroorganismen, wie Bakterien und Pilze, eine wichtige Rolle, da Pflanzenkrankheiten unterdrückt und wachstumsfördernde Effekte für Pflanzen eintreten. Im Bereich der Nützlinge ist die Bereitstellung aller notwendigen Ressourcen, wie Versteckmöglichkeiten, Alternativwirte und ein ausreichendes Angebot an Nektar- und pollenführenden Pflanzen für die Blütenbesucher, wie z. B. Schwebfliegen und parasitoide Wespen, von Bedeutung und ggf. sogar eine notwendige Voraussetzung. Dies kann durch eine vielfältige

Fruchtfolge, durch Polykulturen und durch die Anlage ein- oder mehrjähriger Blühstreifen, Hecken und Brachflächen geschehen.

Bei den augmentativen Verfahren werden Makro- und Mikroorganismen (einschließlich Viren), und Naturstoffe/Botanicals sowie synthetische Signalstoffe (Semiochemicals; z. B. Pheromonverwirrung) ausgebracht. Biologische Pflanzenschutzverfahren sind idealerweise selektiv und beeinträchtigen Nichtzielorgansimen nicht oder wenig (Koch et al., 2019). In der Regel sind die Verfahren jedoch mit höheren Kosten als im chemischen Pflanzenschutz verbunden, während ihre Wirkungsgrade oftmals geringer sind. Als Mikroorganismen kommen sowohl Viren, Bakterien als auch Pilze zum Einsatz (Koch et al., 2019).

Bedeutsam ist das Apfelwicklergranulovirus (CpGV), das auf ca. 10.000 ha in Deutschland eingesetzt wird. Seine Anwendung im ökologischen Kernobstbau bildet eine wesentliche Strategie in der Apfelwickler-Bekämpfung. Es ist in dieser Kultur unverzichtbar und wird durch den Einsatz von Pheromonen unterstützt. Von hoher ökonomischer Bedeutung sind auch verschiedene Stämme des *Bacillus thuringiensis (Bt)*, die durch die Ausbildung von insektenspezifischen Endotoxinen (*Bt*-Toxine) zur Bekämpfung von Larven wichtiger Pflanzenschädlinge (Lepidopteren, Dipteren und Coleopteren) eingesetzt werden. Daneben finden auch Bakterien der Gattung *Pseudomonas* Anwendung. Diese besiedeln die Wurzeln der Kulturpflanzen und erzeugen als natürliche Konkurrenten um Nährstoffe und Raum Schutz vor der Besiedlung durch bakterielle Pflanzenpathogene. Darüber hinaus werden Stämme verschiedener Pilzarten als Gegenspieler von pilzlichen Krankheitserregern und Schadinsekten eingesetzt. Obwohl biologische Pflanzenschutzmethoden eine hohe Resilienz in Bezug auf Resistenzentwicklung haben, kann diese bei augmentativ eingesetzten Mikroorganismen eintreten (SIEGWART et al., 2015).

Auch mithilfe naturstoffbasierter Präparate können bei Kulturpflanzen Krankheitserreger, Schadinsekten und Unkräuter bekämpft werden. Dabei steht dem biologischen Pflanzenschutz eine Palette von Naturstoffen zur Verfügung, die hauptsächlich im Gemüseanbau zum Einsatz kommen. Naturstoffe mit breiter Anwendung basieren auf Neem-Kern-Extrakt und Rapsöl, die beide gegen Schadinsekten wirken, sowie Spinosad, das im Fermentationsprozess mittels eines Bodenbakteriums gewonnen wird und lähmend auf bestimmte Schadinsekten wirkt.

Etwa 90 Nützlingsarten (Makroorganismen) sind in Deutschland kommerziell erhältlich und insbesondere im geschützten Anbau (Gewächshäuser und Folientunnel), vor allem im Gemüse- und Zierpflanzenbau, fest etabliertes Instrument zur Kontrolle von Schädlingen. Zu diesen gehören Raubmilben, räuberische Fliegen und Wanzen, Larven der Florfliegen, parasitoide Wespen (Schlupf-, Brack- und Erzwespen) und insektenpathogene Nematoden. Parasitoide Wespen machen den Großteil der eingesetzten Nützlinge aus, wobei Arten der Erzwespe *Trichogramma* zudem großflächig auch im Freiland (Mais, 2021: ca. 40.000 ha) eingesetzt werden.

In vielen Beispielen zeigen Ansätze des biologischen Pflanzenschutzes im Labormaßstab gute Wirksamkeit, diese lässt sich jedoch nicht ins Feld übertragen. So gibt es im Kartoffelbau die Möglichkeit, Drahtwürmer (*Agriotes* spp.) mit dem entomopathogenen Pilz *Metarhizium brunneum* zu bekämpfen (BRANDL et al., 2017). Im Feld ist die Wirksamkeit unter Befallssituationen jedoch stark schwankend und insgesamt nicht hinreichend. Das ist auch auf die Temperatur- und Feuchteansprüche des Pilzes und die Wirtsspezifität der Pilzstämme zurückzuführen, sodass es bis zu einer breiten Anwendung noch deutlichen Forschungsbedarf gibt.

Weiterer Forschungsbedarf besteht in einer kulturpflanzenspezifischen Integration und Kombination biologischer Pflanzenschutzmaßnahmen und der Resistenzen gegen kritische Pathogene. Ggf. kann biologisches Priming (die Aktivierung der pflanzlichen Immunabwehr durch Mikroorganismen) zu einer

quantitativ verbesserten Stressabwehr gegen verschiedene Pathogene/Schaderreger beitragen, wie in Versuchen an Gerste gegen Zwergrost und Blattläuse gezeigt werden konnte (WEHNER et al., 2019; WEHNER et al., 2021).

2.3.2.2. RNAi als neuer Wirkstoffmechanismus im konventionellen Pflanzenschutz

Die RNA Interferenz(RNAi)-Technologie stellt aktuell aufgrund ihrer potenziell hohen Selektivität und vermutlich geringen Auswirkungen auf Nichtzielorganismen die vielversprechendste Alternative zu chemisch-synthetischen Pflanzenschutzmitteln dar. Hierbei stehen insbesondere die Sprühapplikation von dsRNA-haltigen Lösungen (dsRNA = doppelsträngige RNA) oder aber das Gießen mit solchen im Fokus der Anwendung. Wirkstoffe mit insektizider, viraler oder fungizider Wirkung werden erforscht (SAN MIGUEL & SCOTT, 2016; WORRALL et al., 2019; FLETCHER et al., 2020; TANING et al., 2020). Die hierbei applizierte dsRNA wird abhängig von der Formulierung entweder systemisch entlang der Leitbündel in der Pflanze transportiert und kann so z. B. von Blattläusen aufgenommen werden (BIEDENKOPF et al., 2020), oder sie kann ggf. transdermal mit einer direkten Wirkung in Schädlinge eindringen (YAN et al., 2021).

Auf der Basis unterschiedlicher RNAi-Methoden finden sich bereits vielversprechende Ansätze gegen Schadinsekten wie den Kartoffelkäfer (*Leptinotarsa decemlineata*) oder phytopathogene Pilze wie *Fusarium* oder *Botrytis*. Am Beispiel verschiedener Insektengruppen lässt sich jedoch erkennen, dass Organismen unterschiedlich empfänglich für RNAi sind (Liu et al., 2020). Während Käfer (Coleoptera) generell sehr gut auf RNAi anzusprechen scheinen, ist die Empfänglichkeit in Zweiflüglern (Diptera) und Schmetterlingen (Lepidoptera) wesentlich schwächer ausgeprägt. Zudem ist auch bei der RNAi-Technologie die Entwicklung von Resistenzen nicht ausgeschlossen, wie Laborversuche beim Westlichen Maiswurzelbohrer zeigen (KHAJURIA et al., 2018).

Spritzmittel mit Wirkstoffen auf RNAi-Basis stellen eine neue Klasse von Pflanzenschutzmitteln dar, die für eine nachhaltigere Landwirtschaft große Potenziale aufweist. Die Entwicklung solcher Wirkstoffe findet an der Schnittstelle molekularbiologischer Verfahren und konventioneller PSM-Anwendung (Pflanzenschutzmittel) statt und ist ein sich dynamisch entwickelnder Sektor (MAT JALALUDDIN et al., 2019). Erste Zulassungen für PSM mit diesen Wirkstoffen werden in den nächsten Jahren erwartet. Das Potenzial dieser Mittel für eine nachhaltigere Landwirtschaft liegt in der hohen Spezifität gegenüber den Schaderregern und der geringeren Auswirkungen auf die Umwelt (OECD, 2020). Dem gegenüber steht meist eine geringere und verzögerte Wirksamkeit im Vergleich zu konventionellen Spritzmitteln und offene Fragen hinsichtlich der Formulierung der PSM in Bezug auf die Zulassung solcher Mittel (SCHENKEL & GATHMANN, 2021; DIETZ-PFEILSTETTER et al., 2021).

2.3.2.3 Prognosemodelle und Entscheidungshilfen

Zur Unterstützung der Kontrolle von Schadorganismen wurden diverse Prognosemodelle entwickelt und sind ein Teil der Praxis-Empfehlungen des integrierenden Pflanzenschutzes (s. www.isip.de). Beispielhaft werden hier Prognosemodelle für pilzliche Erreger aufgeführt. Die Negativprognose bei der Bekämpfung von *Phytophthora infestans* bei Kartoffeln (SYMPHYT / SIM BLIGHT) und das Programm SkleroPro zur Vorhersage des Befalls mit *Sclerotinia sclerotiorum* in Raps sind bereits einige Jahre im Einsatz. Sie werden zur Befallsprognose und der gezielten Applikation von Fungiziden genutzt und können dazu beitragen, unnötige Anwendungen zu vermeiden. Allerdings hat die Vorhersagegenauigkeit bei SkleroPro nicht immer zutreffend den Anforderungen der Praxis entsprochen und zum Teil zu nicht befriedigenden Bekämpfungsentscheidungen geführt. Ähnlichen Optimierungsbedarf gibt es bei den Prognosemodellen (z. B. DonCast oder FusOpt) zur Abschätzung des Befalls mit Ährenfusarium und der Erntegutkontamination auf Basis der Toxinbildung, wo die

Vorhersagesicherheit nur bei 75-85 % liegt. Auch für diese Modelle müssen Daten zur Pathogenentwicklung vor dem Infektionszeitpunkt detailliert erfasst und eingepflegt werden. Als Beispiel für ein sehr gut funktionierendes System ist das Prognosemodell CERCBET der ZEPP zur Abschätzung des Auftretens von *Cercospora beticola* in der Zuckerrübe zu nennen. Unterstützt von Daten aus der Feldkontrolle wird auf Basis der Sortenresistenz, der Anbaudichte, der Bodenbearbeitung und der standortbezogenen Witterungsdaten die Befallsvorhersage und die Behandlungsempfehlung ermittelt.

Als weitere Entscheidungshilfen zur Pflanzenschutzplanung dienen Schadschwellenkonzepte. Diese werden genutzt, um unnötige Anwendungen von Pflanzenschutzmaßnahmen zu vermeiden. Dazu sind ein effektives Monitoring von Schaderregern sowie sichere und verlässliche Bekämpfungsverfahren erforderlich. Voraussetzungen für die Anwendung einer Schadschwelle sind zudem Kenntnisse zur Biologie und Schadwirkung des Schadorganismus. Voraussetzungen für die Akzeptanz von Schadschwellen in der Praxis sind die Praktikabilität der Anwendung sowie eine ausreichend sichere Vorhersagegüte der Schadensereignisse. Grundsätzlich beruhen viele Schadschwellen auf Erfahrungswerten und Expertengesprächen und nicht immer auf wissenschaftlich kausalen Modellen und Evidenzen (RAMSDEN et al., 2017). So können Schadschwellen, die teils Jahrzehnte alt sind, nicht geeignet sein, die Kompensationsfähigkeit moderner Sorten einerseits, aber auch neue Stresssituationen andererseits richtig abzubilden. Neue Verfahren der Bilderkennung und Künstliche Intelligenz (KI) bieten großes Potenzial einer breiten Datenerhebung und können helfen, Schadschwellen zu validieren.

2.3.2.4 PSM-Resistenzmonitoring

Die Resistenz von Schadorganismen gegen verschiedene Gruppen von Pflanzenschutzmittel nimmt seit Jahrzehnten stetig zu (BOREL, 2017; Lucas et al., 2015). Ein proaktives Resistenzmonitoring kann helfen, die Verfügbarkeit wirksamer Pflanzenschutzmittel zu verlängern und die Ausbringung nicht wirksamer Pflanzenschutzmittel zu vermeiden (R4P Network 2016). In Deutschland sind Pyrethroidresistenzen von verschiedenen Rapsschädlingen weit verbreitet (HEIMBACH & MÜLLER, 2013; BRANDES & HEIMBACH, 2019). Die Grüne Pfirsichblattlaus (*Myzus persicae*) ist als wichtigster Virenvektor aufgrund sich entwickelnder Resistenzen gegen Insektizide aus den Gruppen der Pyrethroide und der Carbamate sowie auch neuerdings bei den Neonikotinoiden nur noch schwer zu bekämpfen. Ähnliches ist auch bei der Großen Getreideblattlaus (*Sitobion avenae*) gegen Pyrethroide zu beobachten. Auch die Kontrolle von Unkräutern wie dem Ackerfuchsschwanz (*Alopecurus myosuroides*) oder verschiedenen Trespenarten (*Bromus* spp.) durch Herbizide ist von Resistenzentwicklungen erheblich betroffen.

2.3.2.5 Mechanische Unkrautbekämpfung

Mechanische Verfahren der Unkrautbekämpfung (Striegeln, Hacken) wurden durch zahlreiche technische Innovationen weiterentwickelt, durch neue Technologien ergänzt (Hackroboter, Nutzung von Sensoren und KI) und befinden sich derzeit in Erprobungen. Der Einsatz von Striegeln ermöglicht eine ganzflächige Unkrautkontrolle in verschiedenen Kulturen. Bei Striegelgeräten wurde insbesondere die exakte Tiefenführung und Federung der Zinken verbessert, durch die eine höhere Wirkung bei der Unkrautbekämpfung erreicht wurde. Sensoren an den Zinken können die Arbeitstiefe erfassen und ggf. korrigieren.

Hackgeräte können in Reihenkulturen wie Zuckerrüben oder Mais eingesetzt werden, um die Unkräuter zwischen den Reihen zu bekämpfen und ggf. mit einer Bandapplikation von Herbiziden in der Reihe kombiniert werden. Durch eine automatische Reihenführung und Lenksysteme der Hackmaschine wird eine möglichst hohe Kontrolle der Unkräuter bei gleichzeitig geringen

Kulturpflanzenverlusten angestrebt. Hackgeräte, wie Fingerhacke, Rollstriegel oder Torsionshacke, ermöglichen zudem eine Unkrautkontrolle auch innerhalb der Kulturreihen. Bei einem Einsatz im frühen Wachstumsstadium der Unkräuter, unter optimalen Bodenbedingungen, können mit den unterschiedlichen Hackgeräten Wirkungsgrade von bis zu 80-90 % erreicht werden, was aber z. B. in Zuckerrüben nicht ausreichend wäre. Üblicherweise reicht ein einmaliger Arbeitsgang nicht aus, um die Verunkrautung eines Kulturpflanzenbestandes unterhalb der Schadschwelle zu halten.

Zur Unkrautbekämpfung in Reihenkulturen wie Zuckerrüben oder Gemüse werden zudem verschiedene Robotersysteme zur Unkrautkontrolle entwickelt (Wu et al., 2020). Diese Systeme erfassen z. B. bei der Aussaat den Ablageort des Saatgutes digital und entfernen später die Unkräuter mechanisch basierend auf den Informationen des Pflanzenstandortes. Erste Praxiseinsätze zum Beispiel im biologischen Zuckerrübenanbau zeigen, dass die Handarbeitszeit zur Unkrautbekämpfung im Optimalfall von 100 auf 20 Stunden pro Hektar reduziert werden könnte. Andere Robotertypen unterscheiden die Unkräuter von den Kulturpflanzen mit Hilfe eines Kamerasystems und steuern auf dieser Grundlage die entsprechenden Werkzeuge zur Unkrautentfernung oder setzen eine präzise, punktuelle Herbizidapplikation ein.

2.3.2.6 Precision Farming und teilflächenspezifischer Pflanzenschutz

In der landwirtschaftlichen Praxis werden Ackerbaukulturen häufig flächendeckend mit Herbiziden behandelt, um Ertrags- und Qualitätseinbußen zu verhindern. Diese Herbizide sind in ihrer Effektivität nicht einfach zu ersetzen. Allerdings sind auf vielen Flächen das Unkrautvorkommen und die Unkrautdichte sehr heterogen verteilt und bestimmte Arten treten nesterweise auf (CARDINA et al., 1997). Bei der Anwendung von Schadschwellenkonzepten ergeben sich Bereiche auf der Ackerfläche, die eine Unkrautbekämpfung erfordern, während in anderen Bereiche eine Behandlung ökonomisch nicht sinnvoll wäre. Zur Biodiversitätsförderung kann es weiterhin erwünscht sein, Teile einer Ackerfläche von der Behandlung auszunehmen (IZQUIERDO et al., 2009), wenn dort z. B. seltene Arten wachsen, die den Ertrag der Fläche aber nur marginal verringern.

Vor diesem Hintergrund wurden in der Vergangenheit zahlreiche Konzepte entwickelt, um die Behandlung mit Herbiziden auf ausgewählte Teilflächen zu begrenzen oder gar Einzelpflanzen mit der Applikationstechnik Spotspraying zu behandeln (LATI et al., 2021). Diese Verfahren können zukünftig die ausgebrachte Herbizidmenge deutlich reduzieren, da nur noch in Bereichen appliziert wird, wo es erforderlich ist. Die moderne Applikationstechnik verfügt teilweise heute schon über alle notwendigen Werkzeuge, um diese Verfahren entscheidend weiterzuentwickeln. In Reihenkulturen etabliert sich zunehmend der Einsatz von Sensoren, die Unkräuter zwischen den Reihen erkennen, die so gezielt bekämpft werden können. Weiterhin lassen sich Teilbreiten und Einzeldüsen mit Hilfe von Satellitendaten und Applikationskarten präzise schalten, um in vorher definierten Bereichen eine Herbizidmaßnahme durchzuführen. Allerdings ist die Erstellung solcher Applikationskarten derzeit noch verhältnismäßig aufwendig. Ergebnisse aus der Forschung zeigen aber, dass der Einsatz von Drohnen helfen kann, die Kartenerstellung zu vereinfachen. Eine weitere Herausforderung besteht darin, die Erkennung der Unkrautart mit Sensoren am Feldspritzgerät zu verbessern. Hierbei kann zukünftig künstliche Intelligenz zur Objekterkennung einen wichtigen Beitrag leisten.

2.3.3 Anbaumaßnahmen

2.3.3.1 Fruchtfolge

Der Anbau verschiedener Kulturarten ist die effektivste Methode des vorbeugenden Pflanzenschutzes; diese sollten sich in ihren Anbaumerkmalen jedoch deutlich unterscheiden und/oder deutlich

unterschiedliche Anforderungen an ihr Habitat stellen. So unterbricht der Wechsel von Winterungen und Sommerungen den Lebenszyklus vieler Schadorganismen, insbesondere von Unkräutern. Eine erweiterte Fruchtfolge ist beispielsweise ein wichtiges Instrument beim Management von herbizidresistentem Ackerfuchsschwanz (*Alopecurus myosuroides*) (Zeller et al., 2021). Auch fruchtartenspezifische Schadorganismen lassen sich effektiv durch Fruchtfolgemanagement bekämpfen. So können enge Getreidefruchtfolgen durch Blattfrüchte wie Raps, Zuckerrüben und Leguminosen aufgelockert werden (Böhm et al., 2020; Andert et al., 2016), weil das standortgebundene Inokulumpotenzial deutlich reduziert und eine Übertragung durch Zwischenwirte (z. B. Ausfallgetreide) vermieden wird. Durch die oberirdische Diversität wird auch die Diversität der Organismengemeinschaft im Boden gefördert. Dadurch entstehen weitere Synergieeffekte für Pflanzenschutz und weitere Ökosystemleistungen (z. B. Nährstoffeffizienz).

Im Maisanbau kann die Verbreitung des Westlichen Maiswurzelbohrers (*D. virgifera*) durch die Unterbrechung des Maisanbaus effektiv unterbunden werden. Dagegen lassen sich bodenbürtige Schaderreger wie Kohlhernie (*Plasmodiophora brassicae*) mit langlebigen Dauersporen durch Fruchtfolge nur regulieren, wenn konsequent auf ausreichende Anbaupausen der Wirtspflanzen (*Brassica* spp.) geachtet wird, was eine strenge Unkrautregulierung und den Verzicht auf Zwischenfrüchte aus dieser Wirtsfamilie beinhaltet (ZAMANI-NOOR & RODEMANN, 2018). Auch eignen sich Fruchtfolgen nur begrenzt, um Schadorganismen mit hoher Mobilität, wie z. B. die meisten Schadinsekten, zu bekämpfen.

2.3.3.2 Untersaaten

Eine Integration von Untersaaten in die Fruchtfolge kann landwirtschaftliche Erträge sichern und gleichzeitig verschiedene Ökosystemleistungen erbringen. Dabei beeinflusst die Einbindung von Untersaaten den Lebenszyklus von Unkräutern durch eine Hemmung der Keimung, des Wachstums und der Samenproduktion. Dies ist eine Folge der Konkurrenz zwischen Untersaat und Unkräutern um die begrenzten Ressourcen Licht, Wasser, Platz und Nährstoffe, wobei auch allelopathische Effekte eine Rolle spielen können. Somit kann der Anbau von Untersaaten insgesamt zu einer schnelleren Bodenbedeckung führen, wodurch eine gute Unkrautunterdrückung und Schutz vor Erosion und Verdunstung möglich ist. Die Etablierung von Untersaaten zur Reduktion von Schadinsekten führt zu einer Diversifizierung des Agrarökosystems und soll Schadinsekten so das Auffinden und Erkennen von potentiellen Zielpflanzen, d.h. den jeweiligen Kulturpflanzen, erschweren (ADAMCZEWSKA-SOWIŃSKA et al., 2009). Zudem können Untersaaten, ähnlich wie Blühstreifen, Schädlingsantagonisten Rückzugsmöglichkeiten oder Nahrung bieten. Im Bereich der Ackerbaukulturen liegen bezüglich der Schadinsektenkontrolle durch Untersaaten nur wenige belastbare Daten vor, die Wirksamkeit ist aber für unterschiedlichen Gemüsekulturen und Schadinsektengruppen belegt (C.F. KOŁOTA & ADAMCZEWSKA-SOWIŃSKA, 2013). Der Untersaatenanbau kann den Schadinsektenbefall, etwa durch adulte Erdflöhe, im Raps reduzieren (Breitenmoser et al., 2020). Zudem können Begleitpflanzen den Schneckenfraß an den Kulturpflanzen vermindern.

Der Einsatz von Untersaaten kann auch zu Konkurrenz um pflanzenverfügbares Wasser führen. Des Weiteren sind Untersaaten oft nur eingeschränkt mit Herbiziden vereinbar und dürfen das spätere Erntegut nicht kontaminieren.

2.3.3.3 Blühstreifen

Unterschieden werden einjährige und mehrjährig angelegte Blühstreifen oder Blühflächen, welche meist an den Ackersäumen etabliert werden. Durch eine gezielte Pflanzenauswahl (hinsichtlich funktioneller Merkmale) und Artzusammensetzung können diese speziell für Bestäuber oder

Schädlingsantagonisten konzipiert werden (van Rijn & Wäckers, 2016; Schmidt et al., 2020; Hatt et al., 2020). Diesen bieten sie Nahrung, Rückzugsmöglichkeiten, Überwinterungshabitate oder Eiablageorte (ALBRECHT et al., 2020). Mehrjähre Blühstreifen ermöglichen eine Populationsentwicklung über längere Zeiträume und unterstützen so Arten mit langsamer Verbreitung. Bei heimischen Wildpflanzen zeigt Erhöhung der Diversität (SCHMIDT et al., 2020). zudem eine Ökosystemdienstleistungen, wie Bestäubung und Schädlingskontrolle, durch Ansiedlung natürlicher zeigen sich über eine Vielzahl von Regionen, Pflanzenzusammensetzungen hinweg (ALBRECHT et al., 2020). Beispielsweise konnte bei der Kartoffel eine Reduktion von Blattläusen und im Getreide zudem von Getreidehähnchen beobachtet werden (TSCHUMI et al., 2016; TSCHUMI et al., 2015; TOIVONEN et al., 2018). Die Reichweite der Schaderregerregulierung ist jedoch limitiert und nimmt exponentiell mit der Entfernung zum Blühstreifen ab (ALBRECHT et al., 2020).

Bei der Etablierung ist auf die Zusammenstellung der Arten hinsichtlich deren Einfluss auf Folgekulturen zu achten, um negative Effekte wie Verunkrautung oder Förderung von Schädlingen zu minimieren. Kreuzblütler (*Brassicaceae*) sollten z. B. in Rapsanbauregionen vermieden werden, um Rapsschädlingen und -krankheiten keine zusätzlichen Vermehrungsmöglichkeiten zu geben, oder Blühstreifen sollten auf Schlägen mit bereits bestehenden Mäuseproblemen vermieden werden, da sie geschützte Rückzugsgebiete darstellen können.

2.3.3.4 Nachernte- und Bodenbearbeitung

Die Bodenbearbeitung stellt ein Verfahren zu Bekämpfung pilzlicher Schaderreger und Schadinsekten dar. Eine Pflugfurche vergräbt pilzliches Inokulum und kann in engen Getreidefruchtfolgen den Druck durch Blattkrankheiten in der Folgekultur reduzieren (ANDERT et al., 2016). Ebenso kann so der Schlupf von Überdauerungsformen von Schadinsekten im Folgejahr reduziert werden. Beispielsweise senkt eine wendende Bodenbearbeitung den Überwinterungserfolg der Rübenmotte (*Scrobipalpa ocellatella*) und eine intensive mechanische Bearbeitung der Maisstoppel den des Maiszünslers (*Ostrinia nubilalis*). Die Beseitigung von Ernteresten und ein gut abgesetztes Saatbeet sind wichtige, vorbeugende Maßnahmen gegen Schneckenbefall. Die Beseitigung von Unkräutern und Ausfallgetreide /-raps unterbricht "Grüne Brücken", z. B. für Blattläuse als Virusvektoren und für Nematoden. Zu beachten ist jedoch die Wechselwirkung mit der Störung der Bodenstruktur bei zu intensiver Bodenbearbeitung. Somit ist eine wendende Bodenbearbeitung in Bezug auf den jeweiligen Schädling, den Wasserhaushalt und die Erosionsanfälligkeit ein ambivalentes Verfahren (s. a. Kap 2.4).

2.3.3.5 Aussaat

Die Aussaat richtet sich in der Praxis nach den Witterungsbedingungen in einzelnen Jahren sowie nach der personellen und technischen Ausstattung einzelner Betriebe. Zudem soll die mögliche Vegetationszeit für eine optimale Ertragsbildung möglichst ausgeschöpft werden. Die Wahl des Aussaattermins hat jedoch entscheidenden Einfluss auf die Exposition empfindlicher Stadien der Kulturpflanzen gegenüber diversen Schaderregern. So verringern Spätsaaten von Wintergerste (Hordeum vulgare) die Gefahr der Übertragung vom Gerstengelbverzwergungsvirus (BYDV) durch Blattläuse sowie den Befall durch Fritfliegen (Oscinella frit). Desgleichen sind Frühsaaten von Winterraps (Brassica napus) besonders durch die Kleine Kohlfliege (Delia radicum) gefährdet und erhöhen die Gefahr von Infektionen mit Kohlhernie (Plasmodiophora brassicae). Spätsaaten von Wintergetreide, insbesondere Winterweizen, sind zudem wirksam, um den Auflauf von Ackerfuchsschwanz (Alopecurus myosuroides) zu reduzieren (Zeller et al., 2021).

Andererseits sind ausreichend warme Bodentemperaturen und wüchsige Bedingungen förderlich für ein schnelles Auflaufen und das Jugendwachstum von Kulturen und somit ein wichtiges Instrument gegenüber Auflaufkrankheiten und Schädlingen. Beispielsweise ist Mais (*Zea mays*) nur kurz nach dem Auflauf für Schäden durch die Fritfliege empfindlich.

Über die Aussaatdichte und Aussaattechnik werden die Startbedingungen für das Wachstum der Kulturpflanzen festgelegt. Durch eine insgesamt geringere Bestandsdichte verändert sich das Mikroklima, sodass pilzliche Infektionen möglicherweise gehemmt werden. Aussaattechniken, wie die Gleichstandsaat, sollen jeder Pflanze optimale Standraumbedingungen verschaffen und so auch einen früheren Bestandschluss und eine bessere Unkrautunterdrückung erreichen. Auch können die optimal entwickelten Einzelpflanzen bei der Gleichstandsaat eine intensivere Unkrautbekämpfung und somit Herbizideinsparungen bedeuten (KOTTMANN et al., 2019). Gerade im Getreideanbau kann die Technik auch das Auftreten von Halmbasis- und Blattpathogenen, wie z. B. Oculimacula yallundae oder Zymospetoria tritici, deutlich vermindern. Da es aber starke Unterschiede bzgl. des Effektes der Gleichstandsaat zwischen den Sorten gibt, hat sich das Verfahren noch nicht etabliert (RODEMANN, 2020). Um Befallsdruck und Krankheitsausbreitung zu minimieren, könnte die Aussaat von Sortenmischungen gekoppelt mit der Aussaattechnik zukunftsweisend sein.

2.4 Nachhaltige Nährstoffversorgung der Kulturpflanzen

Im Hinblick auf eine optimierte Nährstoffeffizienz in der Landwirtschaft stellt die größte Herausforderung eine bedarfsgerechte Düngung dar, damit Nährstoffausträge, zumeist Stickstoff (N), Phosphor (P) und Kalium (K) in die Umwelt vermieden werden (CORMIER et al., 2013; STAHL et al., 2017; Voss-Fels et al., 2019). Eine bedarfsgerechte und präzise Düngung ist sowohl mit organischen wie anorganischen Düngern essentiell, um das Ertragspotenzial der angebauten Kulturen auszuschöpfen, die für den Markt erforderlichen Produktqualitäten sowie Pflanzen mit einer hohen Widerstandskraft gegenüber biotischen und abiotischen Stressfaktoren zu erzeugen (LFL, 2018; LWK NI, 2018; VDLUFA, 2018; AID, 2015; 2016; DATNOFF et al., 2007). In das novellierte Düngegesetz (DÜNGG, 2017) wurde als Zweckbestimmung aufgenommen, dass ein nachhaltiger und ressourceneffizienter Umgang mit Nährstoffen bei der landwirtschaftlichen Erzeugung sicherzustellen ist und Nährstoffausträge in die Umwelt so weit wie möglich zu vermeiden sind.

Das ambitionierte Vorhaben, Nährstoffausträge zu vermeiden, lässt sich auch bei Einhaltung und Umsetzung der Düngeverordnung nachhaltig nur durch den Einsatz aller verfügbaren Werkzeuge erreichen. Einen Beitrag können Düngemittel mit innovativer und emissionsarmer Anwendungs- und Ausbringungstechnologie leisten sowie eine züchterische Anpassung der Nutzpflanzen bzgl. erhöhter Nährstoffeffizienz.

Ein zentrales Element ist zudem der Erhalt der Bodengare: Ein humoser Oberboden ist der beste Garant für eine gute Bodenfruchtbarkeit, so dass dem Erhalt der Humusbestandteile im Boden und ihrem Aufbau in humusverarmten Böden eine besondere Bedeutung zukommt. Die Gestaltung der Bodenbearbeitung (Tiefe, Intensität, Standort) wird aber kontrovers diskutiert. Ein hoher Bodenbedeckungsgrad, eine tiefe Durchwurzelung, ein optimaler Humusgehalt und eine hohe biologische Bodenaktivität schaffen ein gutes und stabiles Bodengefüge zur Wasserinfiltration und speicherung sowie für das Wurzelwachstum. So wird die Gefahr von Oberflächenverschlämmung und Bodenerosion vermindert und letztlich die Voraussetzung für ein hohes und nachhaltiges Ertragspotenzial geschaffen.

REDUKTION DER ANORGANISCHEN/ORGANISCHEN DÜNGUNG

2.4.1 Züchterische Maßnahmen zur Reduktion der Düngung

Im Bereich der verbesserten Nährstoffeffizienz geht es maßgeblich um die Verwertung von Stickstoff in den Pflanzen, aber auch die Phosphat- und Kaliumaufnahme und -verwertung spielen eine Rolle. Stickstoff liegt in anorganischer Form im Wesentlichen als Ammonium (NH4⁺) oder Nitrat (NO3⁻) vor. Die N-Effizienz ist abhängig von der Aufnahme, dem internen Transport, der Verfügbarkeit und der Remobilisierung des Stickstoffes aus verwelkenden Pflanzenteilen oder der Umschichtung, wenn zum Beispiel beim Weizen die Pflanze in die Phase der Körnerfüllung übergeht. Der gesamte Vorgang der Nitratverarbeitung wird auch als Nitrat-Verwertungseffizienz bezeichnet (nitrate use efficiency, NUE). Die NUE wird an den unterschiedlichen Punkten des Stoffwechsels durch verschiedene Gene bzw. deren Proteine gesteuert und unterliegt häufig starken Rückkopplungen. Ziel der Pflanzenzüchtung muss es sein, Pflanzen zu erzeugen, die eine verbesserte Verwertung von Stickstoff als Eigenschaft besitzen.

Mit dem Beginn der Einführung des "Greenings" hat sich der Anbau der Leguminosen - i. W. Ackerbohne (*Vicia faba* L.), Erbse (*Pisum sativum* L.), Lupine (*Lupinus* spp.) und Sojabohne (*Glycine max* (L.) MERR.) - in Deutschland von 92.000 ha (2014) auf 196.000 ha (2019) mehr als verdoppelt (https://www.bmel-statistik.de/fileadmin/daten/SJT-3070500-0000.xlsx). Aufgrund ihres geringeren Ertragsniveaus und niedrigerer Marktpreise führt ihr Anbau meist zu Wettbewerbsnachteilen

gegenüber Alternativkulturen. Eine Ausnahme stellt dabei die Sojabohne dar. Obgleich ihrem Anbau in Europa klimatische Grenzen gesetzt sind, wird der Sojabohne ein beträchtliches Entwicklungspotenzial bestätigt (DE VISSER et al., 2014). So wurden und werden neue Sorten entwickelt, die auch in kühleren Regionen mit kürzerer Vegetationszeit und geringeren Wärmesummen angebaut werden können (ZIMMER et al., 2016; vgl. 2.2. Züchtung). In diesem Bereich bestehen große potenzielle Synergien, da durch gezielte Züchtung mit Hilfe von Genomeditierung die Anpassung der Sorten erheblich beschleunigt werden könnte.

2.4.1.1 Transgene Pflanzen

Als Hauptproteine der Nitrataufnahme wurden durch zahlreiche Forschungsarbeiten bisher Nitrat-Transporter (NRT), Peptid-Transporter (PTR), Ammonium-Transporter (AMT) sowie verschiedene Transkriptionsfaktoren identifiziert (Übersicht in Karunarathne et al., 2020 und Tiwari et al., 2020a; b). Die größten Effekte in der Verbesserung der Nutzungseffizienz waren dabei bei der Veränderung der Transportkapazität zu beobachten (Li et al., 2020). So konnte durch die Überexpression von Nitrattransportern als transgener Ansatz die NUE in Reis um 15 % (NRT1.1B) bzw. sogar um 50 % (NRT1.1A) erhöht werden (Hu et al., 2015; Wang et al., 2018). Darüber hinaus wurde beschrieben, dass micro RNAs eine regulatorische Rolle im Nitratstoffwechsel spielen. Zum Beispiel verbessert die Expression der miR166 micro RNA die Aufnahme und den Transport von Stickstoff in der Reispflanze (IWAMOTO & TAGIRI, 2016). Ansätze, die Fähigkeit zur Fixierung des Luftstickstoffes in Leguminosen auf Kulturpflanzen zu übertragen, sind noch im Forschungsstadium, z. B. Allen et al. (2017). Gleichwohl stellt die Förderung von vergesellschafteten Mikroben einen weiteren Ansatz dar, die Stickstoffaufnahme aus dem Boden zu verbessern (Kumar & Dubay, 2020).

Im Bereich der Verwertung des Nitrats spielen verschiedene Synthetasen eine wichtige Rolle (z. B. Asparagin-, Glutamin-Synthetasen) sowie wiederum Transkriptionsfaktoren (z. B. MADS25, NAC2) und micro RNAs (Übersicht in IWAMOTO & TAGIRI 2016; ZHONG et al., 2015). In einer aktuellen Metastudie konnten LI et al. unter anderem herausarbeiten, dass die Expression von N-Transportern durch Gentechnik die NUE im Bereich der Wurzel erhöht und gleichzeitig im Bereich der Körner senkt (LI et al., 2020). Dies wäre vorteilhaft, da normalerweise ein erhöhter Kornertrag z. B. beim Weizen mit niedrigerem Stickstoffgehalt in den Körnern einhergeht, sodass die Körner selbst weniger nahrhaft werden. Eine reduzierte NUE in den Körnern könnte dies vermeiden.

Pflanzen legen aufgenommenes Phosphat oft als Speicherprodukt fest, dem Phytin. Dieses entzieht das aufgenommene Phosphat der Verfügbarkeit durch andere Organe, es fixiert zudem als Anion auch Kationen, die dem Organismus dann nicht mehr zur Verfügung stehen. Phytin kann von Nutztieren nicht aufgeschlossen werden und das dort gebundene Phosphat geht mit dem Dung verloren. Da die Phosphatdüngung diese Verluste bislang kompensieren muss und der ungewollte Abfluss zur Eutrophierung der Gewässer beiträgt, werden verschiedene gentechnische Ansätze zur Reduktion der Bildung von Phytin verfolgt. Hier wird durch Expression von Phytin-abbauenden Enzymen (Phytasen) versucht, der Phytinbildung entgegenzuwirken (REDDY et al., 2017).

Im Bereich der Aufnahme und Verarbeitung von Phosphat ist wesentlich weniger Forschungsarbeit durchgeführt worden als zum Nitratstoffwechsel. Es ist allerdings seit langem bekannt, dass die Stoffwechselwege von Nitrat und Phosphat eng miteinander verzahnt sind, sodass bei Mangel des einen auch die Aufnahme des anderen leidet und umgekehrt (GONG et al., 2020). Im Bereich des Phosphats sind auch hier P-Transporter (PHT-Familie und PHO; LIU et al., 2017) und Transkriptionsfaktoren (z. B. MYB-CC und PHR) entscheidend für eine verbesserte Phosphataufnahme und Nutzung. Hinzu kommen bisher bekannte Repressor-Proteine (PHX-Familie, Lv et al., 2014), die bei

Phosphatmangel abgebaut werden, so dass sich die Aufnahme effizienter gestaltet. Durch Überexpression eines bestimmten P-Transporters (PHT1;7) in Kartoffel konnte gezeigt werden, dass das Wurzelwachstum sowohl unter Phosphatmangel als auch bei normalen Phosphatbedingungen zunimmt, gleichzeitig wurde eine erhöhte Resistenz gegen Trockenheit beobachtet (CAO et al., 2020). Diese Daten legen nahe, dass die Wurzelmasse entscheidend für eine verbesserte Phosphataufnahme ist und ebenfalls die Wasseraufnahme verbessert. Yan et al. konnten ebenfalls durch Überexpression eines P-Transporters (PT6) in Sojabohne zeigen, dass diese resistenter gegen Stresserscheinungen auf Grund von P-Mangel wird (YAN et al., 2014). Es kann allerdings aus diesen Beispielen nicht verallgemeinert werden, dass alle P-Transporter die gleichen Effekte zeigen, da sie zum Teil auch negative Auswirkungen auf die Pflanze haben, indem zum Beispiel ein P-Überschuss erzeugt wird und die Pflanzen Symptome von Seneszenz zeigen (LAPIS-GAZA et al., 2014; YE et al., 2015). Zusammenfassend lässt sich sagen, dass im Bereich Phosphataufnahme und -verwertung ein erheblicher Forschungsbedarf besteht. Diese Kenntnisse sind notwendig, um die Grundlagen für eine gezielte Züchtung von Pflanzen zu ermöglichen, die eine verbesserte Phosphatverwertung aufweisen. Gentechnische Ansätze zur Verbesserung der Kalium Nutzungseffizienz konzentrieren sich auf die Verbesserung der Wurzelarchitektur, verstärkte Kaliumaufnahme und die Translokation von Kalium zu Geweben mit hohem Bedarf (WANG & WU, 2015). Kaliumtransporter sind auch in die Salztoleranz verschiedener Spezies einschließlich Reis involviert (ANWAR & KIM, 2020).

2.4.1.2 Genomeditierung

Die meisten Arbeiten wurden bisher mit transgenen Techniken durchgeführt, in den letzten Jahren wurde jedoch auch mit Hilfe von Base Editing und Genomeditierung versucht, die NUE zu verbessern. Eine Gruppe konnte dabei einen direkten Allelaustausch eines Nitrat-Transporters in Reis erfolgreich durchführen. Hierbei wurde der weniger effiziente Nitrat-Transporter NRT1.1B aus Japonica-Reis durch Homologie gerichtete Reparatur mit dem effizienteren NRT1.1B aus Indica-Reis direkt ausgetauscht (LI et al., 2018). Ein weiteres sehr vielversprechendes Gen heißt ARE1, ein Repressor eines weiteren Gens (ABC-1). Seine gezielte Ausschaltung durch Genomeditierung führte in Weizenpflanzen zu einer verbesserten NUE sowie verzögerter Alterung, wodurch das Korngewicht in Feldversuchen um 10-15 % zunahm (ZHANG et al., 2021). Die anderen agronomischen Eigenschaften der untersuchten Linien waren vergleichbar mit der nicht mutierten Linie.

Generell wurden die meisten Forschungsarbeiten bisher an Reis, Mais, Weizen und *Arabidopsis* durchgeführt und nur wenige im Bereich anderer Nutzpflanzen. Die Arbeiten sind bereits zusammengefasst und in einer umfangreichen Metastudie bewertet worden, sie befinden sich demnach im fortgeschrittenem Stadium (siehe Li et al., 2020). Bezüglich Kartoffel gibt es eine neuere Arbeit, die zumindest nahelegt, dass die Erkenntnisse aus Gräsern und *Arabidopsis* auf andere Kulturpflanzen übertragen werden können (Tiwari et al., 2018). Von dieser Gruppe wurden RNAseqund Transkriptomanalysen durchgeführt mit dem Ergebnis, dass sie zahlreiche potentielle Zielgene für die Veränderung des Stickstoffhaushaltes der Kartoffel finden konnten (Tiwari et al., 2020a, b). Auch in der Phosphatversorgung gab es durch Genomeditierung züchterische Fortschritte. So gelang es, Gene in Raps so zu blockieren, dass die Bildung von Phytin reduziert wurde (SASHIDHAR et al., 2020).

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass sich große Gewinne bezüglich Nährstoffeffizienz durch eine verbesserte Nitrataufnahme und nachfolgende Verwertung in den Pflanzen erreichen ließen. Dies kann durch die Züchtung neuer Sorten, die eine verbesserte NUE zeigen, erreicht werden, was allerdings sehr lang dauern kann. Moderne Züchtungstechniken wie Präzisionszüchtung, Gentechnik mit Transgenen und NMT ohne Transgene können den Züchtungsvorgang deutlich beschleunigen und

somit schneller Synergien mit ackerbaulichen Maßnahmen entfalten. Gerade im Bereich polyploider Pflanzen (z. B. Kartoffel und Weizen) sind konventionelle Züchtungsfortschritte erst in sehr langen Zeiträumen denkbar, durch Einsatz von NMT ist hier ein erheblicher Zeitgewinn vorauszusehen.

2.4.2 Technische Maßnahmen zur Reduktion der Düngung

Eine Erhöhung der Nährstoffeffizienz der Düngung ist dringend erforderlich. Dies gilt insbesondere für die Nährstoffausnutzung organischer Düngemittel durch Anpassung der Mengen an den tatsächlichen Pflanzenbedarf der Kulturen im Herbst, emissionsarme Ausbringungstechnik und Aufbereitung der Wirtschaftsdünger einschließlich Gärrückständen. Von zentraler Bedeutung ist die sachgerechte Ermittlung des standortspezifischen Düngebedarfes, der von dem Bedarf der Kulturpflanzen, den Standortfaktoren, der Wasserversorgung, der Nährstoffnachlieferung aus dem Boden durch biologische Aktivität, der vorangegangenen organischen Düngung und der Vorfrucht abhängt. Neben der bedarfsgerechten Düngung fließen standortspezifische und kulturartabhängige Risiken von Nährstoffverlusten in die Beurteilung ein. Das Instrumentarium zur Ermittlung der bedarfsgerechten Düngung wird mit der 2020 geänderten Düngeverordnung (DÜV, 2017) vorgegeben, die auch die Düngung nach guter fachlicher Praxis regelt (BLE, 2018) und wesentlich der Umsetzung der EG-Nitratrichtlinie dient (91/676/EWG).

Die Herausforderung, insbesondere für organische Düngemittel, besteht darin, eine hohe Nährstoffverfügbarkeit bei gleichzeitig geringen gasförmigen N-Verlusten zu gewährleisten. Probleme resultieren aus einer regional konzentrierten Tierhaltung, der Förderung von Biogasanlagen und einseitigen Fruchtfolgen. Der Transport von flüssigen Wirtschaftsdüngern ist aufgrund geringer Nährstoffkonzentrationen über größere Entfernungen kaum wirtschaftlich, was häufig zur Ausbringung in unmittelbarer Nähe der Erzeugung und regional erhöhter Belastung führt.

Die novellierte Düngeverordnung (DÜV, 2017, zuletzt geändert 2020) trägt durch die Einbeziehung aller organischen und organisch-mineralischen Düngemittel sowie durch die Pflicht zur Ermittlung des Düngebedarfs an N und P (§§ 3 und 4 DÜV), ergänzt durch fruchtart-, ertrags- und standortspezifische verbindliche Richtwerte und Obergrenzen (Anlagen 4 und 7 DÜV), dazu bei, Nährstoffüberschüsse zu verringern. Dies kann in Regionen mit hohem Viehbesatz und zahlreichen Biogasanlagen zu einem erhöhten Flächenbedarf für die Ausbringung von organischen Düngemitteln führen. Im Hinblick auf die Nährstoffbilanzen ist ein ausgewogenes Verhältnis zwischen Nährstoffzufuhr und -abgabe anzustreben. Die Nährstoffversorgung und -nachlieferung des Bodens ist anhand regelmäßiger Bodenuntersuchungen, vor allem auf Grundnährstoffe, Gehalt an organischer Substanz, pH-Wert und N_{min}-Gehalte zu ermitteln. Die zu erwartende Nährstoffnachlieferung aus dem Boden sollte, insbesondere für Stickstoff, modellgestützt unter Berücksichtigung des Kulturpflanzenentzuges, des Witterungseinflusses und des Bodenwassergehaltes berechnet werden. Der reale und aktuelle Nährstoffbedarf der Pflanzen kann analytisch sowie mithilfe von Fernerkundungs- und Spektraldaten ermittelt werden. Je exakter die Vorhersagen zum Nährstoffbedarf sind, desto weniger zusätzliche Düngemittel müssen eingesetzt werden.

Mineralische Düngemittel unterscheiden sich in ihren physikalischen und damit auch in ihren ausbringungs-/streutechnischen Eigenschaften erheblich. Die Ausbringungstechnologie von Mineraldüngern gilt es kontinuierlich zu optimieren und am Markt verfügbare technische Hilfsmittel, wie beispielsweise die Wiegetechnik, Durchflussmengen-abhängige Ausbringung unterschiedlicher Düngertypen, Apps oder Werkzeuge des Precision Farming in der Praxis verstärkt zu etablieren.

Wirtschaftsdünger sind aufgrund einer Schichtenbildung im Lagerbehälter und somit heterogener Nährstoffverteilung vor der Ausbringung soweit wie möglich zu homogenisieren. In der Etablierung verlässlicher Onlinemesssysteme zur Bestimmung des N- und P-Gehaltes bei der Ausbringung (z. B. Nah-Infrarot-Spektroskopie-Systeme - NIRS) besteht noch Forschungs- und Entwicklungsbedarf. Bei flüssigen Wirtschaftsdüngern kann mit Hilfe von emissionsarmer Ausbringtechnik Stickstoffeffizienz deutlich verbessert werden (RÜCKAMP et al., 2013). Bei einer wurzelnahen Ausbringung von mineralischen bzw. organischen Düngemitteln durch z. B. Unterfußdüngung oder Streifenbearbeitung (Strip-tillage) mit gleichzeitiger Düngeausbringung kann die Düngemitteleffizienz deutlich verbessert werden. Daher sollten die Techniken dahingehend optimiert werden, Düngemittel zielgenau unterschiedlichen Standortund Bodenverhältnissen hei und optimalen Witterungsbedingungen im Wurzelraum zu platzieren. Streifenbearbeitungsverfahren bergen zudem Vorteile bei der Vermeidung von Erosionsrisiken, da sie stets unbearbeitete und mit Pflanzenmaterial Oberflächenstreifen bisher bedeckte hinterlassen. Insbesondere in klassischen, mineraldüngerbasierten Systemen ist der Einsatz organischer Düngemittel verstärkt anzustreben.

Der ressourcenschonende Umgang mit Nährstoffen erfordert zudem ein sinnvolles Recycling (z. B. Klärschlamm), da sich mineralische Reserven speziell für Phosphor (P) zunehmend verknappen und z. T. in politisch unsicheren Ländern abgebaut werden. Laut KRATZ et al. (2014) wird etwa die Hälfte des P-Bedarfs der Landwirtschaft (ca. 326.000 – 458.000 t P/Jahr) über Wirtschaftsdünger abgedeckt. Der in Deutschland anfallende kommunale Klärschlamm hat zusätzlich ein theoretisches Rückgewinnungspotenzial von rund 62.000 t P/Jahr (ROSKOSCH & HEIDECKE, 2018), das bei vollständiger Ausnutzung rund 40 % der mineralischen P-Düngeranwendung ersetzen könnte.

Innovative Produkte haben z. T. erhöhte Nährstoffeffizienz, wenn sie mit einer an den Pflanzenbedarf angepassten Nährstofffreisetzung eingesetzt werden (Slow Release Fertilizer, Urease- und Nitrifizierungsinhibitoren, "Next Generation Smart Fertilizers"). Im Fall von Stickstoff, wo die Gefahr von gasförmigen Verlusten und Nitratauswaschung gegeben ist, wäre eine langsame Freisetzung zu bestimmten Vegetationsstadien von Vorteil. Bei Phosphordüngern sind dagegen Maßnahmen, die zur Erhöhung der Ausnutzung führen, anzustreben.

2.4.3 Anbaumaßnahmen zur Reduktion der Düngung

Winterweizen hat einen erheblichen Anbauumfang in Deutschland mit 3,2 Mio. ha oder 54 % der Getreideanbaufläche (DESTATIS, 2017). Das wesentliche Qualitätskriterium für die Bewertung der Backqualität von Winterweizen aus Sicht des Handels ist die Konzentration und Zusammensetzung des Rohproteins im Korn. In der Praxis wird die Qualität des Weizens neben der Sortenwahl vor allem über die Stickstoffdüngung gesteuert. Die Bezahlung der Rohware ist nahezu ausschließlich auf den Proteingehalt ausgerichtet, da hohe Werte eine hohe Volumenausbeute beim Backen bedeuten.

Die Stickstoffdüngemenge wird in der Regel auf drei bis vier Gaben verteilt. Die letzte Gabe zum Ährenschieben dient vorrangig der Erhöhung der Rohproteingehalte im Korn. Die Effizienz dieser Spätdüngung ist in Abhängigkeit von Standortbedingungen und Witterung sehr variabel. Daher sollte die Qualitätsgabe zukünftig im Hinblick auf den Verwendungszweck genau geprüft werden. Ferner erreichen moderne Sorten auch ohne hohe Proteingehalte eine gute Backqualität (XUE et al., 2016). Hiermit könnte der Stickstoffeinsatz im Weizenanbau reduziert werden.

Leguminosen in einer Fruchtfolge stellen aufgrund ihrer Fähigkeit zur Luftstickstofffixierung eine Quelle für Stickstoff dar. Besonders im Ökologischen Landbau sind sie für die Stickstoffversorgung der Ackerkulturen unverzichtbar (BÖHM et al., 2020). Außerdem fördern Leguminosen die Verfügbarmachung von Phosphor und anderen Nährstoffen und bewirken eine Verbesserung der Bodenstruktur und des Wasser- und Lufthaushaltes des Bodens (DAFA, 2012). Die positive Wirkung von Körnerleguminosen auf die Erträge der Nachfrüchte bestätigen zwei neuere Meta-Studien (PREIßEL

et al., 2015; CERNAY et al., 2018). Körnerleguminosen können allerdings im konventionellen Anbau aufgrund der novellierten Düngeverordnung und der Stoffstrombilanzverordnung problematisch werden, da die Fixierleistung der Körnerleguminose als Stickstoffzufuhr in die Bilanz aufgenommen werden muss (PAHLMANN et al., 2018). Einen weiteren Nachteil von Fruchtfolgen mit Körnerleguminosen stellt das erhöhte Nitratauswaschungspotenzial dar, das u. a. mit der symbiontischen Stickstofffixierung bzw. der schwer kalkulierbaren Mineralisierung von organisch gebundenem Stickstoff zusammenhängt, die zu erhöhten Herbst-N_{min}-Werten führen kann (BRAUN et al., 2014; Röper et al., 2017). Dies ließe sich jedoch durch Zwischenfrüchte, den Einsatz von Winter-Körnerleguminosen oder einen Gemengeanbau reduzieren (NEMECEK et al., 2008). Leguminosenbasierte Anbausysteme erfordern derzeit die Entwicklung und Erprobung von neuen und innovativen Anbauverfahren (Fruchtfolge- und Anbaumanagement, Integration und Weiterentwicklung von Gemengeanbausystemen) und die Ermittlung der innerartlichen Variabilität bei der Stickstofffixierleistung.

OPTIMIERUNG DES HUMUSGEHALTES UND EROSIONSSCHUTZ DES BODENS

Eine kontinuierliche und ausreichende Zufuhr und Einarbeitung von organischem Material durch Erntereste, Zwischenfrüchte und organische Dünger ist sicherzustellen. Eine optimale Versorgung des Bodens mit organischer Substanz und ein aktives Bodenleben stehen in Wechselwirkung zueinander. Durch die Verdauungsaktivität der Bodenorganismen wird organische Substanz in mineralische Verbindungsformen überführt und steht dann als Pflanzennährstoff, z. B. Nitrat, zur Verfügung. Die Nährstoffeffizienz ist vom Humusgehalt und von der Aktivität der Bodenlebewesen abhängig. Auch Bodenerosionsereignisse beeinflussen sie, da abgetragener Boden Nährstoffe mit sich führt und von der Fläche wegführt bzw. innerhalb der Fläche verlagert. Steigerungen des Verhältnisses von Wurzel zu Spross können den unterirdischen Eintrag an organischem Material in den Boden und somit den Humusgehalt erhöhen. Ferner fördert eine intensive Durchwurzelung des Bodens, die Sorten mit entsprechendem Merkmal bewerkstelligen können, die Infiltration von Wasser, wodurch Erosionsereignisse reduziert werden können.

2.4.4 Züchterische Maßnahmen zur Optimierung von Humusgehalt und zum Erosionschutz

In diesem Bereich bestehen züchterisch lediglich indirekte Eingriffspunkte, da Humusgehalt und Erosionsschutz im Wesentlichen durch Anbaumaßnahmen steuerbar sind. Züchterische Ansätze bestehen darin, (neue) Kultursorten z.B. hinsichtlich verbesserter Nährstoffeffizienz oder Wurzelarchitektur anzupassen. Moderne Zuchtverfahren wie Präzisionszüchtung in Kombination mit Gentechnik/Genomeditierung können diese Ziele schneller erreichen als konventionelle Züchtung.

2.4.5 Technische Maßnahmen zur Optimierung von Humusgehalt und zum Erosionschutz

Technische Maßnahmen beeinflussen, wenn überhaupt den Humusgehalt und Erosionsschutz nur in geringem Maße. Es sind keine Beispiele bekannt, die einen nennenswerten Faktor darstellen.

2.4.6 Anbaumaßnahmen zur Optimierung von Humusgehalt und zum Erosionschutz

Eine kontinuierliche und ausreichende Zufuhr und Einarbeitung von organischem Material durch Erntereste, Zwischenfrüchte und organische Dünger ist über das Anbaumanagement sicherzustellen. Oberflächennahe hohe Gehalte an organischer Substanz können pflanzenbaulich sinnvoll sein und werden durch eine entsprechende Wahl der Bodenbearbeitungstiefe erreicht. Die biologische Aktivität wird durch Pflugverzicht, Reduktion chemischer Pflanzenschutzmittel und Diversifizierung der angebauten Kulturarten sowie der Landschaft (z. B. Anlage von Hecken) gefördert.

Gewährleistung einer guten und stabilen Bodenstruktur, die zur Bildung eines wasserführenden Porensystems führt, wird durch Pflugverzicht (vgl. aber 2.2), Vermeidung von Bodenverdichtung, hohem Eintrag an organischem Material und Förderung der biologischen Aktivität und tiefwurzelnde Arten erreicht. In Hanglagen sollte die Bearbeitungsrichtung quer zum Gefälle verlaufen, um Bodenerosion entgegenzuwirken. Die Bodenoberfläche ist möglichst ganzjährig durch Pflanzen sowie Ernte- und Zwischenfruchtrückstände zu bedecken, um den Boden vor Erosion zu schützen. Dies wird mit Mulch- und Direktsaatverfahren, Streifenbearbeitung sowie durch den Anbau von Zwischenfrüchten und Untersaaten und den Verbleib von Stroh im Feld erreicht. Die Anlage von Hecken und Feldgehölzen sowie gezielte Schlagunterteilung reduziert die Windgeschwindigkeit in der Landschaft und damit das Winderosionsrisiko. Ferner wird durch die oberirdische Diversität auch die Diversität der Bodenlebewesen und deren Beitrag zur Ökosystemleistung gefördert. Untersuchungen haben gezeigt, dass Hecken und Feldgehölze durch ihren Eintrag an organischem Material auch den Humusgehalt des Bodens positiv beeinflussen können. Die Anlage von extensiv bewirtschafteten Pufferstreifen soll den möglichen Austrag von Nährstoffen über Abschwemmung bzw. Direkteintrag verhindern. Blühstreifen als Puffer fördern zusätzlich die Biodiversität.

2.5 Sicherung der Ertragspotenziale und Züchtungseffizienz

Angesicht der allgemeinen Nutzungskonkurrenz von Flächen in Deutschland stellt sich die Frage, wie landwirtschaftliche Flächen effizient(er) genutzt werden können. Dies betrifft sowohl die Ertragseffizienz als auch die (Agrar-)Biodiversität. Erhöhung der Flächenerträge zusätzlich zu Maßnahmen von Düngung und Pflanzenschutz durch Verringerung der Verluste und die effiziente Erschließung neuer genetischer Ressourcen durch Züchtung sowie optimierte Anbauverfahren stellen Optionen dar.

herausforderungsübergreifende Möglichkeit zur nachhaltigen Intensivierung Pflanzenproduktion könnte zukünftig der Spot Farming Ansatz darstellen (WEGENER et al., 2019). Beim Spot Farming wird der Acker auf Grundlage von Unterschieden in den Standorteigenschaften, z. B. den Bodeneigenschaften, der Topografie und dem Erosionspotenzial der Fläche in kleine, homogene Teilbereiche ("Spots") eingeteilt. In diesen werden Kulturen und Fruchtfolgen angebaut, die in diesen Bereichen optimale Wachstumsbedingungen vorfinden. Zusätzlich trägt die Einbringung ökologischer und funktionaler Strukturelemente zur Steigerung der Biodiversität innerhalb der Agrarlandschaften sowie zum Schutz vor Wind- und Wassererosion bei. Da eine Bewirtschaftung der kleinen Spots mit herkömmlicher Großtechnik nicht möglich sein wird, soll diese mittels autonomer Robotertechnik erfolgen. So wird eine einzelpflanzenspezifische Bewirtschaftung möglich, bei der auch Agrarchemikalien gezielt und nach Bedarf appliziert werden können, was mit einer effektiven Nutzung sowie der Reduzierung der ausgebrachten Menge und Abdrift in die Umwelt einhergeht. Der Spot Farming Ansatz bietet so das Potenzial, ein resilienteres Anbausystem zu gestalten.

In Bezug auf eine Förderung der Kreislaufwirtschaft bzw. der Nutzungseffizienz landwirtschaftlicher Kulturen sind auch Aspekte einer Mehrfachnutzung (z. B. Samen als Nahrungsmittel, andere Pflanzenteile als Industrierohstoff) von Interesse. Insbesondere für die technische/industrielle Nutzung landwirtschaftlicher Rohstoffe spielen technische (Verarbeitungs-)Möglichkeiten und ökonomische Rahmenbedingungen eine ausschlaggebende Rolle.

Züchtung adaptiert Sorten kontinuierlich an sich verändernde Anbaubedingungen und wirkt den Auswirkungen widriger Umweltbedingungen iterativ entgegen. Geeignete Allele von Einzelgenen mit besonders großer/breiter Bedeutung für die Leistungsfähigkeit der Kulturart sind in der Regel über die jahrzehntelange Züchtung schon im Genpool kommerzieller Zuchtprogramme fixiert (SNOWDON et al., 2020; WALLACE et al., 2018). Im Ergebnis führte dies über lange Zeiträume zu nachhaltigen Leistungssteigerungen. Klassische züchterische Sortenentwicklung durch Introgressionen (Einkreuzen) von "neuen" Zielgenen aus Wild- oder kreuzbaren Kulturarten in solch weitentwickelte (Elite-)Sorten führt auch zum Einkreuzen (gekoppelter) negativer, ertragsmindernder bzw. einschränkender Merkmale (*linkage drag*). Aufwendige Feld- und Gewächshausversuche sowie genetische Analysen sind notwendig, um (nur) die gewünschten Merkmale zu rekombinieren (LYZENGA et al., 2021). Ein wesentlicher Schritt dabei ist die Nutzung von Sequenzdaten bei der Auswahl und Planung. (Sequenz)markergestützte Züchtungsmethoden allgemein sind ergänzend zur Kreuzungs- und Auswahlzüchtung seit Jahren etabliert.

Eine direkte, aktive Modifikation von Gensequenzen durch Mutagenese mittels ionisierender Strahlung oder Chemikalien erzeugt ebenso erwünschte wie unerwünschte Mutationen. Durch "Tilling", die Kombination der Mutagenese mit molekulargenetischen Analysen von Zielsequenzen, lässt sich der Selektionsaufwand reduzieren. Verdeckte, ungewollte Mutationen sind aber weiterhin durch aufwändige Testung und Selektion auszuschließen.

2.5.1 Züchtungseffizienz

2.5.1.1 Klassische Züchtung

Die Hybridzüchtung nutzt den Heterosiseffekt, der die verstärkte Ausprägung von Merkmalen in mischerbigen Nachkommen im Vergleich zu ihren Eltern beschreibt. Züchterisches Ausgangsmaterial sind elterliche Inzuchtlinien. Um einen entsprechenden Heterosiseffekt in der Folgegeneration zu erzielen, wird zwischen den Eltern eine 100%ige Bestäubungskontrolle angestrebt. Der Aufwand der Hybridzüchtung (Erstellung von Inzuchtlinien bei Fremdbefruchtern, Kreuzung) ist erheblich. Zudem führt Inzucht auch zur Verengung der Merkmale in der Elternlinie. Bei Roggen, Raps und Sonnenblume sowie vielen Gemüsearten kann die natürliche oder künstlich übertragene männliche Sterilität (CMS, Cytoplasmatische männliche Sterilität) die Hybridzüchtung erheblich vereinfachen.

Bei Fremdbefruchtern wie Mais und Roggen kann der Heterosiseffekt zu 100%igem Ertragszuwachs beitragen; entsprechend haben sich Hybridsorten durchgesetzt. Bei Zuckerrübe, Raps oder Sonnenblumen sind sie weit verbreitet. Hybridweizen ist ein Ziel der Weizenzüchtung, aber aufgrund der besonderen Blühbiologie/Selbstbefruchtung auch besonders schwierig.

Bei wichtigen gartenbaulichen Kulturen besteht der moderne Sortenpool aus 100 % F1-Hybriden (z. B. Tomate, Kohl, Möhre, Spargel, Zwiebel). Grundsätzlich ist der Einsatz biotechnologischer Verfahren zur Beschleunigung der Linienentwicklung und Hybridentwicklung bei den genannten Kulturen etabliert (Gewebekulturverfahren, Embryo rescue, somatische Hybridisierung, Haploidentechniken). Bei einer Reihe von wichtigen gartenbaulichen Kulturarten fehlen bisher die blütenbiologischen Voraussetzungen für die Hybridzüchtung, die eine Hybridsaatgutproduktion möglich machen, z. B. Erbse, Bohne, Salat, Rucola.

Für Kräuter und Arzneipflanzen wäre die Nutzung des Verfahrens der Hybridzüchtung äußerst wünschenswert. Hier eröffnet sich die Möglichkeit, große Erntepartien mit einheitlichen Inhaltsstoffprofilen zu erzeugen. Diese Profile sollten auch besser unter den Jahresschwankungen reproduzierbar sein. Weiterhin könnte durch Hybridzüchtung, wie bei den Gemüsen, Ertragssteigerungen durch Heterosis erreicht werden.

Die Züchtung von Baum- und Strauchbeerenobst ist ein sehr langwieriger Prozess, der bis zur Anmeldung einer neuen Sorte mehr als 20 Jahre dauert. Wenn mehrere Kreuzungszyklen notwendig sind, weil Merkmale (z. B. Krankheitsresistenzen) aus genetisch entfernten Wildarten in den Genpool der Kulturart eingeführt werden müssen, kann die Züchtung einer Sorte bis zu 40 Jahren und länger betragen. Grund dafür sind die langen Generationszyklen, die je nach Art 3 bis 10 Jahre lang sein können. Durch eine Verkürzung der Generationszeit könnten beispielsweise Introgressionen neuer Resistenzen schneller erreicht werden. Im Bereich der klassischen Züchtung stehen solche Methoden aber für die effiziente Anwendungspraxis nicht zur Verfügung.

2.5.1.2 Transgene Pflanzen

Eine Serie von internationalen Zulassungen und Arbeiten hat die Nutzung männlicher Sterilität bzw. deren Aufhebung (barnase/barstar-System) im Rahmen der Hybridzüchtung zum Ziel, insbesondere bei Raps und Mais; einige Raps-Events sind für den Import nach Europa zugelassen (kein Anbau). In den 1990er Jahren bis 2004 gab es Feldversuche mit männlich sterilen Chicoree-Linien in fünf EU-Mitgliedsstaaten. (https://www.isaaa.org/gmapprovaldatabase/; Transgen.de).

Im Forschungsstadium befindet sich noch das sogenannte *Reverse Breeding*, das es ermöglichen soll, für die Hybridzüchtung Elternlinien aus einer beliebigen mischerbigen Linie zu entwickeln. Das

Verfahren beruht auf einer RNAi-gestützten Unterdrückung der Rekombination der Erbanlagen in der Reifeteilung.

Bei der Züchtung von Baum- und Strauchbeerenobst kann der sehr langwierige Prozess (s. o.) durch die *FastBreeding* (auch Rapid Crop Cycle Breeding)-Methode mithilfe transgener, früh-blühender Pflanzen deutlich verkürzt werden (Flachowsky et al., 2009). Beim Apfel sind Generationszeiten von 13 Monaten möglich (Flachowsky et al., 2011) und 5 Kreuzungsgenerationen in 7 Jahren realistisch (Schlathölter et al., 2018). Das Endprodukt eines FastBreeding-Züchtungsprogrammes ist frei von transgenen DNA-Sequenzen und mit Produkten der klassischen Kreuzungszüchtung vergleichbar. Mit Hilfe dieser Methode könnten in wenigen Jahren mehrere Resistenzen gegenüber verschiedenen Krankheiten für die Sortenzüchtung bei Obst nutzbar gemacht werden.

Vergleichbare Ansätze sind im Weinbau derzeit nicht verfügbar.

2.5.1.3 Genomeditierung

Für verschiedene Kulturpflanzen besteht, wie bereits dargestellt, ein breites züchterisches Interesse an der Entwicklung von Hybridsorten. So finden sich auch Anwendungen der Genomeditierung zur Erzeugung männlich steriler Pflanzen, Haploidinduktion oder Apomixis ("Jungfernzeugung") bei Gemüsen (Gurke, Kohl, Tomate), aber auch bei Mais und Weizen (MENZ et al., 2020; CHEN et al 2019). Während die Erzeugung männlicher Sterilität per Genomeditierung – aber mit transgenem Marker – marktnah für Mais, Weizen und Tomate außerhalb Europas etabliert scheint (<5 – 10 Jahre), sind Genomeditierungen für Haploidinduktion und Apomixis noch im Forschungsstadium.

In vielen Obstarten, aber auch z. B. in Kartoffel können Linien untereinander nicht gekreuzt werden, wenn sie derselben Inkompatibilitätsgruppe (Selbstinkompatibilität) angehören. Bei gezielter Mutation der dafür verantwortlichen Gene durch Genomeditierung kann diese Blockade aufgehoben werden, was die Möglichkeit neuer Hybridzuchten bzw. Rekombination ansonsten getrennter Genpoole ermöglicht und die züchterisch nutzbare genetische Variabilität erhöht.

Chromosomeninversionen sind wiederkehrende Umlagerungen von Genabschnitten, die zwischen verschiedenen Pflanzenisolaten oder Kultivaren auftreten. Solche Inversionen stellen ein großes Hindernis für die klassische Züchtung dar, da zwischen invertierten Sequenzen auf homologen Chromosomen keine Rekombination (durch Crossover) beobachtet werden können. Es konnte am Modellorganismus *Arabidopsis* gezeigt werden, dass durch Genomeditierung Crossover innerhalb der ursprünglich invertierten Region wiederhergestellt werden können. Ein solches "somatisches Chromosomen-Engineering" könnte das Aufbrechen der genetischen (Ent-)Kopplung in der Pflanzenzüchtung ermöglichen (SCHMIDT et al., 2020).

2.5.2 Verbesserung des Ertragspotenzials

2.5.2.1 Klassische Züchtung

Eine Ertragsoptimierung und -sicherung (d. h. auch Verbesserung der Flächennutzungseffizienz) wird für viele Kulturpflanzen innerhalb der bestehenden konventionellen Anbausysteme mittels klassischer Kombinations- und Selektionszüchtung sowie klassischer Mutagenese seit langem verfolgt (Voss-Fels et al., 2019). Bei vielen Gemüsen und Kräutern gibt es allerdings deutliche Reserven. Ertragsoptimierung ist stets im Kontext zu abiotischer und biotischer Stresstoleranz (s. 2.2 bis 2.4) und zum Produktmarketing zu sehen (z. B. Minigemüse wie Cherry-Tomaten, Minipaprika oder Minikohl; Marketing Label).

2.5.2.2 Transgene Pflanzen

Im Bereich der Transgenese gibt es auch für Hauptkulturarten und Merkmale außerhalb der Herbizidtoleranz bzw. der Schädlings- und Krankheitsresistenzen international nur wenige Zulassungen für direkte Modifikationen agronomischer Merkmale (https://www.isaaa.org/gmapprovaldatabase/). Hinsichtlich der direkten Steigerung der Ertragsleistung oder Wachstumseigenschaften liegen lediglich für die ackerbaulichen Kulturen Soja und Mais Zulassungen für transgene Modifikationen von regulatorischen Eigenschaften vor. Eine breite Vermarktung z. B. mit Bezug zur EU hat bisher nicht stattgefunden.

Daneben gibt es im reinen (Grundlagen-)Forschungsbereich komplexere Arbeiten zur Photosynthese, in denen mehrere Gene und Stoffwechselprozesse (Optimierung der Photosynthese-Prozesse; CAM-, C3- zu C4-Pflanzen) bearbeitet wurden/werden (Zeithorizont >> 10 Jahre; s. a. UNKEL et al., 2020), u. a. an Kartoffel (NÖLKE et al., 2014) und Weizen (z. B. DEFRA Zulassung Feldversuche GB 2016).

2.5.2.3 Genomeditierung

Verschiedene Arbeiten der gezielten Mutagenese widmen sich der direkten Ertragsoptimierung durch Modifikation der Fruchtgrößen, Fruchtstände bzw. der Pflanzenarchitektur und des -wachstums. Die Genetik der bearbeiteten Merkmale ist teilweise auch artübergreifend bekannt, jedoch sind nicht alle Kulturarten bzw. Linien gleichermaßen methodisch zugänglich (*in-vitro*-Kultivierung, Zellkulturen, Regeneration, Sequenzinformationen; Getreide s. Ansari et al., 2020). Viele (akademische) Entwicklungsarbeiten finden dabei außerhalb von Europa statt (MENZ et al., 2020). Für Deutschland ggf. relevant sind bisher Arbeiten an ackerbaulichen Kulturen wie Weizen, Mais, Raps, Sojabohne, prospektiv u. U. Hirse(n) und als Gartenbaukultur an Tomate. Intensiv werden ertragsoptimierende Merkmale von Kulturpflanzen auch bei (europäischen) Züchtern bearbeitet (JORASCH, 2020); eine detaillierte Aufschlüsselung ist jedoch nicht möglich. Es ist mit internationalen Vermarktungen innerhalb der nächsten Jahre zu rechnen.

2.5.3 Domestikation

2.5.3.1 Klassische Züchtung

Die Modifikation der Pflanzenarchitektur (Blüten-/Fruchtstände, Wuchsform), der Inhaltsstoffe oder standortrelevanter Eigenschaften (Blühzeitpunkte, Tageslängen) sind erforderlich, um Wildarten zu domestizieren bzw. züchterisch wenig entwickelte, bestehende Arten zu "re-domestizieren", so dass diese für (regionalen) Anbau, Ernte und Nutzung besser nutzbar werden. Für viele Kulturarten sind einige wenige Schlüsselgene bekannt, die für die Domestizierung eine zentrale Rolle spielen (VAN TASSEL et al., 2020; LYZENGA et al., 2021).

Züchtungsbemühungen haben bis in die 1960er Jahre zu einer deutlichen Verarmung der genetischen Diversität innerhalb und zwischen den Kulturarten geführt. Erst danach ist wieder ein Anstieg der genetischen Diversität dokumentiert (VAN DE WOUW et al., 2010a; b; s. u. "Nachernteverluste"). So sind z. B. auch viele der heute angebauten Obstarten auf nur wenige Ausgangsgenotypen zurückzuführen. Das ist u. a. bei Primärarten, wie der Süßkirsche und der Himbeere der Fall, ebenso bei Hybridarten, wie der Sauerkirsche und der Erdbeere. Eine Re-Domestizierung sowie eine Re-Synthese der Arten (bei Hybriden) ist denkbar und in Ansätzen auch beispielhaft realisiert worden (z. B. HANCOCK et al., 2010). Für einheimische Arten wie der Himbeere und der Süßkirsche wären solche Programme in Deutschland relativ einfach zu umzusetzen. Bei anderen Arten, wie der Erdbeere, ist Deutschland auf genetische Ressourcen aus den Herkunftsgebieten (z. B. USA, Chile) angewiesen. Ungeachtet dessen ist ein Ausbau bereits existierender Sammlungen genetischer Ressourcen sinnvoll.

Im Bereich Gartenbau spielt die Domestikation (Inkulturnahme) von Arten, die bislang aus Wildbeständen gesammelt wurden, eine zunehmende Rolle; z. B. Gelber Enzian (*Gentiana lutea*) für die Spirituosenerzeugung und Süßholz (*Glycyrrhiza glabra*) u. a. für die Süßwarenindustrie. Ähnlich verhält es sich bei der Wiedereinführung alter, wenig oder nicht mehr genutzter Kulturpflanzenarten z. B. Schmalblättriger Doppelsame (*Diplotaxis tenuifolia*), Senfrauke (*Eruca sativa*) oder Bärlauch (*Allium ursinum*). Mit den klassischen Züchtungsverfahren, Auslesezüchtung und Kombinationszüchtung können hier oft in relativ kurzer Zeit erhebliche Fortschritte erzielt werden. Mit der Inkulturnahme von Arten müssen immer auch Aspekte des Artenschutzes und der Biodiversität berücksichtigt werden.

Versuche zur Domestizierung von weiteren Wildpflanzen mittels klassischer Züchtung bzw. mittels chemischer Mutagenese sind ebenfalls dokumentiert z. B. von Eiweiß-Pflanzen wie *Vigna stipulata* (eine "Altweltbohnenart": (Takahashi et al., 2019)). Der Zeithorizont für die Marktreife solcher Bemühungen liegt jenseits von 10 Jahren.

2.5.3.2 Genomeditierung

Genomeditierung bietet die Möglichkeit, in einem oder mit wenigen züchterischen Ansätzen entscheidende Mutationen auszulösen und zu etablieren. Komplexere Beispiele (mehrere Merkmale in wenigen Ansätzen modifiziert) im Sinne eines "Proof-of-principle" liegen für Wild-Tomate (Zsögön et al., 2018) und Physalis (LEMMON et al., 2018) vor. Bei Russischem Löwenzahn konnten Wieghaus et al. (2019) durch das Ausschalten eines bekannten Genanalogs aus *Arabidopsis* (Ackerschmalwand) die Wurzelmorphologie/-architektur zu einer Pfahlwurzel verändern, die eine erleichterte Ernte ermöglicht. Eine Hürde für den Einsatz der Genomeditierung bei Wildpflanzen ist das Fehlen eines entsprechenden Referenzgenoms mit identifizierten Genfunktionen.

2.5.4 Ernteverluste

Ertragsverluste und Nachernteverluste bei gartenbaulichen Kulturen sind mit Bezug auf die vermarktungsfähige Ware zu betrachten. Das betrifft Erntetechnologien, wo neben der technischen Verbesserung und Optimierung von Erntemaschinen auch an der technologischen Eignung der Pflanzen züchterisch gearbeitet wird, z. B. Fruchtansatz, Fruchtstellung bei Erbsen und Bohnen für maschinelle Ernte, Blattstellungen, Abrissfestigkeit von Früchten usw.

2.5.4.1 Genomeditierung

Einzelne Entwicklungen des Einsatzes der Genomeditierung widmen sich der züchterischen Verbesserung von Ernteeigenschaften, so z. B. Schotenfestigkeit bei Raps (BRAATZ et al., 2017) (zur Kompensation von Ausfallverlusten bis zu 25 %), rückstandslose "Pflückbarkeit" von Früchten bei Tomate (USDA-APHIS, 2018) oder Wurzelernte bei Russischem Löwenzahn (Wieghaus et al., 2019) (Ausbildung einer Pfahlwurzel für Nutzung herkömmlicher Rodungstechnik). Während für schotenfesteren Raps bereits ein Markt für konventionelle Züchtung existiert, sind die Perspektiven in anderen Bereichen noch nicht absehbar. Generell sind die Entwicklungen genomeditierter Sorten noch nicht abgeschlossen.

2.5.5 Nachernteverluste/Lagerung

Wenngleich Nachernteverluste in Europa, z. B. in Deutschland, keine so bedeutende Rolle spielen wie in tropischen Ländern und vielen Schwellenländern, gibt es Bemühungen, Nachernteverluste durch entsprechende technische bzw. organisatorische Maßnahmen zu vermindern. So bieten sich gerade mit Bezug auf eine fortschreitende Digitalisierung Optimierungen in der Lagerführung für alle

landwirtschaftlichen Produkte an. Es wird davon ausgegangen, dass der jeweilige Stand der Technik bei Neuanlagen bzw. Modernisierungen realisiert werden kann bzw. wird. Typische biologische Eigenschaften der transportierten oder gelagerten landwirtschaftlichen Produkte lassen sich damit nur indirekt beeinflussen. Daher wird auch nach züchterischen Lösungen gesucht.

2.5.5.1 Klassische Züchtung

Die Verlängerung der Nacherntenutzungsdauer von Gemüsen und Kräutern und bei den typischen Lagergemüsen (z. B. Kohl, Möhre, Zwiebel) die Lagereignung sind wichtige Zuchtziele. Züchterische Ansätze greifen hier in die Stoffwechselbiologie ein, z. B. den Ethylen-, Zucker- oder Stärkestoffwechsel. Bei der Lagerung von Gemüse spielen Pathogene eine große Rolle. Züchterische Ansätze sind daher die Resistenzzüchtung gegenüber den bedeutenden Lagerkrankheiten wie z. B. *Pectobacterium, Sklerotinia, Alternaria, Botrytis* und verschiedenen Virosen.

Mit dem überregionalen Warenverkehr stellt der unbeschadete Transport von Obst und Gemüse eine bedeutende züchterische Zielgröße dar. Merkmale wie die Festigkeit sind aber oft negativ mit Geschmack gekoppelt (z. B. KLEE, 2010; KANSKI et al., 2020).

Nachernteverluste sind bei allen Obstarten von großer ökonomischer Bedeutung. Sind die Merkmale und Kandidatengene bekannt, die Verluste verringern (z. B. Resistenz gegenüber *Penicillium expansum;* Sun et al., 2017), sind auch mittels klassischer Züchtung langfristig Erfolge möglich. Für viele Merkmale sind jedoch noch weiterführende Forschungsarbeiten notwendig.

2.5.5.2 Transgene Pflanzen

Die erste "haltbarere" transgene gartenbauliche Frucht, die Flavr-Savr-Tomate, wurde vor mehr als 25 Jahren auf den Markt gebracht, ohne sich je durchzusetzen. Es gibt seit Jahren akademische Arbeiten zur Verbesserung der Lagerfähigkeit bzw. zur Verlangsamung des Reifeprozesses bei Früchten und Gemüsen, hauptsächlich an Tomate (KHABBAZI et al., 2020). Sie widmen sich verschiedenen Stoffwechselprozessen, die den Reifungsprozess beeinflussen, darunter Inhaltsstoff- und Zellwandabbau, Steuerung der Ethylen- und ABA-Biosynthese. Allerdings finden sich auch seit Jahren bis auf die "Artic Apple" (nichtbräunende Äpfel durch Ausschalten einer Polyphenoloxidase = PPO) keine derartigen Produkte auf den internationalen Märkten (BARANSKI et al., 2019). Bei der Kartoffel stellt die enzymatische Bräunung ein großes Problem für Erzeuger und Industrie dar, da sie sowohl während der Ernte als auch während der Nacherntebehandlung wie Transport, Lagerung, Vertrieb und Blanchieren betroffen sein kann. Dieser unerwünschte Prozess wird in der Industrie durch chemische und/oder physikalische Mittel kontrolliert, welche ein Risiko für die menschliche Gesundheit darstellen können.

2.5.5.3 Genomeditierung

In verschiedenen Kulturpflanzen werden verschiedene (spezifische) Ansätze bearbeitet, um Nachernte bzw. Lagerverluste oder Qualitätseinbußen zu reduzieren. Neben Arbeiten zur Vermeidung von unerwünschten Verfärbungen liegen einzelne Entwicklungsarbeiten zur Haltbarkeit bei Gemüsen (Salat, Tomate) und Lagereigenschaften von Kartoffeln vor (COHEN, 2019; MENZ et al., 2020). Durch das Ausschalten eines der fünf PPO- Gene (s. o.) in der Kartoffel mittels Genomeditierung konnte die PPO- Aktivität in der Kartoffelknolle um bis zu 69 % reduziert werden, was zu einer Reduktion der enzymatischen Bräunung um 73 % führte (GONZALES et al., 2020).

2.6 Interaktion verschiedener Maßnahmen zur Lösung komplexer Herausforderungen

Nachhaltig produzierte, gesunde und ertragreiche Kulturpflanzen, deren Produkte den Verbraucherwünschen entsprechen, stellen Landwirte, Gärtner und Winzer vor eine Vielzahl von Herausforderungen. Die bisher gesondert betrachteten Bereiche Klimaanpassung, Pflanzenschutz, Nährstoffeffizienz sowie Ertrag und Qualität der Ernteprodukte sind dabei nicht unabhängig voneinander, da innerhalb einer Vegetationsperiode verschiedene Herausforderungen aus allen genannten Bereichen in Kombinationen auftreten können. Dies bedeutet, dass innerhalb eines Anbausystems durch die Kombination verschiedener Maßnahmen aus den Bereichen Züchtung, Anbau und Technik diesem Komplex unterschiedlicher Herausforderungen begegnet werden muss. In der Vergangenheit wurden Herausforderungen und Maßnahmen zumeist unabhängig voneinander betrachtet.

Ziel muss es sein, durch die Nutzung von Komplementarität und Synergien verschiedener Maßnahmen Anbausysteme für eine klimaangepasste und nachhaltige Pflanzenproduktion zu etablieren und weiterzuentwickeln, sodass sie auch in Zukunft Ertragsstabilität und Sicherung der Qualität von Pflanzen und Produkten hinreichend gewährleisten. Konzepte, wie der integrierte Pflanzenbau (SCHOLZ, 1987) oder der Ökologische Landbau (FREYER, 2016), verfolgen dabei eher systemische Ansätze zur Lösung von komplexen Herausforderungen. Bei diesen Konzepten liegt der Fokus nicht auf Einzelmaßnahmen, sondern vielmehr auf der Balance des komplexen Systems aus ineinandergreifenden pflanzenbaulichen Aspekten, Maßnahmen und Wirkungen (NIGGLI & FLIEßBACH 2012). So sind beispielsweise vielfältige/weite Fruchtfolgen einschließlich Zwischenfrüchten und (möglichst) dauerhafte Bodenbedeckung wichtige Elemente (NIGGLI & FLIEßBACH 2012). Maßnahmen zur Lösung einzelner Herausforderungen können allerdings in einem positiven, negativen oder neutralen Zusammenhang zueinanderstehen, sodass für einige Herausforderungen identische, für andere Herausforderungen kontrastierende Maßnahmen erforderlich sind.

Im Folgenden soll daher exemplarisch auf mögliche Interaktionen und Zielkonflikte zwischen Maßnahmen eingegangen und Ansätze für Synergien der Nutzung von transgenen bzw. genomeditierten Pflanzen hervorgehoben werden. Da sich eine allgemeine Darstellung der genannten Themenkomplexe für obst-, wein-, gemüse- und ackerbauliche Kulturen als nicht sinnvoll gestaltet, beziehen sich die Betrachtungen der Übersichtlichkeit halber auf die wichtigste Kulturpflanze in Deutschland – den Weizen.

Weizen wird als Winter- und Sommerkultur auf ca. einem Viertel der ackerbaulich genutzten Fläche (3,1 Mio. ha) in Deutschland angebaut (BMEL, 2018). Aufgrund seiner großen Anbaubedeutung ist Weizen oftmals prominent in Fruchtfolgen vertreten (STEIN & STEINMANN, 2018). Enge und getreidebetonte Fruchtfolgen, die nur wenige Fruchtfolgeglieder (z. B. dreigliedrige Fruchtfolge aus Winterraps-Winterweizen-Winterweizen oder aus Winterraps-Winterweizen-Wintergerste) enthalten, können negative Effekte auf die Produktivität und die Qualität der Ernteprodukte haben, werden jedoch oftmals aus wirtschaftlichen Gründen in der landwirtschaftlichen Praxis präferiert (STEIN & STEINMANN, 2018; JUNG et al., 2021). Maßnahmen, die zur Etablierung von weiten Fruchtfolgen bestehend aus mehreren Fruchtfolgegliedern (z. B. Hackfrüchten, Leguminosen und Getreidearten) führen, können sich gleichermaßen positiv auf Herausforderungen in den Bereichen Klima, Pflanzenschutz und Nährstoffeffizienz auswirken. Die Erweiterung von getreidebetonten Fruchtfolgen um Hackfrüchte, Leguminosen oder Zwischenfrüchte kann das Auftreten von fruchtfolgespezifischen Krankheiten (z. B. Schwarzbeinigkeit, Halmbruch, DTR Blattflecken, Septoria-Blattdürre, Ährenfusariosen (LFL, 2021)), Schädlingen (z. B. Gelbe und Orangerote Weizengallmücke (LFL, 2021)) und Unkräutern (z. B. Klettenlabkraut, Gemeine Quecke, Vogelmiere, Gemeiner Windhalm, Ackerfuchsschwanz (PALLUTT, 2000; KLAAßEN & FREITAG, 2004; FLUCKE et al., 2014)) reduzieren und somit zur Verringerung von Pflanzenschutzmittelanwendungen beitragen (SALTZMANN & KEHLENBECK, 2018). Zudem werden durch optimierte Fruchtfolgen mit gut abgestimmten Kulturarten Vorfruchteffekte ausgenutzt und Nährstoffverluste minimiert. Der Anbau von Weizen nach Raps zeigt beispielsweise einen positiven Ertragseffekt, verglichen mit dem Anbau von Weizen nach Weizen (CHRISTEN et al., 1992). Die Integration von Leguminosen und Zwischenfrüchten in eine getreidebetonte Fruchtfolge kann sich ebenfalls positiv auf die Minimierung von Nährstoffverlusten, die Verfügbarmachung und effektive Nutzung von Nährstoffen (insbesondere Stickstoff und Phosphor), die Verbesserung der Bodenstruktur und die Optimierung des Humusgehalts sowie des Erosionsschutzes des Bodens auswirken (NEMECEK et al., 2008; SPIEGEL et al., 2014; BÖHM et al., 2020). Negative Auswirkungen von Trocken- und Hitzestress sowie Extremwetterereignissen (d. h. Totalausfälle der Ernte) können indirekt durch ein weites Kulturpflanzenspektrum abgefedert werden (DEGANI et al., 2019). Auch können Maßnahmen, wie der Anbau von resistenten/ toleranten Sorten, der Einsatz von effizienten Düngern und präziser Düngetechnik, die Anlage von Blüh- und Pufferstreifen die positiven Effekte, die sich aus der Nutzung weiter Fruchtfolgen ergeben, verstärken.

Demgegenüber stehen Maßnahmen, die zu Zielkonflikten zwischen verschiedenen Umweltwirkungen führen. Der Einsatz der wendenden Bodenbearbeitung in ackerbaulich genutzten Systemen ist ein Beispiel dafür. Im Weizenanbau kann die wendende Bodenbearbeitung zur Reduktion von Unkraut-(z. B. Gemeiner Windhalm, Ackerfuchsschwanz, Trespe-Arten, Ackerkratzdistel, Gemeine Quecke (PALLUTT, 2000; KLAAßEN & FREITAG, 2004)) und Schädlingspopulation (z. B. Brachfliege, Sattelmücke (LFL, 2021) sowie zur Reduktion von infektiösem Material (z.B. DTR-Blattflecken, Ährenfusariosen (MIEDANER, 2012; LFL, 2021)) eingesetzt werden. Dadurch können Pflanzenschutzmaßnahmen eingespart werden (Tørresen et al., 1999; Bartels, 2001). Jedoch wirkt sich die wendende Bodenbearbeitung negativ auf die Bodenstruktur und die biologische Aktivität des Bodens und somit auf den Humusgehalt, die Bodenfruchtbarkeit und Erosionsanfälligkeit aus (PRASUHN, 2012; JAKAB et al., 2017; DEBSKA et al., 2020). Zudem kann der Einsatz von wendenden Bodenbearbeitungsverfahren unter Trockenheit zu einer erhöhten Evaporation und somit zu einer Verstärkung des Wassermangels im Boden führen (BODNER et al., 2015; YOST et al., 2019).

Wie exemplarisch für die Kulturart Weizen gezeigt, können die Interaktionen von Herausforderungen und Maßnahmen vielfältig sein. In Deutschland wird eine Vielzahl von Kulturpflanzen unter der Nutzung unterschiedlicher Anbausysteme und Bewirtschaftungsweisen in verschiedenen Agrarökosystemen, die lokal/ regional stark durch abiotische und biotische Standortfaktoren geprägt sind, angebaut. Es ist daher zusammenfassend festzustellen, dass aufgrund dieser Vielfältigkeit keine Standardlösungen zur Beantwortung komplexer Herausforderungen existieren. In Zukunft werden zudem Herausforderungen, die im Zusammenhang mit den sich verändernden Klimabedingungen und der gesellschaftlichen Forderung nach einer nachhaltigen Pflanzenproduktion stehen, an Dynamik und Bedeutung gewinnen. Anbausysteme müssen weiterentwickelt und verbessert sowie Maßnahmen noch effektiver kombiniert bzw. neue Maßnahmen etabliert werden, um möglichst breite Nachhaltigkeitseffekte unter Erhaltung der Ertragsstabilität zu erzielen. Die Implementierung von technischen bzw. anbaubezogenen Maßnahmen als Antwort auf Herausforderungen ist je nach Komplexität kurz- bis mittelfristig möglich, wohingegen die Etablierung konventioneller züchterischer Maßnahmen nur mittel- bis langfristig zu erreichen ist.

Neue Maßnahmen können dabei im technischen und anbautechnischen Bereich die Konzeption und Etablierung von optimierten Anbausysteme sein, die z. B. den Anbau von Mischkulturen (DE BUCK, 2020;

MAMINE, 2020), den Anbau von Mehrliniensorten/Sortenmischungen (MUNDT, 2002; LAZZARO et al., 2018; KRISTOFFERSEN et al., 2020; KUMAR et al., 2021), den Einsatz von Gleichstandsaatsystemen (KOTTMANN et al., 2019) oder Agroforstsystemen (PANTERA et al., 2018; TSONKOVA et al., 2018) berücksichtigen. Weiterhin ist davon auszugehen, dass Maßnahmen, die im Zusammenhang mit der fortscheitenden Technisierung und Digitalisierung der Landwirtschaft stehen, wie z. B. Precision Farming, Spot Farming, KI und Robotik, an Bedeutung gewinnen werden (GANDORFER et al., 2017). Zudem sind im Bereich Züchtung die NMT als neue, ergänzende Maßnahmen zu sehen (CHEN et al., 2019; KUMAR et al., 2019).

Im Folgenden soll daher exemplarisch betrachtet werden, was verändert werden könnte, wenn die Genomeditierung und ggf. die klassische Gentechnik als zusätzliche Maßnahme zur Lösung der bestehenden bzw. zukünftigen Herausforderungen eingesetzt werden können.

Grundsätzlich kann davon ausgegangen werden, dass im Bereich der ackerbaulichen Kulturen, des Gemüsebaus sowie speziell im Bereich der Dauerkulturen (Obst- und Weinbau) durch den Einsatz der gentechnischen Verfahren eine schnellere Etablierung von neuen Sorten mit vorteilhaften Eigenschaften zu erwarten ist (für Details siehe Kapitel 2.2 bis 2.5). Dabei hängt der erfolgreiche und effektive Einsatz gentechnischer Verfahren maßgeblich von der zu betrachtenden Kultur, der zu betrachtenden Herausforderung bzw. einer Kombination von Herausforderungen sowie der effektiven Kombination mit bereits bestehenden Maßnahmen ab (siehe Kapitel 2.2 bis 2.5 und Tabelle 2.2). Nicht alle Herausforderungen lassen sich/werden aktuell durch den Einsatz der gentechnischen Verfahren gleichermaßen effizient adressieren/t. Soweit dies jedoch möglich ist, kommen erhebliche zeitliche Vorteile zum Tragen (Tabelle 2.1). Transgene und auch Genomeditierungsansätze stellen bezüglich einzelner Herausforderungen eine sinnvolle Ergänzung zu bereits bestehenden Maßnahmen dar, da zeitliche Verkürzungen des Züchtungsgangs um mehrere Jahre für wichtige Merkmale erreicht werden können (Tabelle 2.1).

Aufgrund der Genomkomplexität von Weizen ist zu erwarten, dass klassische transgene Ansätze zur Verbesserung von (Resistenz-) Eigenschaften zukünftig, wie auch in der Vergangenheit, keine große Bedeutung erlangen werden. Beispiele für den Einsatz von klassischer Transgenese in Weizen sind die Überführung von Genen, die eine Herbizidtoleranz (VASIL et al., 1992; MELCHIORRE et al., 2002) oder Resistenz gegenüber Ährenfusariosen (DAHLEEN et al., 2001; MACKINTOSH et al., 2007) vermitteln. Im Gegensatz dazu ist zu erwarten, dass Genomeditierungsansätze breiter im Weizen eingesetzt werden und zur Beschleunigung des Züchtungsfortschritts beitragen können (KUMAR et al., 2019; MATRES et al., 2021). Dies ist im Speziellen bei Herausforderungen zu erwarten, die züchterisch "rasch" durch die Modifikation von monogen oder polygenen vererbten Merkmalen bearbeitet werden können (ZHANG et al., 2021). Ansatzpunkte gibt es hier im Bereich Pflanzenschutz bzgl. monogener Resistenzen, Pyramidisierung von verschiedenen (Resistenz)Genen oder Überführung von Genen/Allelen aus Wildarten ohne "linkage drag" (CHEN et al., 2019). Generell sind insbesondere durch den Einsatz von Genomeditierung Fortschritte in den Bereichen Erzeugung von männlich sterilen Pflanzen für die Hybridzüchtung, der Domestizierung von (Wild)Pflanzen zur Erhöhung der genetischen Diversität sowie bei den mittels klassischer Züchtung schwer zu bearbeitenden Genen/Merkmalen (z. B. S-Genen) zu erwarten (CHEN et al., 2019; DAS et al., 2019; CHEN et al., 2020). In diesem Zusammenhang ist das Projekt PILTON (https://pilton.bdp-online.de/) zu nennen, das mittels neuer Züchtungsansätze versucht, multiple und dauerhafte Pilzresistenzen in Weizen zu erzeugen, die mit klassischer Züchtung nur schwer und unter erheblichem Zeitaufwand zu realisieren wären.

Der wissenschaftlich-technische Fortschritt führt zur konstanten Entwicklung neuartiger transgener oder genomeditierter Organismen. Inzwischen sind 884 gentechnisch veränderte Organismen (GVO)

in der Datenbank EUginius aufgelistet (https://euginius.eu/euginius/pages/gmo_listview.jsf, Stand 16.07.2021). Weiterhin ist davon auszugehen, dass der Einsatz von transgenen und Genomeditierungsansätzen bei komplex vererbten Merkmalen oder Merkmalen, deren genetische Grundlage nicht hinreichend bekannt ist, ebenfalls zu einer Beschleunigung der Züchtungsbemühungen führen kann (LI et al., 2020). Dies kann durch die Modifikation von Einzelgenen, die für Schlüsselfunktionen von komplexen Merkmalen (z. B. Trockenstresstoleranz, Nährstoffeffizienz) kodieren, wie z. B. Transkriptionsfaktoren beim Weizen wheat ethylene responsive factor 3 (TaERF3) und wheat dehydration responsive element binding protein 2 (TaDREB2) (KIM et al., 2018)), und Ausschaltung von Repressoren der NUE (ZHANG et al.. 2021) erreicht werden. Die gezielte Modifikation von Einzelgenen durch Genomeditierung kann zur Aufklärung von Genfunktionen und der Identifikation von Kandidatengenen für die Züchtung beitragen (CHEN et al., 2019).

Es konnten jedoch auch Herausforderungen identifiziert werden, in denen transgene bzw. Genomeditierungsansätzen bisher nicht zu einem hinreichenden Lösungsansatz führten. Im Bereich Pflanzenschutz bieten Genomeditierungsansätze bisher nicht die Möglichkeit, Resistenzen gegenüber Insekten zu vermitteln, hier sind derzeit nur transgene Ansätze zeitnah realisierbar (siehe Kapitel 2.3). Für Anpassungen von Kulturpflanzen an Extremwetterbedingungen, die Steigerung des Humusgehaltes und die Vermeidung von Erosion stehen generell nur begrenzte oder indirekte züchterische Maßnahmen zur Verfügung (z. B. Beeinflussung der Pflanzenarchitektur) (siehe Kapitel 2.2 und 2.4).

3. Gentechnik als Baustein für nachhaltige Landwirtschaft – Grundlagen und Entwicklungsszenarien

Dieses Kapitel wird die Auswirkungen der aktuellen Regulierung und möglicher Deregulierungen von Genomeditierung in der europäischen Landwirtschaft qualitativ diskutieren, bewerten sowie Rahmenbedingungen benennen.

Das Gentechnikrecht der Europäischen Union (EU) basiert auf dem Vorsorgeprinzip. Für den Anbau sowie das Inverkehrbringen von gentechnisch veränderten Pflanzen ist eine Zulassung notwendig. Dafür müssen Züchter eine Methode zur Verfügung stellen, mit denen die veränderten Pflanzen zweifelsfrei identifiziert werden können. Die Zulassung erfordert außerdem eine umfangreiche Umweltrisikoprüfung. Obwohl damit gentechnisch veränderte Pflanzen nach einem erfolgreich durchlaufenen Zulassungsverfahren in Europa angebaut werden könnten, ist derzeit nur eine einzige Pflanze zum Anbau zugelassen und wird in nur wenigen EU-Staaten auf Äckern ausgesät. Die Kennzeichnungspflicht und die mangelnde Verbraucherakzeptanz stellen zusätzliche Herausforderungen dar.

Die Durchsetzung der Regulierung für genomeditierte Pflanzen ist zurzeit nicht möglich, weil ein physikalisches Identifizierungsverfahren für punktuelle Sequenzveränderungen (mit ODM, oder SDN-1 und -2) nicht existiert und derzeit auch technisch kaum realisierbar ist. Diese Genomeditierungsverfahren sind ähnlich einer natürlichen Mutation, aber zielgerichtet, und können nicht durch typische Sequenzen als zu einem Verfahren zugehörig identifiziert werden.

Basierend auf den internationalen regulatorischen Entwicklungen, dem Gentechnikrecht der EU und der laufenden Diskussion scheinen die folgenden Rechtsentwicklungen und resultierenden Auswirkungen am wahrscheinlichsten:

• Szenario 1: Alle genomeditierten Pflanzen werden weiterhin als gentechnisch veränderte Organismen reguliert.

Die EU bleibt bei einer restriktiven Regulierung aller GVO für die Züchtung von Kulturpflanzen einschließlich der genomeditierten Organismen. Damit unterlägen alle diese Organismen einem komplexen Zulassungsregime und für alle nicht in der EU zugelassenen GVO gälte weiterhin das Prinzip der Null-Toleranz. Bei der gleichzeitigen Annahme einer breiten Deregulierung von Genomeditierung in anderen Staaten bedeutet eine fehlende Möglichkeit der Identifizierung, dass genomeditierte Produkte im internationalen Verkehr gleichsam unbemerkt in den EU-Markt gelangen können. Jedoch kann man erwarten, dass Interessenverbände genomeditierte Produkte, die in den EU-Handel gelangen, anderweitig qualifizieren werden, zum Beispiel durch Dokumentation bzw. Zertifizierung, Nutzung bestimmter Produkteigenschaften oder auch – wenn möglich – durch die Eigenentwicklung von Identifizierungsmethoden. Zudem ist vorstellbar, dass auch eine Anzeige eines konkreten Verdachtes auf Beimischung administrative und regulatorische Prozesse in Gang setzt, die zu erheblichen Behinderungen und Mehrkosten für Importeure führen können und damit zu einem eingeschränkten Warenverkehr. Unabhängig davon, wie ein Einsickern von genomeditierten Produkten in den europäischen Markt nachgewiesen wird, am Ende werden Importeure die Kosten und Risiken vermeiden und den Handel dieser Produkte einschränken. Durch die Null-Toleranz Regelung von Beimischungen nicht zugelassener GVO kann es dann zu einem vollständigen Erliegen von bestimmten Importen kommen. Solch eine Entwicklung betrifft vor allem jene genomeditierten Produkte, die bald auf den internationalen Märkten verfügbar sein werden, sich in Märkte ohne Regulierung verbreiten und ggf. unbemerkt umfangreich in die EU importiert werden. Basierend auf den bisherigen Untersuchungen zur möglichen Marktreife von genomeditierten Produkten kann davon ausgegangen werden, dass in den nächsten 10 Jahren vor allem Soja- und Getreideimporte betroffen sein werden. Dadurch reduzieren sich die Importe oder die Exporteure erstellen "europäische" Produktionslinien (Trennung, Zertifizierung). Unter der aktuellen Gesetzgebung ist bei einer solchen Entwicklung mit Handelseinschränkungen und damit Verlagerungseffekten der Produktion, Preissteigerungen, Intensivierung der Produktion und etwaige negative Umwelteffekte zu rechnen.

• Szenario 2: Genomeditierte Pflanzen (SDN-1 und SDN-2) fallen nicht unter das EU-Gentechnikrecht.

Der europäische Gesetzgeber entlässt bestimmte Arten von GVO aus der Gentechnikregulierung. Dies scheint vor allem für Organismen denkbar, die mit Genomeditierungsverfahren verändert wurden, die gezielte Mutagenese einsetzen (z. B. SDN-1, -2 und ODM). Für diese hat die Europäische Behörde für Lebensmittelsicherheit (EFSA) im Oktober 2020 festgestellt, dass sie im Vergleich zu Produkten aus klassischer Züchtung keine höheren Risiken mit sich bringen. Derartige Organismen könnten also ohne gentechnikrechtliche Genehmigung vermarktet und genutzt werden. Damit könnten solche genomeditierten Produkte ungehindert im EU-Markt produziert, importiert und genutzt werden. Man kann vermuten, dass dies nur passiert, wenn entsprechende Sorten auch vorzügliche Eigenschaften aufweisen. Das Szenario geht also davon aus, dass transgene Organismen weiterhin den bisherigen EU-Regelungen unterliegen, Organismen, die mit gezielter Mutagenese erzeugt wurden, aber keinen spezifischen Regelungen unterworfen sind.

Ebenfalls denkbar wäre ein Mittelweg mit einer Regulierung der unter Szenario (2) genannten Organismen, bei gleichzeitigen Erleichterungen etwa beim Zulassungsverfahren. Diese Regulierungsperspektive ist mit sehr vielen Unsicherheiten behaftet, sodass dieses Entwicklungsszenario nachfolgend nicht näher beleuchtet werden kann.

In den folgenden Unterkapiteln werden die Auswirkungen der Entwicklungsszenarien (1) und (2) eingeordnet und ihre Wirkungen auf den internationalen Handel (3.2), Einkommen und Wettbewerb (3.3) sowie der Umwelt (3.4) untersucht. Zuvor erläutert Kapitel 3.1 die relevanten nationalen, europäischen und internationalen rechtlichen Rahmenbedingen.

3.1 Rechtliche Rahmenbedingungen (international, EU, national)

3.1.1 Vorgaben aus dem Gentechnikrecht

GVO sowie Lebens- und Futtermittel, welche aus GVO erzeugt wurden, können in der Europäischen Union nur nach erfolgreichem Durchlaufen eines Zulassungsverfahrens angebaut, bzw. in den Verkehr gebracht werden, wie in der europäischen Freisetzungsrichtlinie (2001/18/EG) sowie der Verordnung über genetisch veränderte Lebensmittel vorgesehen (EG) Nr. 1829/2003).

Durch das Urteil des Europäischen Gerichtshofes aus dem Jahre 2018 (Rs. C-528/16, ECLI:EU:C:2018:583) wurde bestätigt, dass die Zulassungspflicht genau wie die anderen Anforderungen des europäischen Gentechnikrechts auch für solche Organismen gelten, in denen mithilfe von NMT gezielte Mutationen hervorgerufen wurden.

Durch die Einfügung des Art. 26b in die Richtlinie 2001/18/EG wurde 2015 die Grundlage dafür geschaffen, dass EU-Mitgliedstaaten den Anbau auch von zugelassenen und risikobewerteten GVO untersagen können, sofern sie dafür "zwingende Gründe" geltend machen können, wie z. B. agrarpolitische Ziele. Zudem ist es vereinzelt dazu gekommen, dass über Zulassungsanträge für den Anbau auch nach mehr als einem Jahrzehnt trotz Vorliegen einer Risikobewertung nicht entschieden wurde (betroffen sind die gentechnisch veränderten (gv) Maissorten GA21 und TC1507 (Vgl. Datenbank unter https://www.transgen.de/zulassung.html).

Vor diesem Hintergrund stellt die Zulassungspflicht unabhängig von der oben bereits erwähnten Problematik der Beibringung eines Identifizierungsverfahrens in jedem Fall eine erhebliche Hürde dar.

3.1.2 Vorgaben für den Anbau von gv Pflanzen

Die kostenintensive und stets auf zehn Jahre befristete Zulassung ist nicht die einzige Bedingung für die Nutzung von GVO in der Landwirtschaft. Beim Anbau von gv Pflanzen sind zusätzliche Anforderungen zu beachten, um unter anderem dem Koexistenzprinzip aus § 1 Nr. 2 GenTG gerecht zu werden. Nach diesem Prinzip ist zu gewährleisten, dass ökologische, konventionelle und gentechnische Produktion nebeneinander existieren können. Zu diesen Anforderungen gehört unter anderem, die benachbart Bewirtschaftenden spätestens drei Monate vor der Aussaat von gv Saatgut zu informieren (vgl. § 3 Abs. 1 Gentechnik-Pflanzenerzeugungsverordnung – GenTPflEV), Mindestabstände zu benachbarten Anpflanzungen einzuhalten (§ 4 GenTPflEV), was gerade für kleine Betriebe ein großes Problem darstellen kann, sowie nach Abschluss des Anbaus von GVO auf Durchwuchs zu kontrollieren (§ 10 GenTPflEV). Ferner ist zum Zweck der Überwachung etwaiger Auswirkungen von GVO auf die Umwelt der Anbau solcher Organismen gem. § 16a Abs. 3 GenTG dem Bundesamt für Verbraucherschutz und Lebensmittelsicherheit (BVL) mitzuteilen, das unter anderem die Standortdaten des Anbaus in ein öffentlich einsehbares Bundesregister einträgt.

Schließlich haben Zulassungsinhaber bereits mit dem Antrag auf Zulassung einen Plan zur Beobachtung der Umweltauswirkungen gemäß Anhang VII der Richtlinie 2001/18/EG einzureichen. Nachdem eine Genehmigung zum Inverkehrbringen eines GVO oder GVO-Produktes erteilt wurde, ist der Genehmigungsinhaber verpflichtet, eine Beobachtung dieser GVO durchzuführen und in regelmäßigen Abständen über die Ergebnisse der Beobachtung gegenüber den zuständigen Behörden zu berichten. Inhalt und Häufigkeit der Berichterstattung werden bereits im Beobachtungsplan festgelegt.

Hinzu kommt, dass trotz der Einhaltung aller Vorschriften dem Bewirtschafter von Flächen mit GVO gemäß § 36a GenTG in Verbindung mit § 906 Abs. 2 BGB verschuldensunabhängige Ausgleichsansprüche drohen, wenn etwa wegen des Eintrages der GVO in andere Flächen die dortigen Agrarerzeugnisse nicht in Verkehr gebracht oder nicht mit einer Kennzeichnung in den Verkehr

gebracht werden dürfen, die nach den für die Produktionsweise jeweils geltenden Rechtsvorschriften eigentlich möglich gewesen wären (z. B. Bio-Siegel).

3.1.3 Vorgaben für die ökologische Produktion

Die Nachhaltigkeitsstrategie der Bundesregierung hat das Ziel, den ökologischen Landbau in Deutschland auf 20 % der Anbaufläche bis 2030 auszubauen. Die "Farm to Fork-Strategie" als Teil des politischen Konzeptes des "European Green Deal" geht darüber hinaus und strebt einen Anteil des ökologischen Landbaus auf 25 % der landwirtschaftlichen Nutzfläche bis zum Jahre 2030 an.

Laut Art. 9 der geltenden EG-Öko-Verordnung (Verordnung (EG) Nr. 834/2007) dürfen GVO und aus oder durch GVO hergestellte Erzeugnisse nicht in der ökologischen/biologischen Produktion verwendet werden. Dieses Verbot wird auch in der ab dem 1. Januar 2022 geltenden novellierten Öko-Verordnung (VO (EU) 2018/848) weiterhin fortbestehen. Maßgeblicher Grund für dieses Verbot ist, dass der Einsatz von GVO nach Auffassung des EU-Gesetzgebers mit dem ökologischen/biologischen Produktionskonzept und der Auffassung der Verbraucher von ökologischen/biologischen Erzeugnissen unvereinbar ist. Obwohl teilweise argumentiert wird, dass die Gentechnik auch für die ökologische Produktion förderlich sein könnte (PURNHAGEN et al., 2021), ist ihr Einsatz nach der europäischen Öko-Verordnung untersagt. Auch aus privatrechtlichen Gründen scheidet ein Einsatz von Gentechnik in der ökologischen Produktion derzeit aus: Soweit ersichtlich verbieten die deutschen Verbände der ökologischen Landwirtschaft den Einsatz von Gentechnik - vergleiche etwa Nr. 2.1 der Bioland-Richtlinien in der Fassung vom 24. November 2020⁹. Auch die International Federation of Organic Agriculture Movements (IFOAM) als weltweiter Dachverband der ökologischen Landwirtschaft lehnt den Einsatz von Gentechnik ab - sie betrachtet das Genom als "unteilbare Einheit" – und untersagt technische Eingriffe.¹⁰

Genomeditierte Pflanzen können vor dem Hintergrund der obigen Ausführungen im Bereich der ökologischen Produktion derzeit keine Rolle spielen.

3.1.4 Vorgaben aus dem Düngerecht

Die rechtlichen Rahmenbedingungen im Bereich Düngung setzen in Deutschland das Düngegesetz, die Düngeverordnung (DüV) und das Düngemittelgesetz. Diese Vorschriften haben jedoch ihrerseits die einschlägigen europarechtlichen Vorgaben einzuhalten.

So hat der Europäische Gerichtshof am 21.6.2018 in einem seit 2014 laufenden Vertragsverletzungsverfahrens geurteilt¹¹, dass Deutschland aufgrund unzureichender Schutzmaßnahmen gegen die Richtlinie 91/676/EWG zum Schutz der Gewässer vor Verunreinigung durch Nitrat aus landwirtschaftlichen Quellen verstoßen hat. Aufgrund dessen wurden die Vorschriften der DüV letztmalig 2020 verschärft. Trotz dieser Verschärfung wird in der Literatur¹² nach wie vor Bedarf für weitere Bemühungen im Düngerecht zur Reduzierung der Nährstoffverluste (vor allem von Stickstoff und Phosphor) aus der Landwirtschaft in die Umwelt gesehen: So ergäben sich etwa

⁹https://www.bioland.de/fileadmin/user_upload/Verband/Dokumente/Richtlinien_fuer_Erzeuger_u nd Hersteller/Bioland Richtlinien_24 Nov_2020.pdf

¹⁰https://www.ifoam.bio/sites/default/files/2020-09/IFOAM%20Norms%20July%202014%20Edits%202019.pdf

¹¹ Urteil des EuGH vom 21.6.2018, Rs. C-543/16, ECLI:EU:C:2018:481.

¹² Siehe etwa Douhaire, Unionsrechtliche Anforderungen an das Düngerecht, NuR 2020, 596.

Anforderungen aus der Richtlinie (EU) 2016/2284 über die Reduktion der nationalen Emissionen bestimmter Luftschadstoffe, da die Emissionshöchstmengen für Ammoniak, für welche die Landwirtschaft zu 95 % verantwortlich sei, in der Vergangenheit nicht eingehalten wurden. Auch gebe das Klimaschutzgesetz des Bundes als Umsetzung der das Pariser Klimaschutzabkommen implementierenden EU-Klimaschutzverordnung (Verordnung (EU) Nr. 2018/842) für den Landwirtschaftssektor sinkende Jahresemissionsmengen (Kohlendioxidäquivalente) vor. Mit Blick auf die stark klimawirksamen Lachgasemissionen durch Düngung sei dies nur über eine Verschärfung des Düngerechts erreichbar.

Davon unabhängig fordert auch die EU-Kommission in ihrer Farm to Fork-Strategie, dass die Nährstoffverluste in der Landwirtschaft um mindestens 50 % und damit auch der Einsatz von Düngemitteln bis 2030 um mindestens 20 % zu reduzieren ist. Vor diesem Hintergrund ist eine Verschärfung des Düngerechts zu erwarten, die den Bedarf an genomeditierten, nährstoffeffizienteren Nutzpflanzen erhöhen kann.

3.1.5 Vorgaben für die Anwendung von Pflanzenschutzmitteln

Der Pflanzenschutz wird auf europäischer Ebene sehr umfassend geregelt, insbesondere mit der Verordnung (EG) Nr. 1107/2009 über das Inverkehrbringen von Pflanzenschutzmitteln.

In Deutschland wird das EU-Recht vor allem mit dem Pflanzenschutzgesetz (PflSchG) und mehreren Verordnungen umgesetzt. Seit 2013 ist der integrierte Pflanzenschutz in Deutschland verbindlich (§ 3 PflSchG), sodass vorbeugende und nicht-chemische Pflanzenschutzmaßnahmen vorrangig anzuwenden sind und die Anwendung chemischer Pflanzenschutzmittel auf das notwendige Maß zu reduzieren ist. Sorten mit Resistenzen gegen Schadorganismen kommen damit als vorbeugende Pflanzenschutzmaßnahme eine besondere Bedeutung zu.

Der Nationale Aktionsplan zur nachhaltigen Anwendung von Pflanzenschutzmitteln (NAP), mit dem die EU-Pflanzenschutz-Rahmenrichtlinie 2009/128/EG über einen Aktionsrahmen der Gemeinschaft für die nachhaltige Verwendung von Pestiziden in Deutschland umgesetzt wird, zielt vor allem auf die weitere Reduktion von Risiken, die durch die Anwendung von Pflanzenschutzmitteln entstehen können (bis 2023 um 30 % gegenüber dem Basiszeitraum 1996-2005) sowie die Förderung der Einführung und Weiterentwicklung von Pflanzenschutzverfahren mit geringen Pflanzenschutzmittelanwendungen im integrierten Pflanzenschutz und im ökologischen Landbau.

Vorgaben für eine mengenmäßige Reduktion der Anwendung von chemisch-synthetischen Pflanzenschutzmitteln gibt es in Deutschland bisher nicht. Jedoch wird aktuell in verschiedenen Bundesländern an Reduktionsstrategien für Pflanzenschutzmittel gearbeitet, die zum Teil sowohl Mengen- als auch Risikoreduktionsziele enthalten. Auch die Farm to Fork-Strategie der EU-Kommission beinhaltet Vorgaben für chemische Pflanzenschutzmittel. Die Kommission zielt darauf ab, die Anwendung und das Risiko chemischer Pflanzenschutzmittel bis 2030 um 50 % zu reduzieren. Um dies zu unterstützen, soll die EU-Pflanzenschutz-Rahmenrichtlinie¹³ geändert werden, um die Umsetzung und Anwendung des integrierten Pflanzenschutzes sowie nicht-chemischer Alternativen zu chemischen Pflanzenschutzmitteln noch stärker zu fördern. Gleichzeitig soll die Dauer der Zulassungsverfahren in den EU-Mitgliedstaaten reduziert werden und das Inverkehrbringen von Pflanzenschutzmitteln mit biologischen Wirkstoffen erleichtert werden.

¹³ Richtlinie 2009/128/EG über einen Aktionsrahmen der Gemeinschaft für die nachhaltige Verwendung von Pestiziden.

Krankheits- und schädlingsresistente Sorten gewinnen vor diesem Hintergrund als vorbeugende Pflanzenschutzmaßnahme noch stärker an Bedeutung, sodass deren schnellere und gezieltere Bereitstellung durch Genomeditierung das Erreichen der Pflanzenschutzmittel-Reduktionsziele unterstützen würde.

3.2 Anpassung des Handels an die Verfügbarkeit gentechnisch veränderter Produkte

Momentan befinden sich laut EU-Kommission (PARISI & RODRIGUEZ-CEREZO, 2021) mehrere Anwendungen von genomeditierten Produkten für die Landwirtschaft kurz vor der Marktreife. Hierzu zählen bei Körnermais, Soja, Reis und Kartoffel einige klassische Anwendungen wie Herbizidtoleranz, Pilzresistenz, veränderte Öl- oder Stärkezusammensetzung oder nichtbräunende Früchte und Knollen. Neuartig sind Ansätze zur Veränderung der Nährstoffzusammensetzung bei der Tomate sowie Herbizidtoleranz bei Kichererbse und Flachs. Im kommerziellen Anbau befindet sich bereits eine genomeditierte Sojapflanze mit einem erhöhten Ölsäuregehalt, hergestellt mittels TALEN. Zudem ist eine Tomate mit erhöhtem Phytohormongehalt (GABA) verfügbar, die blutdrucksenkende Wirkung hat und mittels CRISPR/Cas erzeugt wurde. Dieses Jahr wird zudem ein mittels CRISPR erzeugter Wachsmais in den Anbau kommen.

Soja, Mais und Reis sind aktuell die wichtigsten pflanzlichen Importprodukte in die EU. Zwischen 2016 und 2020 wurden netto durchschnittlich 16 Mio. t Sojaschrot, 14 Mio. t Sojakörner, 14 Mio. t Körnermais und 1,3 Mio. t Reis in die EU importiert. Sojaschrot und Sojabohnen werden vor allem als eiweißreiches Futtermittel in der Veredlungswirtschaft eingesetzt. Auch Maisimporte als Futtermittel stiegen in diesem Zeitraum stark an. Soja wird hauptsächlich aus den USA, Brasilien und Kanada importiert.

Die Schweiz, Norwegen und das Vereinigte Königreich erwägen derzeit neue Gesetze, die die Zulassung von genomeditierten Pflanzen erleichtern (SCHMIDT et al., 2020). Anders als in der EU, wo sich die GVO-Gesetzgebung stark auf den Produktionsprozess konzentriert, basiert die Risikobewertung in den USA und Kanada überwiegend auf dem Endprodukt (SPRINK et al., 2016). In diesen Fällen bestand keine Notwendigkeit, die bereits bestehenden Regulierungssysteme speziell auf NMT anzupassen (MENZ et al., 2020). Einige Länder haben die Definition eines LMO ("living modified organism") des Cartagena Protokolls über die biologische Sicherheit (Art. 3, g) so implementiert, dass die Grenze zwischen einem GVO und einem Nicht-GVO bei neuem genetischem Material liegt. Da bei SDN-1 kein neues genetisches Material in das bestehende Genom eingebracht wird, fallen die mit SDN-1 erzeugten Organismen nicht unter die Implementation des Protokolls (z. B. in Japan) und werden daher gemeinhin als ähnlich wie die mit herkömmlichen Züchtungsverfahren erzeugten Organismen angesehen (TSUDA et al., 2019). Länder wie Argentinien, Australien, Brasilien, Israel und Japan haben SDN-1-produzierte Organismen ausdrücklich von den GVO-Vorschriften ausgenommen (MENZ et al., 2020; ECKERSTORFER et al., 2019; BÖMEKE et al., 2018). Viele andere Länder debattieren derzeit über den Status von genomeditierten Nutzpflanzen. Im Falle Chinas, was rund 60 % aller CRISPR-Patente in der Landwirtschaft hält und ein großer Importeur von Agrarprodukten ist, gibt es unterschiedliche Ansichten, in welche Richtung sich die Vorschriften für Genomeditierung entwickeln könnte (MENZ et al., 2020; SCHMIDT et al., 2020; COHEN et al., 2019). Eine spezifische Regelung ist noch nicht in Kraft.

Warenströme mit GVO müssen von konventionellen oder ökologischen Warenströmen getrennt werden, um Beimischungen entlang der Kette zu verhindern. Dies macht zusätzliche Maßnahmen/Arbeitsschritte notwendig (z. B. Spülen, unterschiedliche Silos/Lager, Verhinderung von Loss & Spillage, Probenahme, Dokumentation etc.). Hierdurch entstehen zusätzliche Kosten insbesondere auch bei denjenigen Marktteilnehmern, die GVO-freie Produkte anbieten. Diese Kosten sind auch bei der gegenwärtigen Regulierung in der EU von genomeditierten Produkten zu erwarten. GVO-Importe bedienen gegenwärtig schwerpunktmäßig den Futtermittelmarkt.

Im Gegensatz zur Tierfütterung spielt der Import von gentechnisch veränderten Lebensmitteln keine nennenswerte Rolle, da hierfür in der EU die Akzeptanz der Verbraucher fehlt. Ob sich dies bei

genomeditierten Pflanzen ändert, wird – neben der Frage nach einer europäischen Importzulassung als Lebensmittel – auch von den betroffenen Pflanzen und ihrer Eignung für die menschliche Ernährung abhängen.

Im Folgenden werden die Auswirkungen der beiden Szenarien aufgezeigt.

3.2.1 Handel - Szenario 1: Alle genomeditierten Pflanzen werden weiterhin als gentechnisch veränderte Organismen reguliert

- Landwirte werden außerhalb der EU genomeditierte Produkte anbauen und auf den Markt bringen. Es ist zu erwarten, dass mit der Marktreife von genomeditierten Pflanzen außerhalb der EU entsprechende Warenströme auch in die EU gelangen werden. Solange für diese keine Importzulassung vorliegt, handelt es sich um in der EU nicht marktfähige Produkte gemäß den geltenden Regularien (Nulltoleranz). Anders als bei GVO ist jedoch der Nachweis und die Identifizierbarkeit der Genomeditierung momentan nicht sicher. Unbemerkte illegale, aber physisch nicht identifizierbare Importe können daher die Folge sein. Die Importeure selbst sind möglicherweise mit Haftungsrisiken konfrontiert, sollten sie nicht zugelassene GVO in die EU einführen. Ein Produkt, welches in einem Land zugelassen ist, aber nicht in einem anderen, bezeichnet man als "regulatorische Asynchronität", (vgl. WESSELER & KALAITZANDONAKES 2019). Bei einer Null-Toleranz-Politik, wie im Fall der EU, müssen diese Produkte vom Markt genommen werden (Roïz, 2014).
- In der Vergangenheit wurden Fälle dokumentiert, in denen in verschiedenen Ländern eine unterschiedliche Zulassung zu einem Stillstand bzw. einer erheblichen Verringerung des Handels geführt hat. Ein Beispiel ist die vom Unternehmen Syngenta entwickelte Maissorte Agrisure VipteraTM (MIR162), die seit 2011 kommerziell angebaut wird. Viele Länder genehmigten die Einfuhr dieser Maissorte. China hingegen plante nur die Zulassung. Aufgrund des Vorhandenseins des Events MIR162 in Lieferungen aus den USA begann China, Maisimporte aufgrund seiner Null-Toleranz-Politik jedoch zurückzuweisen. Eine von der US-amerikanischen National Grain and Feed Association (NGFA) durchgeführte Studie zum Fall MIR162 ergab wirtschaftliche Verluste von 1 bis 2,6 Mrd. US\$ für die Wertschöpfungskette in den USA. In Anbetracht der Erfahrungen mit zurückgewiesenen GVO-Lieferungen ist davon auszugehen, dass Händler eine Lieferung von Produkten, die keine Zulassung in der EU haben, einstellen bzw. reduzieren werden.
- GOCHT et al. (2021) analysierten die wirtschaftlichen und ökologischen Folgen eines generellen Importstopps für Soja und Getreide in die EU¹⁴ mithilfe des komparative statischen Gleichgewichtsmodells CAPRI. Danach führt der Importstopp zu folgenden Effekten: Die Importe und Exporte der EU gehen unter solch einem Szenario erheblich zurück. Gleichzeitig steigen die inländische Produktion und die Preise in der EU.
- Das EU-Marktvolumen (inländische Produktion und Importe) sinkt bei Weizen um 3 %, bei Mais um 14 %, bei anderen Getreidearten um 25 % und bei Gerste um 2 %. Das Marktvolumen für Soja sinkt bei Sojakörnern um 27 %, Sojaöl um 52 % und für Sojamehl um 74 %. Die Sojabohnenproduktion in der EU steigt um 265 %. Gleichzeitig steigt der Import von Raps (23 %), Sonnenblumenkuchen (79 %) und Hülsenfrüchten (55 %), um die Eiweißlücke zu schließen.

Pflanzenart kommen.

_

Da genomeditierte Pflanzen derzeit weitgehend nicht identifiziert werden können, würde es, bei einer Ausbreitung des Anbaus solcher Pflanzen in den Exportländern und bei einem Verbot des Imports genomeditierter Pflanzen in die EU, faktisch zu einem generellen Importstopp dieser

- Sojakuchen als Futtermittel geht um 73 % zurück und wird durch eine verstärkte Verwendung von Rapskuchen (+15 %) und Sonnenblumenkuchen (+40 %) ersetzt.
- Generell ist ein Anstieg der Einfuhren von Ölsaaten und Eiweißpflanzen festzustellen, die nicht auf Soja basieren. Darüber hinaus ist ein Anstieg der Einfuhren von tierischen Erzeugnissen zu verzeichnen, da die heimische Produktion in der EU weniger wettbewerbsfähig wird. Der Anstieg der Einfuhren von Sonnenblumenkuchen stammt hauptsächlich aus Mittel- und Südamerika und Nicht-EU-Europa, während der Anstieg der Einfuhren von Raps hauptsächlich auf einen Anstieg der Einfuhren aus Nordamerika und Nicht-EU-Europa zurückzuführen ist. Der Anstieg der Importe von Hülsenfrüchten kommt aus Nordamerika und Nicht-EU-Europa, wie der Ukraine.
- Die geringere Verfügbarkeit von Soja als eiweißreiches Futtermittel und dadurch gestiegene Preise führen zu steigenden Produktionskosten. Die EU-Produktion für Schweine und Geflügel sinkt um ca. -10 %. Erhebliche Preissteigerungen sind bei Soja in der EU zu beobachten (+169 % für Saatgut, +59 % für Öl und +162 % für Kuchen). Für Raps, Sonnenblumenkerne, Hülsenfrüchte und Schweinefleisch steigen die Preise in allen Regionen der Welt, einschließlich der EU, aufgrund geringerer EU-Exporte und höherer EU-Importe. Dies gilt für Sonnenblumenkerne (bis zu 11 %), Rapssamen (bis zu 13 %) und Hülsenfrüchte (bis zu 11 %). Außerdem wird Fleisch teurer. Die Preise für Schweinefleisch steigen zwischen 1 und 17 %.
- Für Mittel- und Südamerika sind sinkende Preise die Folge (-15 % für Kuchen und -3 % für Sojabohnen). Bei Sojaöl und Sojakuchen sinken die Preise auch in anderen Regionen, einschließlich Nordamerika.
- Der im Modell ermittelte Anstieg der Preise in der EU macht es rentabel, intensiver zu produzieren, z. B. mit einem höheren Einsatz von Betriebsmitteln wie Düngemitteln. Das hat eine Verminderung von extensiv bewirtschaftetem Grünland und die Zunahme von intensiv genutztem Grünland zur Folge. Dies wirkt sich auf Umweltgüter wie die biologische Vielfalt oder zusätzliche Nährstoffemissionen aus. Die Erzeugung von Futtermais geht aufgrund der Substitution durch eiweißhaltige Pflanzen zurück. Die Änderung der Produktionsintensität ist auch bei Getreide zu beobachten, wo die Erträge um 2 % steigen, bei Ölsaaten (1 bis 3 %) und bei Hülsenfrüchten (7 %). Sowohl in den östlichen als auch in den westlichen Teilen der EU ist eine Intensivierung der Produktion zu beobachten. Die Sojaproduktion steigt insbesondere in Rumänien, Kroatien, Ungarn, der Slowakischen Republik und Italien.
- Höhere Kosten in Höhe von rund 18,6 Mrd. EUR entstehen Verbrauchern durch höhere Preise. Der Agrarsektor profitiert durch höhere Preise, und es stehen rund 20,8 Mrd. EUR mehr für das Faktoreinkommen in der EU-Landwirtschaft zur Verfügung. Der positive Einkommenseffekt wird jedoch ungleich in der Landwirtschaft verteilt sein, insbesondere zwischen landwirtschaftlichen Betrieben mit Schwerpunkt Ackerbau und tierintensiven Betrieben.
- Die Intensivierung der Landwirtschaft und hier vor allem der höhere mineralische Düngemitteleinsatz sowie die zusätzliche Flächennutzung für die Landwirtschaft führen insbesondere in der EU zu höheren Nährstoffüberschüssen, obwohl die Weißfleischproduktion in der EU und damit die Erzeugung von Gülle zurückgeht.
- Die globalen Treibhausgasemissionen nehmen zu, da die globale Umverteilung der Produktion von Soja und Raps nicht nur in Bezug auf die Produktionskosten, sondern auch auf die Treibhausgasemissionen weniger effizient ist. Die Sojaproduktion in der EU und die Tierproduktion außerhalb der EU sind in Bezug auf die Treibhausgasemissionen vergleichsweise ineffizient. Insgesamt sind die Nettoauswirkungen auf die Treibhausgasemissionen beträchtlich.
- Zusammenfassend stellten die Autoren fest, dass der Ersatz von Proteinen und Ölen, die ursprünglich in Form von Soja für Futtermittel (für die Schweine-, Geflügelmast und Wiederkäuer)

- und als Öl (für die Biodieselproduktion) importiert wurden, zu einer Anpassung der Märkte führt, indem die EU-Produktion von Hülsenfrüchten und Soja erhöht wird, die Importe von Ersatzprodukten zunehmen (Raps, Sonnenblumen und Hülsenfrüchte) und Futterproteine durch eine intensivere Nutzung und durch höhere Erträge (auch von Grünland) in der EU ersetzt werden.
- Dieser Analyse liegt zugrunde, dass nur Getreide oder Sojabohnen durch einen Importstopp betroffen sind. Sie betrachtet weder genomeditierte tierische noch andere pflanzliche oder weiterverarbeitete Produkte. Falls zusätzlich genomeditierte Pflanzen wie Raps, Hülsenfrüchte oder Sonnenblumen auf den Markt drängen und nicht mehr in die EU importiert werden dürften, würde es zu deutlich höheren Preis- und Marktbilanzeffekten kommen, wobei die Wirkungsrichtung wahrscheinlich größtenteils bestehen bleibt. Weiterhin wurden in Ermangelung zuverlässiger Informationen über die spezifischen Eigenschaften genomeditierter Pflanzen (höhere Erträge, weniger Pflanzenschutz) keine Produktivitätseffekte berücksichtigt, die, so wurde angenommen, die Wettbewerbsfähigkeit außerhalb und die relativen Produktionskosten innerhalb der EU erhöhen würden.

3.2.2 Handel - Szenario 2: Genomeditierte Pflanzen (SDN-1 und SDN-2) fallen nicht unter das EU-Gentechnikrecht

- Landwirte in der EU können in diesem Szenario genomeditierte Produkte, gezüchtet durch SDN-1 und SDN-2, anbauen und handeln. Es würde keine spezielle Regelung dafür geben. Nachweis- und Identifizierungsverfahren wären nicht mehr notwendig. Klassische GVO unterliegen jedoch wie bisher einer EU-Zulassung. Solch ein Szenario kann als die Fortführung des bisherigen Zustands angesehen werden, da aktuell noch keine genomeditierten Produkte auf dem Markt sind. Ausnahme könnte zukünftig sein, wenn andere Länder SDN-1 und SDN-2 regulieren, und genomeditierte EU-Produkte in diese Länder exportiert werden sollen.
- Es wird erwartet, dass Genomeditierung zu einer schnelleren Umsetzung von Züchtungszielen führen wird, was zu ökonomischen und ökologischen Vorteilen führen könnte. Wenn solche Vorteile existieren, kann die Landwirtschaft davon auch im internationalen Handel profitieren. Solche Vorteile sind jedoch bisher kaum quantifizierbar, weil die Entwicklungen noch keine Marktreife erlangt haben.
- Wie sich Anbau, Verarbeitung und Handel von ökologischen Produkten entwickeln, ist in diesem Szenario nicht einfach zu bewerten. Einerseits sind SDN-1 und SDN-2 basierte Züchtungen keine Gentechnik und könnten rechtlich ohne Einschränkung auch im ökologischen Landbau genutzt werden. Andererseits erlaubt der Ökolandbau keine physikalischen Eingriffe in das Genom. Ferner sind einige der Züchtungsziele, die mit SDN-1 und SDN-2 bearbeitet werden, wie Herbizidtoleranz, für den ökologischen Landbau nicht von Bedeutung, da hier keine chemischen Pflanzenschutzmittel eingesetzt werden dürfen.

3.3 Auswirkungen des Einsatzes von Gentechnik auf die Wettbewerbsfähigkeit und das Einkommen in der Landwirtschaft sowie die Struktur der Saatgutbranche

Nachdem im vorherigen Kapitel mögliche Handelseffekte für unterschiedliche Szenarien der rechtlichen Einordnung von Genomeditierungstechniken beschrieben wurden, wird nachfolgend auf Basis einer Literaturanalyse abgeleitet, welche Effekte die betrachteten Szenarien auf die Wettbewerbsfähigkeit und das Einkommen der landwirtschaftlichen Betriebe sowie auf die Saatgutbranche haben.

3.3.1 Wettbewerbsfähigkeit und das Einkommen in der landwirtschaftlichen Produktion

In den letzten 25 Jahren gab es zahlreiche Studien, in denen die Auswirkungen von gv Pflanzen auf den Ertrag, den Einsatz von Pflanzenschutzmitteln (PSM) sowie die Profitabilität der Kulturen untersucht wurden. Eine Metastudie von KLÜMPER & QAIM (2014), in der 147 Studien berücksichtigt werden, kommt zu folgenden Ergebnissen.

- Die Auswirkungen von gv Kulturen auf Erträge, PSM-Aufwand und Profitabilität variieren stark in Abhängigkeit der betrachteten Region sowie der betrachteten Pflanzeneigenschaften. Weiterhin gibt es erhebliche Unterschiede zwischen einzelnen Studien. Im Mittel stiegen die Erträge durch den Einsatz von gv Kulturen um 22 %. Während der Ertragsvorteil in Entwicklungsländern bei 29 % liegt, führen gv Kulturen in Industrieländern im Mittel lediglich zu Ertragssteigerungen von 8 %. Hinsichtlich der Pflanzeneigenschaften erreichen Insektenresistente GVOs (IR) im Mittel Ertragsvorteile von 25 %, während sich bei Herbizid-toleranten (HT) GVOs lediglich mittlere Ertragszuwächse von 9 % ergeben.
- Auch der Einfluss auf den Betriebsmittelinput, wie PSM, unterscheidet sich deutlich zwischen den Pflanzeneigenschaften. Während IR-Pflanzen zu PSM-Einsparungen von durchschnittlich 42 % geführt haben, ist bei HT-Pflanzen die ausgebrachte PSM-Menge im Mittel um 2 % gestiegen.
- Für beide Pflanzeneigenschaften werden höhere gv Saatgutkosten durch die Ertragszuwächse und Einsparungen für PSM mehr als ausgeglichen, so dass die mittleren Gewinnzuwächse mit 64 % für HT-Pflanzen bzw. 69 % für IR-Pflanzen in einer ähnlichen Größenordnung liegen. Allerdings sind die Profitabilitätszuwächse in Entwicklungsländern mit über 75 % deutlich höher als in Industrieländern (+34 %). Ursache für die regionalen Unterschiede ist, dass in Entwicklungsländern häufig tropische und subtropische Bedingungen mit einem höheren Schädlingsdruck vorherrschen. Hinzu kommt, dass in Industrieländern die konventionellen Anbaumethoden fortschrittlicher sind, so dass sich durch den Einsatz von GVO geringere Ertragszuwächse ergeben. Auch die Saatgutkosten sind aufgrund des Patentrechts in Industrieländern höher und verringern somit die Wirtschaftlichkeit.

Diese Ergebnisse werden in weiteren Metastudien grundsätzlich bestätigt, auch wenn die absolute Höhe der Unterschiede leicht abweicht (FINGER et al., 2011; AREAL et al., 2013; BROOKES & BARFOOT 2020). PELLEGRINO et al. (2018) werteten verfügbare Feldversuche überwiegend aus Nord- und Südamerika sowie Europa zwischen 1996 und 2018 zu den agronomischen Effekten des gv Maisanbaus aus. Demnach liegen die Ertragsvorteile von gv Maissorten zwischen 5 und 24 %. Die höchsten Ertragsvorteile erzielen Sorten mit sogenannten Stacked Genes, in denen mehrere gv Eigenschaften miteinander kombiniert werden. Weiterhin ist nach bisherigen Versuchsergebnissen die Mykotoxinbelastung im Erntegut von gv Sorten etwa ein Drittel geringer als bei konventionellen Maissorten (Pellegrino et al., 2018).

Für Europa existieren aufgrund kaum vorhandener Anbauerfahrungen von GVO weniger Arbeiten zur Wirtschaftlichkeit ihres Anbaus. Bisherige Studien für Europa zeigen, dass die Wirtschaftlichkeit für den Anbau von Bt-Mais (ein IR-GVO) von der Betriebsstruktur, dem regionalen Befallsdruck durch Schädlinge sowie der Maisanbaufläche abhängen (BREUSTEDT et al., 2008; CONSMÜLLER et al., 2010). Die bisherigen Ergebnisse zu Deckungsbeitragsvorteilen von Bt-Mais schwanken in Europa zwischen 50 und 180 USD/ha. Vergleichsweise hohe Deckungsbeitragsvorteile ergeben sich in Regionen mit hohem Befallsdruck durch Maiszünsler in Rumänien, Spanien, Portugal und Frankreich (FINGER et al., 2011; BROOKES, 2007; AREAL et al., 2013).

Zur Sicherung der Koexistenz von GVO, konventioneller Landwirtschaft und dem Ökolandbau müssen Landwirte in Europa Auflagen beim Anbau einhalten. Hierzu zählen vor allem Abstandsauflagen zu benachbarten Kulturen sowie die Übernahme von Haftungsrisiken für GVO-Verunreinigungen auf Nachbarfeldern. Die Einhaltung dieser Auflagen führt nach CONSMÜLLER et al. (2010) insbesondere in Regionen mit kleineren Flächenstrukturen sowie für kleinere Betriebe zu höheren Kosten. Nach VENUS et al. (2017) werden die Kosten der Koexistenz stark durch die Ausgestaltungsregeln beeinflusst. Wenn der Mindestabstand zu benachbarten Kulturen von 50 auf 100 m erhöht wird, steigen die Kosten der Abstandsauflagen von 4 bis 70 €/ha auf 100 bis 170 €/ha. Noch stärker wirkt sich die Ausgestaltung der Haftungspflichten auf die Kosten der Koexistenz aus. Die derzeit gültige uneingeschränkte und vollumfängliche Haftung führt zu Kosten in der Größenordnung von 190 €/ha. Würde die Haftung auf fahrlässig verursachte Schäden begrenzt werden, würden die Kosten auf 60 €/ha sinken. Insgesamt übersteigen derzeit die Kosten der Koexistenz häufig den zusätzlichen Nutzen, so dass selbst bei verfügbaren gv Sorten der Anbau in vielen Regionen unwirtschaftlich ist.

In Deutschland müssen Flächen, auf denen gv Sorten anbaut werden sollen, zusätzlich in einem Register des BVL gemeldet werden. Da die Flächeninformationen öffentlich einsehbar sind, haben Gentechnikgegner in der Vergangenheit häufig den Aufwuchs zerstört oder andere Sabotageaktionen durchgeführt (Consmüller et al., 2009). Dies dürfte zu weiteren erheblichen Kosten führen, die bisher jedoch nicht quantifiziert wurden.

Mit Blick auf die betrachteten Zukunftsszenarien lassen sich folgende Schlussfolgerungen aus den Erfahrungen mit der Gentechnik ableiten.

3.3.1.1 Wetbewerb - Szenario 1: Alle genomeditierten Pflanzen werden weiterhin als gentechnisch veränderte Organismen reguliert

- Die sich aus den Vorschriften der Koexistenz ergebenden Kosten wären prohibitiv hoch, so dass Landwirte in Europa nicht von den Vorteilen hinsichtlich möglicher Inputeinsparungen sowie den pflanzenbaulichen und betriebswirtschaftlichen Vorteilen der Genomeditierung profitieren könnten. Hinzu kommt, dass bisher keine Verfahren zur sicheren Identifikation verfügbar sind, so dass der Anbau rechtlich wahrscheinlich nicht zulässig wäre. Selbst wenn der Anbau ohne verfügbares Identifikationsverfahren zulässig wäre, würde dies zu erheblichen Rechtsunsicherheiten im Anbau führen (vgl. Kapitel 3.1). Im Ergebnis ist somit davon auszugehen, dass genomeditierte Pflanzen nicht in Europa angebaut würden.
- Sollten, wie zu erwarten ist, zahlreiche Drittlländer SDN-1 und SDN-2 Mutationen nicht als Gentechnik einstufen, resultieren daraus internationale Wettbewerbsnachteile. Bisherige Analysen im Rahmen der Rentabilität von Kulturen kommen zu Rentabilitätsvorteilen von gv Kulturen in Industrieländern von 0 bis zu 34 % (s. o.). Ein wichtiger Faktor für die internationale Wettbewerbsfähigkeit sind die Flächenkosten, die sich im Wesentlichen aus der Grundrente des Anbaus ergibt. Sollte sich das Agrarpreisniveau aufgrund des GE-Anbaus und den daraus

resultierenden Ertragszuwächsen verringern, ist zunächst mit Einkommensrückgängen in Europa zu rechnen. Allerdings dürften sich bei dann geringeren Grundrenten langfristig auch die Pachtpreise anpassen und einen Teil der Einkommensrückgänge ausgleichen. Wenn aufgrund fehlender Identifikationsmethoden jedoch Importbeschränkungen von Ölsaaten aus Drittstaaten nach Europa kommen, ist mit einem höheren Preisniveau in Europa zu rechnen, was positive Einkommenseffekte für Ackerbaubetriebe nach sich zieht (vgl. Kapitel 3.2).

- Die Wettbewerbsfähigkeit der konventionellen Produktion ist im Vergleich zur ökologischen Produktion in diesem Szenario tendenziell geringer als in Szenario 2, da die konventionellen Betriebe die Rentabilitätsvorteile der Genomeditierung nicht realisieren können. Sollte das Preisniveau in Europa steigen (vgl. Kapitel 3.2) und der Preisabstand auf Ebene der Verbraucher zwischen ökologischen und konventionellen Produkten geringer ausfallen als bisher, ist zu erwarten, dass Verbraucher den Konsum von Bioprodukten erhöhen und somit die Marktanteile des Ökosektors steigen (PURNHAGEN & WESSELER 2020).
- Wenn in anderen Ländern SDN-1- und SDN-2-Mutationen nicht als Gentechnik eingestuft werden und es keine Identifikationsmöglichkeiten gibt, besteht die Möglichkeit, dass der Ökosektor in Europa insgesamt betrachtet an Wettbewerbsfähigkeit verliert. Wenn nämlich Ökoverbände in anderen Teilen der Welt trotz der ablehnenden Haltung der Internationale Vereinigung der ökologischen Landbaubewegungen (IOFAM) den Anbau ermöglichen sollten, könnten in diesen Ländern Ökoprodukte mit genomeditierten Pflanzen günstiger hergestellt werden (PURNHAGEN & WESSELER 2020). Weil genomeditierte Pflanzeneigenschaften nicht identifizierbar sind, könnten diese Produkte illegal auf den EU Markt gelangen. Dieser Umstand wird den Aufwand der Rückverfolgbarkeit im Ökosektor weiter erhöhen.

3.3.1.2 Wettbewerb - Szenario 2: Genomeditierte Pflanzen (SDN-1 und SDN-2) fallen nicht unter das EU-Gentechnikrecht

- Für dieses Szenario ist im Vergleich zu Szenario 1 aus folgenden Gründen mit einer höheren Rentabilität sowie internationalen Wettbewerbsfähigkeit der Betriebe zu rechnen: (a) eine zu erwartende Akzeptanz entsprechender Produkte auf Seiten der abnehmenden Hand, (b) eine schnellere Verfügbarkeit von Sorten mit potentiellen Vorteilen für den Anbau in nachhaltigen Anbausystemen und damit einhergehend (c) eine Verringerung von Kosten, wie z.B. für Pflanzenschutz- und Düngemittel oder klimabedingte Ertragsverluste. So zeigen beispielsweise Forschungsergebnisse im Bereich von Pflanzenkrankheiten ein erhebliches Einsparpotenzial an Fungiziden durch eine konsequente Nutzung der Resistenzeigenschaften von Sorten (vgl. Kapitel 2.2). KEHLENBECK & RAJMIS (2017) ermittelten für Winterweizen beim Anbau von (konventionell gezüchteten) Sorten mit jeweils guter Resistenz gegen verschiedene Pilzkrankheiten und bei situationsbezogener, an den tatsächlichen Befall angepasster Fungizidbehandlung, Einsparungen von 60 bis 100 €/ha (Fungizidkosten plus Ausbringung), je nach Jahr und Standort. Allerdings werden die Einsparpotenziale für Fungizide von konventionell gezüchteten Sorten mit Krankheitsresistenz in der Praxis häufig nicht ausgeschöpft, da sowohl resistente als auch anfällige Sorten oftmals mit der gleichen Fungizid-Strategie behandelt werden (KLOCKE et al., 2017). Hier zeigt sich, dass auch neue genomeditierte Sorten mit begleitender Beratung und Unterstützung der Landwirte in die Praxis eingeführt werden müssen, um Managementfehler zu vermeiden.
- Da der Einsatz von SDN-1- und SDN-2-Kulturen nicht identifizierbar ist, müsste der Ökosektor eine Genomeditierungsfreiheit seiner Produkte über Zertifizierungssysteme nachweisen, die mit zusätzlichen Kosten verbunden sind. Aufgrund der fehlenden Identifizierbarkeit können trotz des Zertifizierungssystems Produkte mit SDN-1 und SDN-2 Punktmutationen auf den Öko-Markt

gelangen und die Glaubwürdigkeit des Sektors beeinträchtigen (NUIJTEN et al., 2017). Hinzu kommt, dass konventionelle Landwirte ihre Berufskollegen in diesem Szenario nicht mehr informieren müssten, wenn sie genomeditierte Sorten anbauen. In der Folge könnten Ökoflächen mit Pollen von genomeditierten Sorten verunreinigt werden und die Verfügbarkeit von nicht genomeditiertem Saatgut für den Ökolandbau stark eingeschränkt sein.

3.3.2 Einfluss auf die Struktur der Saatgutbranche

Seit Jahrzehnten ist eine Konsolidierung von Unternehmen auf den globalen Märkten für Saatgut und Pflanzenschutzmittel zu beobachten, weshalb eine zunehmende Marktmacht befürchtet wird. Diese Entwicklung hat sich zwischen 2015 und 2018 durch Firmenübernahmen und Zusammenschlüsse global tätiger Unternehmen weiter verschärft, so dass derzeit vier große Unternehmen die Märkte dominieren. Besonders hohe Konzentrationstendenzen sind auf den Saatgutmärkten für Mais, Soja und Baumwolle zu beobachten, die durch sehr hohe gv-Anteile geprägt sind. Dagegen sind die Saatgutmärkte für Raps und Getreide in Europa weniger stark konzentriert (DECONINCK 2020). Häufig wird in der öffentlichen Diskussion zur Entwicklung der Saatgutbrache befürchtet, dass dies zu negativen Effekten hinsichtlich der Saatgutpreise sowie einer mangelnden Innovationskraft aufgrund eines fehlenden Wettbewerbs führen könnte. Bisherige statistische Auswertungen zu Zusammenhängen zwischen der Marktkonzentration und Neuzulassungen von Sorten sowie der Preisentwicklung des Saatguts bestätigen diese Befürchtungen jedoch nicht (DECONINCK 2019).

Haupttreiber für den Konzentrationsprozess ist, dass Unternehmen in der Biotechnologiebranche über eine sehr hohe Innovationskraftverfügen müssen, um am Markt wettbewerbsfähige Sorten und Traits anbieten zu können. Dies führt zu einem immensen Investitionsbedarf in die Forschung und somit zu hohen Fixkosten. Um diese Fixkosten zu reduzieren, versuchen die Unternehmen, durch Zusammenschlüsse "economies of scale" zu erreichen. Die hohen Fixkosten für Forschung und Entwicklung wirken dabei als Eintrittsbarriere für kleinere Unternehmen (DECONINCK 2020; ANDERSON & SHELDON 2017). Im Vergleich zu gv Pflanzen und der konventionellen Züchtung sind die Entwicklungszeiten und -kosten für genomeditierte Pflanzen deutlich kürzer (vgl. Kapitel 2.6), sodass sich die Investitionen für Kulturen mit kleinerer Anbaufläche schneller rentieren und auch kleinere Unternehmen von dieser Technologie profitieren können (Bullock et al., 2021).

Ein erheblicher Teil der Entwicklungskosten neuer GVO-Eigenschaften entfällt auf den Zulassungsprozess. Je nach Quelle liegen die Kosten für die Risikobewertung und das Zulassungsverfahren in Europa und Nordamerika zwischen 6 und 35 Mio. USD und betragen bis zu 25 % der Gesamtkosten (KALAITZANDONAKES et al., 2007; McDougall 2011). Darüber hinaus ist der Zeitaufwand für den Zulassungsprozess mit fünf bis neun Jahren (SMART et al., 2017) erheblich. Somit hat die Einstufung von genomeditierten Sorten als GVO bzw. nicht-GVO einen erheblichen Einfluss auf die Entwicklungskosten. Lassoued et al. (2021) ermittelten auf Basis von Experteneinschätzungen, dass sich die Entwicklungs- und Zulassungskosten für genomeditierte Sorten um 55 % erhöhen, wenn sie als GVO eingestuft werden.

Aufgrund der hohen Entwicklungskosten in der Gentechnik ist ein umfassender Schutz des geistigen Eigentums erforderlich, um die Wirtschaftlichkeit der Unternehmen zu gewährleisten. Traditionell erfolgt dies in der Pflanzenzüchtung durch den Sortenschutz. Er sichert den Züchtern exklusive Vermarktung ihrer neuen Sorten zu. Gleichzeitig wird über das Züchterprivileg sichergestellt, dass andere Unternehmen das genetische Material für weitere Zuchtaktivitäten nutzen können. Genetische Verfahren sowie damit entwickelte Pflanzeneigenschaften (Traits) sind hingegen patentierbar. Anders als im Sortenrecht greift das Züchterprivileg im Patentrecht nicht, so dass die Züchter für die Nutzung

einer Technologie oder einer Pflanzeneigenschaft eine Lizenz erwerben müssen. Die damit verbundenen rechtlichen Transaktionskosten können für kleinere Unternehmen prohibitiv hoch sein (BJØRNSTAD, 2016; KOCK, 2021). Bei einem zu starken und weit reichenden Patentschutz kann die oben beschriebene Marktkonzentration somit verstärkt werden und die Handlungsfreiheit der Forschung einschränken (HOWARD, 2015). Vor diesem Hintergrund sind effiziente Regulierungen zum Patentschutz erforderlich, die den Anreiz für Innovationen und die Handlungsfreiheit der Forschung ausbalancieren (QAIM, 2020).

Auch für künftige genomeditierte Sorten könnten Patentrechte angemeldet werden. Bei einer starken Zunahme von Patentenrechten in der Saatgutzüchtung sehen einige Autoren die Gefahr von "Patentdickichten" (TROMMETTER, 2008; KOCK, 2021). In der Folge kann es für Züchtungsunternehmen zunehmend schwerer werden, alle mit einer Sorte verbundenen Patentrechte zu überblicken. Die Verwendung unternehmensfremder Sorten kann dann zu erheblichen rechtlichen Unsicherheiten führen (KOCK, 2021). Vor diesem Hintergrund wird von kleineren und mittleren Saatzuchtunternehmen der Zugang zu geistigem Eigentum als potentieller limitierender Faktor in der künftigen Anwendung von Genomeditierungsverfahren genannt (JORASCH, 2020).

Im Ökolandbau dürfen keine chemisch-synthetischen PSM angewendet werden, weshalb er besonders auf alternative und vorbeugende Maßnahmen, wie z. B. widerstandfähige Sorten angewiesen ist. Aufgrund des geringen Marktvolumens für Ökosaatgut und dem Anbau sehr unterschiedlicher Kulturen im Ökolandbau ist es für private Züchter jedoch unattraktiv, in Zuchtprogramme für ökologisches Saatgut zu investieren. Daher werden die bisherigen Züchtungsprogramme im Wesentlichen durch private Stiftungen oder die öffentliche Hand finanziert (HAMM et al., 2017; SCHÄFER & MESSMER 2018). Aufgrund des deutlich höheren Ertragspotenzials konventioneller Sorten wird im Ökolandbau bisher jedoch zu etwa 95 % konventionelles Saatgut eingesetzt (VAN LAMMERTS BUEREN et al., 2011). Wenn die Ökoverbände unabhängig von der künftigen Rechtslage Genomeditierung als Gentechnik einstufen, besteht bei einer zunehmenden Verbreitung von genomeditierten Sorten in der konventionellen Züchtung die Gefahr, dass kein konventionelles Saatgut mehr im Ökolandbau genutzt werden kann (FIBL, 2012).

Hinsichtlich der Zukunftsszenarien lassen sich folgende Wirkungen ableiten:

3.3.2.1 Saatgutbranche - Szenario 1: Alle genomeditierten Pflanzen werden weiterhin als gentechnisch veränderte Organismen reguliert

- Die Einordnung als Gentechnik zieht deutlich aufwändigere Zulassungsverfahren nach sich, so dass die Kosten und die Dauer für die Sortenentwicklung steigen. Dementsprechend dürften die Technologien vor allem von größeren, international agierenden Unternehmen eingesetzt werden, so dass sich die oben beschriebene globale Marktkonzentration weiter verstärkt (WESSELER et al., 2019). Dabei ist zu erwarten, dass die global tätigen Unternehmen ihre Forschung und Produktentwicklung in Länder außerhalb der EU verlagern (HJORT et al., 2021; SMYTH et al., 2014; WESSELER et al., 2019).
- Grundsätzlich bieten die NMT aufgrund ihrer geringeren Entwicklungskosten die Chance, dass Züchtungsunternehmen in Züchtungsfortschritt bei Kulturen investieren, die flächenmäßig weniger bedeutsam sind und daher ein geringeres Umsatzpotenzial haben (BULLOCK et al., 2021; HJORT et al., 2021). Wird Genomeditierung als Gentechnik eingestuft, ist aufgrund der hohen Zulassungskosten, der langen Zulassungsverfahren sowie der fehlenden Akzeptanz der Verbraucher nicht davon auszugehen, dass die Technik in Europa eingesetzt wird.

 Der Genpool, auf den europäische Züchter zugreifen können, dürfte sich verringern, wenn NMT in Europa anders bewertet werden als in anderen Teilen der Welt. Wenn die Züchtung im außereuropäischen Ausland zunehmend mit Genomeditierungstechniken betrieben wird, könnten die daraus entstehenden Sorten nicht mehr ohne weiteres für die Züchtung in der EU verwendet werden (JORASCH, 2020).

3.3.2.2 Saatgutbranche - Szenario 2: Genomeditierte Pflanzen (SDN-1 und SDN-2) fallen nicht unter das EU-Gentechnikrecht

- Aufgrund der deutlich geringeren Entwicklungskosten von genomeditierten Sorten gegenüber gv
 Sorten kann angenommen werden, dass auch kleinere Züchtungsunternehmen ausreichend
 Ressourcen besitzen werden, um die Technik nutzen zu können.
- Im ökologischen Landbau sind über 90 % des eingesetzten Saatgutes konventionell gezüchtete Sorten. Bisher ist Genomeditierung im Ökolandbau per se als Gentechnik eingestuft. Wenn die konventionelle Landwirtschaft Zugang zu der Technik erhalten würde, dürfte sich der Ertragsunterschied zwischen konventionellem und ökologischem Landbau verstärken, weil letzterer bei unveränderten Standards der Ökoverbände dann von dem entsprechenden Züchtungsfortschritt abgeschnitten wäre (MODRZEJEWSKI, 2017). Überdies würde sich das Spektrum der im Ökolandbau verfügbaren Sorten mittel- bis langfristig erheblich verengen. Diese Entwicklung ließe sich nur verhindern, wenn es zu einem substanziellen Ausbau der speziellen Züchtung für den Ökolandbau käme. Dies wiederum dürfte angesichts der geringen Marktpotenziale für private Züchtungsunternehmen unwirtschaftlich sein, sodass entweder in erheblichen Umfang staatliche Subventionen erforderlich sein werden oder andere Finanzierungsansätze beispielsweise über die gesamte Wertschöpfungskette gefunden werden müssen (SCHÄFER & MESSMER, 2018).

3.4 Auswirkungen des Einsatzes von Gentechnik auf die Umwelt einschließlich der Biodiversität

Zu Umweltauswirkungen einschließlich des Einflusses auf die Biodiversität liegen für gentechnische Veränderungen mittlerweile Erfahrungen aus 30 Jahren der praktischen Anwendung vor. Die Methoden der Pflanzenzüchtung wurden im 20. Jahrhundert ständig weiterentwickelt (Hybridzüchtung, Gewebekultur, Mutagenese, Präzisionszüchtung unter Nutzung von molekularen Markern "Smart Breeding"). Hinzu kam als wesentliche Erweiterung des Methodenspektrums vor ca. 30 Jahren die Gentechnik, mit der es erstmals möglich war, genetisches Material aus nicht verwandten Arten (z. B. auch Bakterien oder Pilzen) in Kulturpflanzen zu übertragen.

Gleichzeitig kamen gesellschaftliche, politische und wissenschaftliche Diskussionen auf, mögliche Risiken und Nutzen dieser neuen Technologie zu identifizieren und abzuwägen. Praktisch ist aber die Nutzen-Risiko-Betrachtung an die jeweiligen Eigenschaften der modifizierten Organismen zu knüpfen, die den Einsatz und die Wechselwirkungen mit der Umwelt bedingen. Unterschiedliche Beurteilungen von Nutzen und Risiken in der Gesellschaft führten zu kontroversen Positionen und Bewertungen der Gentechnik (LUCHT, 2015). Im Hinblick auf die Umwelt kann zwischen direkten und indirekten Auswirkungen unterschieden werden. Bei GVO betrachtete und diskutierte direkte Effekte beinhalten u. a. Persistenz und Invasivität, inklusive Genfluss, sowie toxische Effekte auf Ziel- und Nichtzielorganismen. Indirekte Effekte von GVOs umfassen die Auswirkungen von geänderten Anbaumaßnahmen basierend auf den neu eingebrachten Eigenschaften der GVOs.

Im Zuge der Domestizierung wurden Kulturpflanzen Eigenschaften verliehen, die ihre Eignung für die Nutzung durch den Menschen erhöhen (Ertragssteigerung, Reduzierung oder Eliminierung unerwünschter Inhaltsstoffe), die Pflanzen aber gleichzeitig zunehmend abhängig von menschlicher Pflege machen. Kulturpflanzen unterscheiden sich von den Wildpflanzen, von denen sie abstammen, in der Regel erheblich in ihrer Morphologie und Entwicklung (SANVIDO, 2006; SMÝKAL et al 2018) und in ihrer Konkurrenzfähigkeit (KIÆR et al., 2013). Dass Kulturpflanzen, welchen gerade durch Gentechnik oder Genomeditierung eine erhöhte Resistenz gegen Pathogene/Schädlinge oder eine erhöhte Stresstoleranz verliehen wird, dadurch eine Konkurrenzüberlegenheit gegenüber Wildarten zeigen und in der Lage sind, sich in natürlichen Ökosystemen auszubreiten (Invasivität), ist nicht zu erwarten, da die Domestizierungsmerkmale bei der gentechnischen Veränderung nicht rückgängig gemacht würden.

Durch Genfluss können neu eingebrachte Eigenschaften von GVO auf Pflanzen kreuzungskompatibler Arten übertragen werden. Das trifft in gleicher Weise auf konventionell gezüchtete Pflanzen mit neuen Eigenschaften zu. Genfluss kann zu negativen Effekten für die Umwelt führen, wenn dadurch Eigenschaften von Kulturpflanzen auf Wildpflanzen übertragen werden, die diesen ein erhöhtes Unkrautpotenzial verleihen oder sie invasiver werden lassen. Untersuchungen dazu gibt es für Reis (Chen et al 2004; Wedger et al., 2019 u. a.) und Raps (Squire et al., 2011; Séguin-Swartz et al., 2013 u. a.). Die Wahrscheinlichkeit eines Genflusses von GVOs hängt von den Eigenschaften der verwendeten Kulturart wie der Pollination (selbst-/fremdbefruchtet, wind-/insektenbestäubt) ab, aber auch davon, ob andere Arten vorhanden sind, mit denen eine Kreuzung möglich ist, was in Deutschland z. B. beim Raps der Fall ist.

Ob der Anbau einer gentechnisch veränderten Kulturpflanze positive oder negative Effekte auf die Umwelt hat, hängt davon ab, ob und ggf. in welcher Weise er mit veränderten Managementmaßnahmen verbunden ist (z. B. einer veränderten Anwendung von PSM). Dabei macht es jedoch keinen Unterschied, ob z. B. eine Herbizidresistenz durch Gentechnik oder durch konventionelle Züchtung in die Pflanze eingebracht wurde. In einer Evaluierung der

Umweltauswirkungen des Anbaus von herbizidtoleranten Feldfrüchten in Großbritannien von 1999 bis 2006 unter Praxisbedingungen (Farm Scale Evaluation, FSE) wurde deutlich, dass Managementmethoden einen großen Einfluss auf die Biodiversität haben, unabhängig von der züchterischen Herkunft der Herbizidtoleranz (Burke et al., 2005). Aufgetretene agronomische Probleme im Zusammenhang mit dem Anbau herbizidresistenter Kulturpflanzen, wie herbizidresistente Unkräuter, waren durch den übertriebenen Anbau von Kulturen mit Resistenz gegen den gleichen Wirkstoff, kombiniert mit einer exzessiven Herbizidanwendung, bedingt, und somit Folgen eines verfehlten Resistenzmanagements (Allgemeine Problematik s. z. B. ZWERGER et al., 2017; TRAVLOS et al., 2020).

Ein weiteres Beispiel für ein fehlerhaftes Resistenzmanagement war beim Anbau gentechnisch veränderter insektenresistenter Pflanzen (Bt-Pflanzen) zu beobachten: Der großflächige Anbau dieser Pflanzen ohne Anlage ausreichender Refugialflächen mit Nicht-Bt-Pflanzen der gleichen Kulturart führte z. B. in den USA innerhalb kurzer Zeit zur Ausbreitung resistenter Schadinsekten. Im Gegensatz dazu konnte in den Gebieten, in denen in Spanien seit den 1990er Jahren gentechnisch veränderter Bt-Mais angebaut wird, ein Auftreten resistenter Schädlinge durch ein konsequentes Resistenzmanagement mit Anlage von Refugialflächen verhindert werden (s. z. B. GASSMANN et al., 2011; TABASHNIK et al., 2013).

Seit Beginn der 1990er Jahre wurde eine Reihe von EU-Forschungsprogrammen zur biologischen Sicherheit von GVOs aufgelegt. Aus den Ergebnissen dieser Sicherheitsforschung und auf Grundlage der Erkenntnisse aus 30 Jahren Anbau gentechnisch veränderter Pflanzen weltweit zog die EU-Kommission das Fazit, dass Gentechnik an sich keine größeren Risiken als konventionelle Methoden der Pflanzenzüchtung birgt (EU, 2010; BMBF, 2014).

3.4.1 Umwelt - Szenario 1: Alle genomeditierten Pflanzen werden weiterhin als gentechnisch veränderte Organismen reguliert

Im Folgenden sollen die Auswirkungen genomeditierter Pflanzen auf die Umwelt in verschiedenen regulatorischen Szenarien abgeschätzt werden.

- Werden alle Pflanzen, die durch NMT entstanden sind, wie Pflanzen reguliert, die durch "klassische Gentechnik" entstanden sind, so erfolgt im Zulassungsverfahren eine Risikobewertung der oben angeführten Effekte dieser Pflanzen auf die Umwelt. Dabei werden die Auswirkungen des Anbaus im Vergleich zum Anbau der gleichen Feldfrucht ohne gentechnische Veränderung abgeschätzt. Laut Bewertung der EFSA unterscheiden sich die Risiken von SDN1- und SDN2-Techniken (sowie von ODM und Cisgenese) nicht von vergleichbaren, möglichen Risiken durch den Anbau von Feldfrüchten aus klassischer Züchtung.
- Der Effekt durch den Anbau genomeditierter Pflanzen auf den Einsatz von Pflanzenschutz- bzw. Düngemitteln ist zum derzeitigen Stand nicht direkt quantifizierbar. Dagegen zeigen aussagekräftige Studien zum Pestizideinsatz beim GVO-Anbau in den USA (JORGE FERNANDEZ-CORNEJO et al., 2014) bzw. im internationalen Überblick (KLÜMPER & QAIM 2014) bei Insektiziden eine Reduktion der Anwendungen, bei Herbiziden langfristig eher eine Erhöhung (Resistenzmanagement s. o.).
- In der wissenschaftlichen Literatur wird davon ausgegangen, dass in Anpassung an das Klima neue Eigenschaften bzw. pflanzengenetische Ressourcen züchterisch erschlossen werden müssen (z. B. Duchêne et al., 2010; Rial-Lovera et al., 2017; Chandio et al., 2020; Wang et al., 2021). Dies muss in einem entsprechenden engen zeitlichen Zusammenhang mit den klimatischen Veränderungen erfolgen (vgl. Smale et al., 2008), da in der Züchtung dort investiert wird, wo entsprechende

- Erfolgsaussichten auch hinsichtlich eines zeitgerechten Zugangs bestehen. Daher liegt die Vermutung nahe, dass die Sortenanpassung, die Sortenvielfalt und die Verfügbarkeit von klimaanpassungsfähigen Züchtungen in Europa in diesem Szenario beschränkt bleiben wird.
- Veränderung der Handelsströme lassen international negative Umwelteffekte erwarten, die nicht zu vernachlässigen sind. Wie in Kapitel 3.2 beschrieben, würden wahrscheinlich Importe für Soja und bestimmte Getreidearten entsprechend reduziert bzw. komplett eingestellt werden. Da gerade für Sojabohnen und Sojakuchen eine hohe Abhängigkeit von Importen als Futtermittel für die Veredlung in der EU besteht, führt das zu höheren Preisen für Proteinfutterpflanzen in der EU, die dann knapp werden. Deutlich höhere Preise führen zu einer Intensivierung der Landwirtschaft in Europa und Deutschland (vgl. Kap. 3.2), da Landwirte die fehlenden Importe durch einen Produktionsanstieg in der EU substituieren müssen. Diese Intensivierung führt vor allem zu höheren Nährstoffüberschüssen pro Hektar, obwohl die Fleischproduktion in der EU und damit die Erzeugung von organischem Dünger durch deutlich höhere Futterkosten zurückgehen wird (GOCHT et al., 2021).
- Zudem ist eine Umwandlung von bisher nicht landwirtschaftlich genutzten Flächen (Wäldern, Brachen) in Ackerland zu erwarten. Es kann davon ausgegangen werden, dass auf der Suche nach Ersatz von Proteinfuttermitteln extensives Grünland in intensives Grünland umgewandelt wird, da Grassilagen und Heu einen hohen Proteingehalt im Verhältnis zu anderen Futtermitteln wie Maissilage aufweisen. Dies hat Auswirkungen auf die biologische Vielfalt im Grünland sowie auf andere Umweltgüter (GOCHT et al., 2021).
- Es ist zudem sehr wahrscheinlich, dass die globalen Treibhausgasemissionen zunehmen, da die neue Verteilung der Produktion nicht nur in Bezug auf die Produktionskosten, sondern auch auf die Treibhausgasemissionen weniger effizient ist; die Sojaproduktion in der EU und die Tierproduktion außerhalb der EU sind in Bezug auf Treibhausgasemissionen vergleichsweise ineffizient. Insbesondere die stark steigende Nachfrage nach Raps- und Sonnenblumensaaten führt in nicht EU-Ländern zu einer veränderten Flächennutzung hin zu mehr Anbauflächen (vgl. Kap 3.2).
- Wenn zukünftig auch andere Kulturarten, wie Raps oder Hülsenfrüchte, genomeditiert werden und in den Handel gelangen, verengt sich der Spielraum für europäische Importe weiter, was zu einer weiteren Intensivierung der Landwirtschaft in Europa führt mit entsprechenden Umweltwirkungen.
- Wie der Ökolandbau und seine vielen positiven Umwelteffekte in diesem Szenario betroffen sind, ist schwer absehbar. Vor allem höhere Agrarpreise führen zu einem erhöhten Flächenwettbewerb, was eine Ausweitung erschweren könnte.

3.4.2 Umwelt - Szenario 2: Genomeditierte Pflanzen (SDN-1 und SDN-2) fallen nicht unter das EU-Gentechnikrecht

• Im Fall, dass SDN-1- und SDN-2-Verfahren der Genomeditierung nicht als Gentechnik klassifiziert werden, vermeidet man die oben beschriebenen negativen Verlagerungseffekte im Handel und somit die damit verbundenen Umweltbelastungen. Zudem wird das Portfolio an Methoden um eine Züchtungsmethode erweitert, die helfen könnte, im Zusammenspiel mit anderen Methoden (Anbaumanagement, neue Techniken) passgenaue, regionale Lösungen für die zukünftigen Herausforderungen zu entwickelten (s. Kapitel 2). Insbesondere könnten die NMT beim Erreichen der von der EU angestrebten Reduktion der Anwendung und des Risikos von Pestiziden um 50 % (s. Kap 2.3) und von der Anwendung von Düngemitteln um 20 % (s. Kap 2.4) bis 2030 (Farm to Fork-Strategie) einen Beitrag leisten, z. B. die Flächeneffizienz erhöhen. Hierdurch würde vermieden,

- dass trotz höheren Anteils an Ökolandbau und des angestrebten, verringerten PSM-Einsatzes ein Flächenmehrbedarf für die landwirtschaftliche Produktion entsteht, der die positiven Wirkungen der beiden genannten Maßnahmen auf die Biodiversität wieder nivellieren könnte.
- Mit Hilfe von Genomeditierung könnte eine neue Eigenschaft schneller und kostengünstiger in eine größere Vielfalt von Sorten (auch solchen mit einer geringeren Verbreitung und von geringem Anbauumfang, aber lokaler Bedeutung) eingebracht werden, da sie im Unterschied zur klassischen Gentechnik auch von kleinen und mittelständischen Unternehmen eingesetzt werden kann. Dies eröffnet die Möglichkeit, dass diese Sorten bezüglich ihrer Anbaueigenschaften attraktiver werden und am Markt erhalten bleiben, wodurch sowohl der genetischen Verarmung einer Kultur vorgebeugt werden könnte als auch in diesen Kulturen Zuchtziele erreicht werden könnten, die vorteilhaft für die Umwelt wären.

4. Forschungsbedarf – Genomeditierung und nachhaltige Landwirtschaft

Die Genomeditierung bzw. ihre Anwendung als gezielte Mutagenese (ohne Übertragung von Fremdgenen) hat in der internationalen Züchtungsforschung und Pflanzenzüchtung mittlerweile einen bedeutenden Stellenwert erreicht. Erste, auf diese Weise erzeugte Sorten werden vermarktet. Europa ist zwar an verschiedenen Entwicklungen beteiligt, eindeutig dominiert wird das Feld aber von amerikanischen und chinesischen F&E-Gruppen. Aufgrund der derzeitigen rechtlichen Regelungen und damit in Ermangelung von Nutzungsperspektiven in Europa werden spezifische europäische Aspekte einer klimaangepassten, nachhaltigen Nahrungsmittelproduktion nur begrenzt bearbeitet und Anbauerfahrungen/-daten liegen bislang nicht vor. Der ökologische Landbau schließt den Einsatz genomeditierter Pflanzen ebenso wie die klassische Gentechnik im Anbau aus. Die in Kapitel 2 vorgestellten Maßnahmen zur Förderung der Nachhaltigkeit sind in unterschiedlichen Anbausystemen realisierbar. Ein wesentliches Ziel der beschriebenen Maßnahmen ist die Verbesserung der ökologischen Nachhaltigkeit durch eine substantielle Minderung des ökologischen Fußabdrucks bzw. Förderung der Biodiversität. Wesentlich ist in diesem Zusammenhang jedoch, etwaige Ertrags- und Einkommenseinbußen zumindest zu begrenzen. Die Umstellung sollte angesichts der gegebenen Situation möglichst zeitnah erfolgen. Dies erfordert die Verfügbarkeit und ggf. intensivere Erprobung und Bewertung verschiedener Maßnahmenoptionen und -kombinationen.

4.1 Integrierende, interdisziplinäre Forschung – gemeinsame Ziele

Die Anpassungen der Anbausysteme an den Klimawandel sowie eine nachhaltigere Produktion erfordern es, standortangepasst verschiedene Maßnahmen zu kombinieren. Hierfür sind interdisziplinäre Forschungskonsortien erforderlich, in denen gemeinsam züchtungsorientierte Entwicklungsansätze mit Anbaumaßnahmen kombiniert werden und Folgenabschätzungen der Veränderungen im Anbausystem auf die Produktion und Wertschöpfungsketten im sozioökonomischen, rechtlichen oder ethischen Kontext durchgeführt werden.

Folgende Kernelemente sollten dabei berücksichtigt werden:

- die detaillierte Erarbeitung der züchterischen Ausgangslage; Analyse der vorhandenen Informationen zu Nutzungsoptionen, phänotypischen Daten und Gensequenzen (z. B. relevante Kulturarten für Mischkulturen, notwendige züchterische Optimierungen und ihre Perspektiven in unterschiedlichen Anbausystemen, relevante Rahmenbedingungen)
- die Entwicklung von Szenarien und Modellen zu Einsatzoptionen von Genomeditierung und deren Wirkung auf die Sozioökonomie und Ökologie für eine umfassende Nachhaltigkeitsbewertung (z. B. detaillierte Darstellung und Abschätzung quantitativer Wirkungen (Handel, Einkommen, Ernährungssicherheit) im globalen, regionalen und betrieblichen Kontext; Weiterentwicklung und Anpassung von Anbauoptionen; Bewertung der Einkommenswirkung und Verteilungsgerechtigkeit; Identifizierung möglicher Umweltwechselwirkungen; Analysen zu Synergien bzw. Konflikten in den Bereichen der politischen Agrar- und Umweltregulierung; Bewertung der wirtschaftlichen Vorzüglichkeit der eingesetzten Züchtungsmethode)
- Praktische F&E der Teilbereiche (z. B. Auswahl von geeigneten Geno- und Phänotypen; ggf. Etablierung der Versuchssysteme; Einsatz klassischer Züchtung und Genomeditierung: Aufzeigen der Möglichkeiten; Charakterisierung und Bewertung der erzeugten Linien im geschlossenen System bzw. im Feld)

- Bewertung der Szenarien aufgrund der erzielten Ergebnisse (Reskalierung der Szenarien;
 Aufzeigen von praktischen Entwicklungsoptionen; Schlussfolgerungen)
- begleitende Kommunikation; Einbindung von Stakeholdern in die Entwicklung von Szenarien und Vorbereitung von Feldversuchen.

Auf der Skala von Labor- und Gewächshausversuchen lassen sich relativ einfach Untersuchungen zur Effizienz und Präzision der Genomeditierung durchführen. Anwendungsszenarien für die beabsichtigten Veränderungen bzw. die erzielten Modifikationen in Bezug auf Umwelt und Sozioökonomie lassen sich ggf. auch in einer frühen Phase umreißen, wie z. B. Abschätzungen, in welcher Größenordnung erwünschte Effekte erreichbar wären, welche Verschiebungen in Erträgen und welche Umweltwechselwirkungen zu erwarten wären. Solche Szenarien können Eckpunkte/Bandbreiten für die weitere Forschungsund Projektentwicklung Entscheidungsfindung aufzeigen. Arbeiten in Labor und Gewächshaus können insgesamt eine erste Orientierung für weitere Entwicklungswege und Praxisplanung ermöglichen und praxisnahe Versuche unter Feld-Bedingungen vorbereiten.

Gerade um synergistische Potenziale substantiell bewerten zu können, sind die entwickelten Genotypen jedoch in Feldversuchen im realen Anbausystem und möglichst im Gesamtkontext des Anbaumanagements zu testen. Dies erfordert die entsprechende Verfügbarkeit von umfangreichen Versuchs-/Anbauflächen (s. u.). Idealerweise sind sozioökonomische Fragestellungen in die Projekte zu integrieren.

4.1.1 Synergiepotenziale von klassischer Züchtung und Genomeditierung

Die Züchtung soll Kulturpflanzensorten zur Verfügung stellen, die als Ausgangspunkt der nachhaltigen Produktion dienen können. In Kapitel 2 wurden verschiedene Merkmalsgruppen identifiziert, die zeitnah mittels Genomeditierung bearbeitet werden können. Je nach Kulturart bietet Genomeditierung erhebliche Zeitvorteile, um an die anstehenden Herausforderungen angepasste Sorten bereitzustellen:

- a) Pflanzenschutz Toleranz oder Resistenz gegen Schaderreger
- b) Anpassung der Pflanzenentwicklung Escape-Strategien (Blüte, Keimung, Entwicklung, u. ä.)
- c) Anpassung der Pflanzenarchitektur oder -morphologie (Reduktion Verdunstung, Wasser-Nährstoffversorgung usw.)
- d) Physiologische Anpassungen (Regulation Wasserhaushalt; Nährstoffversorgung, u. a.).

Diese züchterischen Ansätze eröffnen Fragestellungen für weiterführende Forschungsprogramme zur nachhaltigen Pflanzenproduktion:

Welche unmittelbaren Anknüpfungspunkte bieten sich in der Züchtung, um die Anpassung der Anbausysteme zu fördern?

Wie in Kapitel 2 erörtert und wie für den ökologischen Landbau belegt, lässt eine substanzielle Reduktion der Düngung und Pflanzenschutzmaßnahmen Ertragseinbußen erwarten. Um diese zu kompensieren, ist eine umfassende Anpassung der pflanzenbaulichen Maßnahmen in den Anbausystemen erforderlich. Kulturarten- und anbausystemspezifisch lassen sich Ziele definieren, die züchterisch bearbeitet werden können. Für alle Anbausysteme (einschließlich des Ökolandbaus) relevant ist beispielweise die Züchtung von Kraut-und-Knollenfäule-resistenten, marktgerechten Kartoffelsorten, um umfangreiche Fungizidanwendungen zu vermeiden.

Wie lässt sich die Biodiversität effizient durch Genomeditierung steigern?

Die Biodiversität lässt sich durch Reduktionen der Anwendung des chemischen Pflanzenschutzes und von übermäßigen Nährstoffeinträgen sowie durch Erweiterung bzw. Diversifikation der

Fruchtfolgen fördern. Dem gegenüber stehen geringe(re) Ertragspotenziale (z. B. durch Schädlingsanfälligkeit, Wirtschaftlichkeit u. a.). Die Züchtung kann durch Verbesserung des Ertragspotenzials insbesondere bisher unattraktiver bzw. vernachlässigter Kulturarten die Diversität in den Fruchtfolgen fördern. Spezifische Züchtungsziele (Merkmale), die die Attraktivität einer Kulturart für erweiterte Fruchtfolgen erhöhen und durch Genomeditierung mit einem Zeitvorteil bearbeitet werden können, sind zu erforschen.

- Können Interaktionen zwischen Kulturpflanzen gezielt gefördert und effizient genutzt werden?

 Untersaaten, Mischkulturen und Zwischenfrüchte stellen Optionen in der Anpassung der Anbausysteme dar. Sie finden sich derzeit insbesondere im ökologischen Landbau, stellen aber eine allgemeine Anbauoption dar. Sie bauen auf eine direkte und indirekte positive Wechselwirkung der Kulturpflanzen und Anbaumaßnahmen. Die besonderen Sorteneigenschaften für diese Nutzung sind jedoch bisher kein eigenes Züchtungsziel. Für die verschiedenen (Misch-)Kulturen ist die Identifizierung und Förderung der spezifischen Sorteneigenschaften notwendig. Identifizierte Merkmale und die ihnen zugrundeliegenden Gene lassen sich ggf. per Genomeditierung in verkürzten Zeiträumen züchterisch optimieren. Eine abschließende Bewertung ist nur in Feldversuchen möglich.
- Welche Züchtungsoptionen ergeben sich mit der Nutzung innovativer Anbautechniken?
 Digitalisierung und Robotik eröffnen neue Optionen für Anbaumanagement und effizientere Anbausysteme (s. Spotfarming, Gleichstandsaat), sind aber noch selten etabliert. Auch hier sind Sorten/Arten den entsprechenden Anbausystemen züchterisch besser anzupassen (Wuchsform, Wechselwirkungen u. a.), um entsprechende Nachhaltigkeitseffekte erzielen zu können. In diesem Zusammenhang sollten die Verknüpfungen von Technik, Anbau(management) und Züchtung konzeptionell gezielt erforscht werden.

4.1.2 Sicherheitsforschung

NMT wie die Genomeditierung werden in Europa in den Kontext besonderer Sicherheitsbetrachtungen gestellt. Auswirkungen auf Menschen und Umwelt knüpfen sich aber insbesondere an die Eigenschaften und Merkmale der modifizierten Pflanzen und sind daher gerade in Bezug auf die gezielte Mutagenese nicht technikspezifisch.

Auf der Skala von Labor- und Gewächshausversuchen lassen sich relativ einfach Untersuchungen zur Effizienz und Präzision der Genomeditierung mit Entwicklungsarbeiten verknüpfen. Sequenzdaten und molekularbiologische Methoden können zur Abschätzung von off-target Effekten einerseits und von potenziellen Verschiebungen in den Stoffwechselprodukten und Eigenschaften andererseits genutzt werden (i. d. R. werden erzeugte Linien bereits in frühen Züchtungsschritten bewertet und selektiert.) Darüber hinaus können anhand der modifizierten Eigenschaften Szenarien für mögliche Auswirkungen sowohl in ökologischen wie sozioökonomischen Zusammenhängen entwickelt und substantiierte Hypothesen für evidenzbasierte Fragestellungen und Untersuchungen der Sicherheitsforschung abgeleitet werden (z. B. lassen Modifikationen in der Photosyntheseleistung Effekte auf den Nährstoffund Wasserhaushalt erwarten). Umfassende Umweltwechselwirkungen sind jedoch nur in entsprechend dimensionierten Feldversuchen zu quantifizieren.

4.1.3 Sozioökonomie

Um sozioökonomische Fragestellungen für Deutschland und die EU verlässlich beantworten zu können, ist eine Datenerhebung und Analyse unter Praxisbedingungen dringend erforderlich. Dies bezieht sich sowohl auf Ertrags- und Betriebsdaten als auch auf Handelseffekte und -ströme und setzt folglich einen Anbau von genomeditierten Pflanzen in Deutschland voraus.

In der Rückschau kann aus den Problemen des GVO-Anbaus gelernt werden. Von 2006 bis 2009 war der gentechnisch veränderte Bt-Mais MON810 zum Anbau in Deutschland zugelassen. In diesem kurzen Zeitraum fand, wie aus dem Standortregister des BVL zu entnehmen ist, der Anbau überwiegend in den ostdeutschen Bundesländern statt. Dort gestattete die Betriebs- und Schlaggröße eine entsprechende Umsetzung der gesetzlich festgeschriebenen Mindestabstände. Aufgrund der strikten Regulierung in Deutschland wurde Bt-Mais überwiegend innerbetrieblich als Futterpflanze verwendet. Damit konnten Wertschöpfungskette und Handel kaum beleuchtet werden. Auch die Arbeiten zur Koexistenz umfassten vordergründig theoretische Überlegungen. Eine Untermauerung mit entsprechenden Praxisdaten bzw. Erfahrungen gestaltete sich schwierig. Internationale Studien waren hingegen mit diesen Herausforderungen nicht konfrontiert. Aus diesem Grund kann angenommen werden, dass unter Beibehaltung der aktuellen Regulierung - Genomeditierung als Gentechnik - zukünftig mit vergleichbaren Problemen zu rechnen ist. Forschungsfragen erscheinen unter dieser Regulierung daher fast überflüssig oder können aus existierenden Arbeiten zu dem GVO-Anbau abgeleitet werden. Ein Mehrwert aus sozioökonomischer Sicht ist nicht zu erwarten. Auch zukünftige Auswertungen und Analysen von Genomeditierung aus anderen Teilen der Welt sind nicht aussagekräftig, da kaum hinreichend übertragbar, bedingt durch die standortspezifischen Anforderungen.

Die Perspektive einer mittelfristigen, substantiellen Freigabe des Anbaus von genomeditierten Pflanzen wäre daher unerlässlich, damit wegweisende noch offene Fragen wissenschaftlich beantwortet werden können:

- Welche betriebswirtschaftlichen und die ökologischen Vorteile bieten "neue Sorten" hinsichtlich der Ertragsentwicklung und -stabilität sowie der Potenziale für die Reduktion der Anwendung von PSM und Düngern - auch im Vergleich mit anderen Optionen des Anbaumanagements?
- Wie ist der Rechtsrahmen anzupassen, um "Patentdickichte" zu vermeiden und sicherzustellen, dass alle Züchtungsunternehmen mit den neu entwickelten Sorten weiterzüchten können?
- Wie hoch ist die Akzeptanz der Verbraucher gegenüber den neuen Sorten und daraus resultierenden Produkten, wovon hängt sie ab, und führt die Verbraucherakzeptanz ggf. zu weiteren Kosten und Nutzen entlang der Wertschöpfungskette?
- Mit welchen Maßnahmen kann die Koexistenz des Ökolandbaus sichergestellt werden (u. a. Entwicklung ökologischer Sorten und deren Zertifizierung) und welche Kosten resultieren daraus, wenn dieser auch künftig keine genomeditierten Sorten zulässt?

Wie wirkt sich der Einsatz neuer molekularer Techniken auf die internationale Wettbewerbsfähigkeit aus, und welche Handelseffekte resultieren daraus? Wie wirken dabei künftige Veränderungen im Konsum von Nahrungsmitteln (wie Fleischverzehr, Fleisch- und Milchersatzprodukte, vegan/vegetarische Ernährung, Demografie) auch auf neue Potenziale (neue/andere Produkte)?

Mit Blick auf eine umfassende Bewertung sollten für unterschiedliche Regionen standortspezifische Fallstudien durchgeführt werden, um Feldversuche auf Praxistauglichkeit hin zu überprüfen. Prinzipiell können zur Beantwortung sozioökonomischer Fragestellungen qualitative oder quantitative Herangehensweisen gewählt werden. In einer Frühphase des Anbaus von genomeditierten Pflanzen wird sich vermutlich auf Grund der geringen Datenbasis eine qualitative Methodik, z. B. Interviews, Fragebögen, anbieten, um erste Abschätzungen treffen zu können. Im Zeitverlauf werden dann auch quantitative Analysen, wie z. B. statistische Analysen und Modellierungen möglich sein. Dies setzt jedoch einen Anbau über mehrere Jahre in einer großen Anzahl von Betrieben voraus.

4.1.4 Wissenschaft und Entscheidungsfindung dialogisieren

Es sollte gesellschaftlichen Akteuren ermöglicht werden, Fragestellungen, Herausforderungen und Lösungsansätze aktiv zu hinterfragen, zu reflektieren und aus ihren Perspektiven zu dialogisieren. Ein intensiver sachlicher Dialog zwischen Wissenschaftlern, Entscheidungsträgern und gesellschaftlichen Akteuren erfordert aber auf allen Seiten erhebliche Ressourcen (Personen, Zeit), die für ein spezifisches Forschungsfeld nicht beliebig verfügbar sind. Praktisch ist dies i.d.R. also nicht auf der einzelner Forschungsprojekte, sondern nur im Rahmen eines thematischen Forschungsprogramms mit hoher Intensivität zu realisieren. Es gibt eine Reihe (interaktiver) Kommunikationsformate ("Expert Panels", Stakeholder-Beiräte usw.) und -techniken, die dies ermöglichen sollen und in verschiedenen nationalen und internationalen Projekten eingesetzt werden. Trotzdem ist es weitgehend unklar, welche Formate zwischen welchen gesellschaftlichen Akteuren einen themenbezogenen Dialog effizient befördern bzw. wie diese zu entwickeln sind. Es ist daher anzustreben, neben der projektbezogenen Kommunikation intensive, gruppengerechte Formate der Beteiligung auf projektübergeordneter Ebene/Programmebene zu entwickeln, die Forschern und Dritten "neue Perspektiven" vermitteln.

4.2 Zeitliche und räumliche Dimensionen möglicher (experimenteller) Forschungsprogramme und -arbeiten

4.2.1 Methodische Entwicklungen

Manche Pflanzenarten und -sorten lassen sich derzeit nicht oder nur schwer mit Genomeditierungsmethoden bearbeiten (s. Tab. 2.1). Diesbezügliche Forschungsarbeiten sollten als eher methodisch und grundlagenorientiert eingestuft werden. Für Kulturen, in denen vorteilhafte Merkmale nur in wenig adaptierten genetischen Ressourcen zu finden sind, deren Nutzung langwierige Rückkreuzungsprogramme erfordert, liegt in der Genomeditierung eine Schlüsseloption zur schnelleren Übertragung bzw. Etablierung von gewünschten Merkmalen und einer raschen und breiten Sortenanpassung. Insbesondere für Dauerkulturen ließen sich durch Förderung der methodischen Entwicklung erhebliche Zeitvorteile realisieren.

Zur Identifikation und Bewertung züchterisch vielversprechender Pflanzeneigenschaften bietet sich der Einsatz prozessbasierter Pflanzenwachstumsmodelle an. Ausgehend von existierenden Genotypen werden im Modell erfolgversprechende Veränderungen hinsichtlich der phänologischen, morphologischen und physiologischen Pflanzeneigenschaften vorgenommen. In unzähligen virtuellen Experimenten, die deutschland- bzw. europaweit über viele Jahre durchgeführt werden, können vielversprechende Eigenschaften und die entsprechenden Idiotypen für zukünftige Witterungs- und Anbaubedingungen identifiziert werden.

Es erscheint sinnvoll, Fortschritte in den bearbeiteten Bereichen turnusmäßig zu bewerten, so dass Förderperioden von 3 Jahren plus optionaler Verlängerungen vorgesehen werden sollten.

4.2.2 Feldversuche

Derzeit fallen Arbeiten mit genomeditierten Pflanzen als GVO unter das Gentechnikrecht. Feldversuche sind entsprechend zu beantragen und benötigen eine Genehmigung. In der Vergangenheit sind Feldversuche mit gv Pflanzen in Deutschland wiederholt zerstört worden, was einem sicheren Erkenntnisgewinn entgegensteht. Eine besondere Sicherung der Versuche verursacht entsprechende Zusatzkosten, die auf der Höhe der reinen Forschungskosten liegen. In der öffentlichen (universitären) Forschung und Projektförderung sind diese Kosten für Einzelprojekte nicht tragbar. In

der Schweiz und in Großbritannien werden daher sogenannte "Protected Sites" betrieben, die eine begrenzte Anzahl und Dimension von Feldversuchen ermöglichen.

Ziel züchterischer Bemühungen ist die Verbesserung des Sortenspektrums. Labor- und Gewächshausversuche bieten nur beschränkte Einblicke in das Verhalten der entwickelten Linien in der realen Umwelt. Für die Bewertung der Entwicklungen auch im Sinne der Sicherheitsforschung und der Erhebung und Ableitung quantitativer ökologischer und sozioökonomischer Daten sind Feldversuche unerlässlich und sollten entsprechend unterstützt werden.

Im Rahmen von Entwicklungsarbeiten mit "einfachen" Merkmalen ist ca. nach 3 Jahren mit potenziellen Feldversuchen zu rechnen. Bei bereits vorhandenem Vorlauf und Material aus aktuellen Arbeiten ist auch kurzfristig mit Bedarf an Freisetzungen zu rechnen. Umfangreiche und aussagekräftige landwirtschaftliche und ökologische Untersuchungen benötigen adäquate Flächen bzw. Standorte, repräsentative und ausreichend lange Zeiträume (z. B. Berücksichtigung von Fruchtfolgen) und eine fundierte statistische Vorplanung und Auswertung der Versuche.

4.2.3 Kurzfristige thematische Fragestellungen (3 Jahre +) - Ziel: Proof of Concept

Mittels Genomeditierung lassen sich rasche Erfolge erzielen, wenn Gensequenzen und Eigenschaften der Zielgene bekannt und *in-vitro-*Kultivierung der Pflanzen möglich ist. Mittlerweile sind viele Genomsequenzen von Kulturpflanzen veröffentlicht, so dass die unmittelbare Nutzung erfolgen kann. Entsprechend können bekannte Merkmale bzw. Gensequenzen mit Genomeditierung direkt bearbeitet, Modifikationen im begrenzten Umfang getestet (Labor, Gewächshaus) und für die Züchtung verfügbar gemacht werden.

Typischerweise basieren solche Arbeiten auf Daten zu den entsprechenden Gensequenzen bzw. bioinformatischen Analysen von entsprechenden Sequenzdaten. Je nach Kulturart und Merkmal kann ein wesentlicher Schlüssel zur Erschließung nachhaltigkeitsfördernder Züchtungspotenziale in der Analyse der (Sequenz-)Informationen und zugehöriger Eigenschaften anderer Kultur- und Wildarten liegen. Der Ausgangspunkt für die Erforschung von Nachhaltigkeitspotenzialen ist daher eine systematische Sichtung und Bewertung vorhandener Literatur und Sequenzdaten.

Die Aufklärung von Genfunktionen ist durch Genomeditierung kurzfristig ebenfalls möglich, wenn Zielsequenzen aus Vorarbeiten definiert werden können. Die Erkenntnisse solcher Arbeiten können allgemein züchterisch verwendet werden. Allerdings lassen sich innerhalb des Zeitraums unter 5 Jahren kaum praktische Felddaten sammeln und bewerten. Die Arbeiten bleiben auf Labor- und Gewächshaus fokussiert.

Systemare Arbeiten – also Untersuchungen, die die Betrachtung ganzer Anbausysteme zum Ziel haben, sind in kurzen Zeiträumen und in Labor- oder Gewächshauskulturen nur in vereinfachten "Modellsystemen" und in Teilaspekten zu bearbeiten. Darunter können Pflanzenwechselwirkungen, Interaktion verschiedener Pflanzenschutzmaßnahmen oder begrenzte Effizienzvergleiche von Sorten/Akzessionen usw. fallen.

4.2.4 Mittelfristige thematische Fragestellungen (5 Jahre +) - Ziel: Umsetzung für die Praxis

Ziel ist es, Entwicklungsarbeiten (s. o. Proof of Concept) in Bezug auf die Anwendung zu bewerten. Dies umfasst Untersuchungen zur praxisnahen Prüfung von Entwicklungsarbeiten und zu Interaktionen und Auswirkungen auf das Ökosystem im Sinne der nachhaltigen Pflanzenproduktion, idealerweise in realen Anbau- und Feldsituationen, ggf. unter simulierten "anbautypischen Bedingungen". Eine kulturartengerechte Versuchsplanung unter Identifikation der wesentlichen Variablen und der zeitlichen und räumlichen Dimensionen (zumindest eine hinreichende Darstellung der Variation von

Umweltbedingungen und wesentlicher Ökosystemwechselwirkungen) ist erforderlich. Eine entsprechende statistische Vorplanung und letztlich Auswertung der Versuche ist zu realisieren.

Systemare Arbeiten zur Untersuchung von Anbausystemen erfordern eine der jeweiligen Fragestellung gerecht werdende, zeitliche und räumliche Flächenverfügbarkeit, die Variabilität (statistisch) hinreichend erfasst. Praktisch bedeutet dies, dass auch in mittelfristige Untersuchungen nur Teilaspekte, diese aber quantitativ unter natürlichen Umweltbedingungen untersucht werden können.

4.3 Quintessenz zu Forschungsbedarf und Themen

Forschung zur Einbindung neuer molekularbiologischer Techniken bzw. der Genomeditierung in eine nachhaltige Pflanzenproduktion kann zeitgerechte Perspektiven zu Einsatzfeldern und Möglichkeiten entwickeln. Dies gilt einerseits für Fragestellungen zu den wesentlichen Eigenschaften der Pflanzen (Züchtungsziele), andererseits in einem ganzheitlichen, inter- oder transdisziplinären Forschungsprogramm auch für die sozioökonomischen Auswirkungen und Bewertungen. Dazu gehört auch, geeignete Formate für einen problemorientierten, gesellschaftlichen Dialog zu entwickeln.

Während anfängliche Entwicklungsarbeiten und orientierende Untersuchungen zum Einsatz der Genomeditierung in Zeiträumen von 3 bis 5 Jahren in Labor und Gewächshaus durchgeführt werden können, sind für eine umfassende Bewertung im Anbausystem Feldversuchen über mehrere Jahre erforderlich. Derartige Vorhaben scheinen unter den gegebenen Bedingungen kurzfristig schwer realisierbar, da etwaige Feldzerstörungen nicht ausgeschlossen werden können und die Versuchsergebnisse gefährden.

Quellen

- ADAMCZEWSKA-SOWINSKA K, KOLOTA E, WINIARSKA S (2009): Living mulches in field cultivation of vegetables. *Vegetable Crops Research Bulletin* **70**, S. 19.
- ADEE E, ROOZEBOOM K, BALBOA GR, SCHLEGEL A, CIAMPITTI IA (2016): Drought-Tolerant Corn Hybrids Yield More in Drought-Stressed Environments with No Penalty in Non-stressed Environments. *Frontiers in plant science* **7**, S. 1534. DOI: 10.3389/fpls.2016.01534.
- Ahlemeyer J, Friedt W (2011): Progress in winter wheat yield in Germany-what's the share of the genetic gain? *Tagungsband der 61. Jahrestagung der Vereinigung der Pflanzenzüchter und Saatgutkaufleute Österreichs, 23-25 November 2010, Raumberg-Gumpenstein, Österreich. Ertrag vs. Qualität bei Getreide, Öl und Eiweisspflanzen.* S. 19–24.
- aid (2015): Gute fachliche Praxis Bodenbewirtschaftung und Bodenschutz. Bonn, 2. Auflage, 120 S.
- aid (2016): Gute fachliche Praxis Bodenfruchtbarkeit. Bonn, 1. Auflage, 144 S.
- AINSWORTH EA, LONG SP (2021): 30 years of free-air carbon dioxide enrichment (FACE): What have we learned about future crop productivity and its potential for adaptation? *Global change biology* **27** (1): 27–49. DOI: 10.1111/gcb.15375.
- AINSWORTH EA, ROGERS A (2007): The response of photosynthesis and stomatal conductance to rising CO2: mechanisms and environmental interactions. *Plant, Cell & Environment* **30** (3): 258–270. DOI: 10.1111/j.1365-3040.2007.01641.x.
- AKSOUH NM, JACOBS BC, STODDARD FL, MAILER RJ (2001): Response of canola to different heat stresses. Aust. J. Agric. Res. **52** (8): 817. DOI: 10.1071/AR00120.
- AKTER N, RAFIQUL ISLAM M (2017): Heat stress effects and management in wheat. A review. *Agron. Sustain. Dev.* **37** (5). DOI: 10.1007/s13593-017-0443-9.
- ALBRECHT M, KLEIJN D, WILLIAMS NM, TSCHUMI M, BLAAUW BR, BOMMARCO R et al. (2020): The effectiveness of flower strips and hedgerows on pest control, pollination services and crop yield: a quantitative synthesis. *Ecology letters* 23 (10): 1488–1498. DOI: 10.1111/ele.13576.
- ALLEN RS, TILBROOK K, WARDEN AC, CAMPBELL PC, ROLLAND V, SINGH SP, WOOD CC (2017): Expression of 16 Nitrogenase Proteins within the Plant Mitochondrial Matrix. *Front Plant Sci* **8**, S. 287. DOI: 10.3389/fpls.2017.00287.
- Anderson BC, Sheldon IM (2017): R&D Concentration Under Endogenous Fixed Costs: Evidence from Genetically Modified Corn Seed. *American Journal of Agricultural Economics* **99** (5): 1265–1286. DOI: 10.1093/ajae/aax036.
- ANDERT S, BÜRGER J, STEIN S, GEROWITT B (2016): The influence of crop sequence on fungicide and herbicide use intensities in North German arable farming. *European Journal of Agronomy* **77**, S. 81–89. DOI: 10.1016/j.eja.2016.04.003.
- Ansari WA, Chandanshive SU, Bhatt V, Nadaf AB, Vats S, Katara JL et al. (2020): Genome Editing in Cereals: Approaches, Applications and Challenges. *International journal of molecular sciences* **21** (11). DOI: 10.3390/ijms21114040.
- ANWAR A, KIM JK (2020): Transgenic Breeding Approaches for Improving Abiotic Stress Tolerance: Recent Progress and Future Perspectives. *International journal of molecular sciences* **21** (8). DOI: 10.3390/ijms21082695.
- AREAL FJ, RIESGO L, RODRIGUEZ-CEREZO E (2013): Economic and agronomic impact of commercialized GM crops: a meta-analysis. *J. Agric. Sci.* **151** (1), 7–33.

- ARORA S, STEUERNAGEL B, GAURAV K, CHANDRAMOHAN S, LONG Y, MATNY O et al. (2019): Resistance gene cloning from a wild crop relative by sequence capture and association genetics. *Nature biotechnology* **37** (2): 139–143. DOI: 10.1038/s41587-018-0007-9.
- ARYAMANESH N, BYRNE O, HARDIE DC, KHAN T, SIDDIQUE KHM, YAN G (2012): Large-scale density-based screening for pea weevil resistance in advanced backcross lines derived from cultivated field pea (Pisum sativum) and Pisum fulvum. *Crop Pasture Sci.* **63** (7): 612–618.
- BADU-APRAKU B, FAKOREDE MAB, OYEKUNLE M, AKINWALE RO (2016): Genetic gains in grain yield under nitrogen stress following three decades of breeding for drought tolerance and Striga resistance in early maturing maize. *J. Agric. Sci.* **154** (4): 647–661. DOI: 10.1017/S0021859615000593.
- BARANSKI R, KLIMEK-CHODACKA M, LUKASIEWICZ A (2019): Approved genetically modified (GM) horticultural plants: A 25-year perspective. *Folia Horticulturae* 31 (1): 3–49. DOI: 10.2478/fhort-2019-0001.
- BARTELS G (2001): Pflanzenschutzmanagement bei pflugloser und reduzierter Bodenbearbeitung. In: Rodemann, B, Bartels G, Pestemer W, Becker H: Nachhaltige Landwirtschaft Pflanzenschutz und Gewässerschutz : wissenschaftliche Fachtagung in Berlin, 6. und 7. September 2000. Mitteilungen der Biologischen Bundesanstalt für Land- und Forstwirtschaft: 27-28.
- BERNARDO R (2008): Molecular Markers and Selection for Complex Traits in Plants: Learning from the Last 20 Years. *Crop Sci.* **48** (5): 1649–1664. DOI: 10.2135/cropsci2008.03.0131.
- BIEDENKOPF D, WILL T, KNAUER T, JELONEK L, FURCH ACU, BUSCHE T, KOCH A (2020): Systemic spreading of exogenous applied RNA biopesticides in the crop plant Hordeum vulgare. *ExRNA* **2** (1). DOI: 10.1186/s41544-020-00052-3.
- BISBIS M, GRUDA N, BLANKE M (2019): Securing Horticulture in a Changing Climate—A Mini Review. *Horticulturae* **5** (3): 56. DOI: 10.3390/horticulturae5030056.
- BJØRNSTAD Å (2016): Do Not Privatize the Giant's Shoulders: Rethinking Patents in Plant Breeding. *Trends in biotechnology* **34** (8): 609–617. DOI: 10.1016/j.tibtech.2016.02.007.
- BLANVILLAIN-BAUFUMÉ S, RESCHKE M, SOLÉ M, AUGUY F, DOUCOURE H, SZUREK B et al. (2017): Targeted promoter editing for rice resistance to Xanthomonas oryzae pv. oryzae reveals differential activities for SWEET 14-inducing TAL effectors. *Plant biotechnology journal* 15 (3): 306–317.
- BLE (2018): Die neue Düngeverordnung. 2. Auflage, 56 S.
- BMBF (2014): 25 Jahre BMBF-Forschungsprogramme zur biologischen Sicherheitsforschung. 2. Aufl. Hg. v. Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) Referat 617 Bioökonomie. Bonn.
- BMEL (2021): BMEL-Nachhaltigkeitsbericht 2021: Strategien für nachhaltige Landwirtschaft, Ernährung und ländliche Räume. Berlin.
- BMEL (2018): Daten und Fakten Land-, Forst- und Ernährungswirtschaft mit Fischerei und Wein- und Gartenbau.
- BMU und BMEL (2020): Nitratbericht 2020. Gemeinsamer Bericht der Bundesministerien für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit sowie für Ernährung und Landwirtschaft, 167 S. http://https://www.bmu.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Binnengewaesser/nitratbericht_202 0_bf.pdf (abgerufen am 16.04.2021).
- BODNER G, NAKHFOROOSH A, KAUL HP (2015): Management of crop water under drought: a review. *Agronomy for Sustainable Development* **35**(2): 401-442.
- BÖHM H, DAUBER J, DEHLERT M, AMTHAUER GALLARDO DA, DE WITTE T, FUß, R et al. (2020): Fruchtfolgen mit und ohne Leguminosen: ein Review. Journal für Kulturpflanzen **72**(11/12): 489-509. DOI: 10.5073/JfK.2020.10-11.01.

- Вöмeke, O, Kahrmann J, Matthies A (2018): Detaillierte Übersicht zum Regulatorischen Status der Neuen Molekularbiologischen Techniken (NMT) in Ausgewählten Drittstaaten. Online: https://www.bvl.bund.de/SharedDocs/Downloads/06_Gentechnik/molekulare_techniken/molekulare_techniken_bericht_anlage1.pdf (geprüft 14.5.2021).
- BÖNECKE E, BREITSAMETER L, BRÜGGEMANN N, CHEN TW, FEIKE T, KAGE H et al. (2020): Decoupling of impact factors reveals the response of German winter wheat yields to climatic changes. *Global change biology* **26** (6): 3601–3626. DOI: 10.1111/gcb.15073.
- BOREL B (2017): When pesticides run out. Nature 543, S. 302–304.
- BOULAIN H, LEGEAI F, JAQUIÉRY J, GUY E, MORLIÈRE S, SIMON JC, SUGIO A (2019): Differential Expression of Candidate Salivary Effector Genes in Pea Aphid Biotypes With Distinct Host Plant Specificity. *Front Plant Sci* **10**, S. 1301. DOI: 10.3389/fpls.2019.01301.
- BRAATZ J, HARLOFF HJ, MASCHER M, STEIN N, HIMMELBACH A, JUNG C (2017): CRISPR-Cas9 Targeted Mutagenesis Leads to Simultaneous Modification of Different Homoeologous Gene Copies in Polyploid Oilseed Rape (Brassica napus). *Plant Physiology* **174** (2), 9. DOI: 10.1104/pp.17.00426.
- Brandes M, Heimbach U (2019): Pyrethroid resistance of insect pests of oilseed rape in Germany. In: Union zur Förderung von Oel und Proteinpflanzen (Hg.): IRC 2019 15th International Rapeseed Congress: Flowering for the Future: Berlin, Germany, 16.–19.06.2019.
- BRANDL MA, SCHUMANN M, PRZYKLENK M, PATEL A, VIDAL S (2017): Wireworm damage reduction in potatoes with an attract-and-kill strategy using Metarhizium brunneum. *Journal of Pest Science* **90** (2): 479–493.
- Braun J, Brunotte J, Ernst U, Greef JM, Gröblinghoff FF, Heckmann M, et al. (2014): Klima-optimierte Anpassungsstrategien in der Landwirtschaft. Abschlussbericht. Zugriff: 03.06.2021, URL: https://service.ble.de/ptdb/index2.php?detail_id=23354&site_key=145&stichw=Klimaoptimierte +Anpassungsstrategien+in+der+Landwirtschaft&zeilenzahl_zaehler=69#newContent.
- Breitenmoser S, Steinger T, Hiltpold I, Grosjean Y, Nussbaum V, Bussereau F et al. (2020): Effet des plantes associées au colza d'hiver sur les dégâts d'altises. *Rech Agron Suisse* 11, S. 16–25.
- Breustedt G, Müller-Scheeßel J, Latacz-Lohmann U (2008): Forecasting the Adoption of GM Oilseed Rape: Evidence from a Discrete Choice Experiment in Germany. *J Agric Econ* **59** (2): 237–256. DOI: 10.1111/j.1477-9552.2007.00147.x.
- BRISSON N, GATE P, GOUACHE D, CHARMET G, OURY FX, HUARD F (2010): Why are wheat yields stagnating in Europe? A comprehensive data analysis for France. *Field Crops Research* **119** (1): 201–212. DOI: 10.1016/j.fcr.2010.07.012.
- Bröker M (2021): Regional treten Weizengallmücken auf. Online verfügbar unter https://www.topagrar.com/acker/news/regional-treten-weizengallmuecken-auf-12079882.html, zuletzt geprüft am 03.08.2021.
- BROOKES G (2007): The benefits of adopting genetically modified, insect resistant (Bt) maize in the European Union: First results from 1998-2006 plantings. Dorchester: UK: PG Economics Ltd.
- BROOKES G, BARFOOT P (2020): GM crop technology use 1996-2018: farm income and production impacts. *GM crops & food* **11** (4): 242–261. DOI: 10.1080/21645698.2020.1779574.
- BROOTHAERTS W, JACCHIA S, ANGERS A, PETRILLO M, QUERCI M, SAVINI C, VAN DEN EEDE G, EMONS H (2021): New Genomic Techniques: State-of-the-Art Review. Hrsg. JRC.
- BULLOCK DW, WILSON WW, NEADEAU J (2021): Gene Editing Versus Genetic Modification in the Research and Development of New Crop Traits: An Economic Comparison. *American Journal of Agricultural Economics*. DOI: 10.1111/ajae.12201.

- Die Bundesregierung, (2021): Report on the implementation of the 2030 Agenda for sustainable development: German Voluntary National Review to the HLPF 2021.
- Die Bundesregierung (2018): Deutsche Nachhaltigkeitsstrategie Aktualisierung 2018. Berlin.
- Burke M (2005): Managing GM crops with herbicides. Effects on farmland wildlife. Unter Mitarbeit von Farmscale Evaluations Research Consortium and. Hg. v. DEFRA (Farm Scale Evaluation). http://webarchive.nationalarchives.
 - gov.uk/20080306073937/http://www.defra.gov.uk/environment/gm/fse/results/fse-summary-05.pdf (26.8.2021)
- BUTLER NM, BALTES NJ, VOYTAS DF, DOUCHES DS (2016): Geminivirus-mediated genome editing in potato (Solanum tuberosum L.) using sequence-specific nucleases. *Frontiers in Plant Science* **7**, S. 1045.
- Byrne OM, Hardie DC, Khan TN, Speijers J, Yan G (2008): Genetic analysis of pod and seed resistance to pea weevil in a Pisum sativum× P. fulvum interspecific cross. *Aust. J. Agric. Res.* **59** (9): 854–862.
- CAESAR L, McCARTHY GD, THORNALLEY DJR, CAHILL N, RAHMSTORF S (2021): Current Atlantic Meridional Overturning Circulation weakest in last millennium. *Nat. Geosci.* **14** (3): 118–120. DOI: 10.1038/s41561-021-00699-z.
- CAINE RS, YIN X, SLOAN J, HARRISON EL, MOHAMMED U, FULTON T et al. (2019): Rice with reduced stomatal density conserves water and has improved drought tolerance under future climate conditions. *The New Phytologist* **221** (1): 371–384. DOI: 10.1111/nph.15344.
- CALDERINI DF, SLAFER GA (1999): Has yield stability changed with genetic improvement of wheat yield? Euphytica 107 (1): 51–59. DOI: 10.1023/A:1003579715714.
- CAMPBELL BM, THORNTON P, ZOUGMORÉ R, VAN ASTEN P, LIPPER L (2014): Sustainable intensification: What is its role in climate smart agriculture? *Current Opinion in Environmental Sustainability* **8**: 39–43. DOI: 10.1016/j.cosust.2014.07.002.
- CAMPOS H, COOPER M, EDMEADES GO, LÖFFLER C, SCHUSSLER JR, IBAÑEZ M (2006): Changes in drought tolerance in maize associated with fifty years of breeding for yield in the U.S. corn belt. *Maydica* **51**, S. 369–381.
- CANIA B, VESTERGAARD G, KRAUSS M, FLIESSBACH A, SCHLOTER M, SCHULZ S (2019): A long-term field experiment demonstrates the influence of tillage on the bacterial potential to produce soil structure-stabilizing agents such as exopolysaccharides and lipopolysaccharides. *Environmental Microbiome* **14** (1). DOI: 10.1186/s40793-019-0341-7.
- Consmüller N, Beckmann V, Petrick M (2010): An econometric analysis of regional adoption patterns of Bt maize in Germany. *Agricultural Economics* **41** (3-4): 275–284. DOI: 10.1111/j.1574-0862.2010.00439.x.
- CAO M, LIU H, ZHANG C, WANG D, LIU X, CHEN Q (2020): Functional Analysis of StPHT1,7, a Solanum tuberosum L. Phosphate Transporter Gene, in Growth and Drought Tolerance. *Plants* **9** (10). DOI: 10.3390/plants9101384.
- CARDINA J, JOHNSON GA, SPARROW DH (1997): The nature and consequence of weed spatial distribution. *Weed Science* **45** (3): 364–373. DOI: 10.1017/S0043174500092997.
- CERNAY C, MAKOWSKI D, PELZER E (2018): Preceding cultivation of grain legumes increases cereal yields under low nitrogen input conditions. *Environmental Chemistry Letters* **16**, 631–636, DOI: 10.1007/s10311-017-0698-z
- CHANDIO AA, OZTURK I, AKRAM W, AHMAD F, MIRANI AA (2020): Empirical analysis of climate change factors affecting cereal yield: evidence from Turkey. Environmanetal Science and Pollution Research 27 (11): 11944–11957. DOI: 10.1007/s11356-020-07739-y.

- CHANDRASEKARAN J, BRUMIN M, WOLF D, LEIBMAN D, KLAP C, PEARLSMAN M et al. (2016): Development of broad virus resistance in non-transgenic cucumber using CRISPR/Cas9 technology. *Molecular plant pathology* **17** (7): 1140–1153. DOI: 10.1111/mpp.12375.
- CHAUDHARY R, PENG HC, HE J, MACWILLIAMS J, TEIXEIRA M, TSUCHIYA T et al. (2019): Aphid effector Me10 interacts with tomato TFT7, a 14-3-3 isoform involved in aphid resistance. *The New Phytologist* **221** (3): 1518–1528. DOI: 10.1111/nph.15475.
- CHÁVEZ-ARIAS CC, LIGARRETO-MORENO GA, RAMÍREZ-GODOY A, RESTREPO-DÍAZ H (2021): Maize Responses Challenged by Drought, Elevated Daytime Temperature and Arthropod Herbivory Stresses: A Physiological, Biochemical and Molecular View. *Front. Plant Sci.* 12. DOI: 10.3389/fpls.2021.702841.
- CHEN G, ZHOU Y, KISHCHENKO O, STEPANENKO A, JATAYEV S, ZHANG D, BORISJUK N (2020): Gene editing to facilitate hybrid crop production. *Biotechnology Advances*: 107676.
- CHEN K, WANG Y, ZHANG R, ZHANG H, GAO C (2019): CRISPR/Cas Genome Editing and Precision Plant Breeding in Agriculture. *Annual Review of Plant Biology* **70**, S. 667–697. DOI: 10.1146/annurevarplant-050718-100049.
- CHEN LJ, LEE DS, SONG ZP, SUH HS, LU BR (2004): Gene flow from cultivated rice (Oryza sativa) to its weedy and wild relatives. *Annals of Botany* **93** (1): 67–73. DOI: 10.1093/aob/mch006.
- CHRISTEN O, SIELING K, HANUS H (1992): The effect of different preceding crops on the development, growth and yield of winter wheat. *European Journal of Agronomy* **1**(1): 21-28.
- CI X, LI M, XU J, LU Z, BAI P, RU G et al. (2012): Trends of grain yield and plant traits in Chinese maize cultivars from the 1950s to the 2000s. *Euphytica* **185** (3): 395–406. DOI: 10.1007/s10681-011-0560-5.
- COHEN J (2019): To feed its 1.4 billion, China bets big on genome editing of crops. *Science* **07**. DOI: 10.1126/science.aay8951.
- COHEN J (2019): Fields of dreams. Science, **365**: 422–425. DOI: 10.1126/science.365.6452.422.
- COMADRAN J, KILIAN B, RUSSELL J, RAMSAY L, STEIN N, GANAL M et al. (2012): Natural variation in a homolog of Antirrhinum CENTRORADIALIS contributed to spring growth habit and environmental adaptation in cultivated barley. *Nature Genetics* **44** (12): 1388–1392. DOI: 10.1038/ng.2447.
- COOPER M, GHO C, LEAFGREN R, TANG T, MESSINA C (2014): Breeding drought-tolerant maize hybrids for the US corn-belt: discovery to product. *Journal of Experimental Botany* **65** (21): 6191–6204. DOI: 10.1093/jxb/eru064.
- CORMIER F, FAURE S, DUBREUIL P, HEUMEZ E, BEAUCHÊNE K, LAFARGE S et al. (2013): A multi-environmental study of recent breeding progress on nitrogen use efficiency in wheat (Triticum aestivum L.). *Theoretical and Applied Genetics* **126** (12): 3035–3048. DOI: 10.1007/s00122-013-2191-9.
- Crespo-Herrera LA, Crossa J, Huerta-Espino J, Vargas M, Mondal S, Velu G et al. (2018): Genetic Gains for Grain Yield in CIMMYT's Semi-Arid Wheat Yield Trials Grown in Suboptimal Environments. *Crop Sci.* **58** (5): 1890–1898. DOI: 10.2135/cropsci2018.01.0017.
- CURTIN S (2017): RE: Inquiry regarding APHIS position on non-segregant CRISPR/Cas9 mutagenized Glycine max (soybean) line as a non-regulated article, 07.08.2017.
- DAFA (2012): Fachforum Leguminosen, Wissenschaft, Wirtschaft, Gesellschaft Ökosystemleistungen von Leguminosen wettbewerbsfähig machen. Forschungsstrategie der Deutschen Agrarforschungsallianz. Braunschweig, 57 S.
- Dahleen LS, Okubara PA, Blechl AE (2001): Transgenic Approaches to Combat Fusarium Head Blight in Wheat and Barley. *Crop Science* **41**(3): 628-637.

- Dalhaus T, Schlenker W, Blanke MM, Bravin E, Finger R (2020): The Effects of Extreme Weather on Apple Quality. *Scientific Reports* **10** (1): 7919. DOI: 10.1038/s41598-020-64806-7.
- DALLY N, ECKEL M, BATSCHAUER A, HÖFT N, JUNG C (2018): Two CONSTANS-LIKE genes jointly control flowering time in beet. *Scientific Reports* **8** (1): 16120. DOI: 10.1038/s41598-018-34328-4.
- Danilo B, Perrot L, Mara K, Botton E, Nogué F, Mazier M (2019): Efficient and transgene-free gene targeting using Agrobacterium-mediated delivery of the CRISPR/Cas9 system in tomato. *Plant Cell Reports* **38** (4): 459–462.
- DAS A, SHARMA N, PRASAD M. 2019 CRISPR/Cas9: A Novel Weapon in the Arsenal to Combat Plant Diseases. *Frontiers in Plant Science* **9**(2008).
- DATNOFF LE, ELMER WE, HUBER DM (2007): Mineral Nutrition and Plant Diseases. The American Phytopathological Society, St. Paul, Minnesota, USA
- DESTATIS (2017): https://www.destatis.de/DE/PresseService/Presse/Pressemitteilungen/2017/05/PD17_163_412p df.pdf? blob=publicationFile (abgerufen am 16.04.2021)
- DE BUCK A (2020): Overview of intercropping practices in Europe. Practice Abstract No. 9. IFOAM.
- DE VISSER CLM, SCHREUDER R, STODDARD F (2014): The EU's dependency on soya bean import for the animal feed industry and potential for EU produced alternatives. *Oilseeds and Fats, Crops and Lipids* **21**, D407
- Debska B, Jaskulska I, Jaskulski D (2020) Method of Tillage with the Factor Determining the Quality of Organic Matter. *Agronomy* **10**(9): 1250.
- DECONINCK K (2019): New evidence on concentration in seed markets. *Global Food Security* **23**: 135–138. DOI: 10.1016/j.gfs.2019.05.001.
- DEFRA (Department for Environment, Food & Rural Affairs) Details of the consent for Rothamsted Research to release genetically modified wheat, reference 16/R08/02. Published: 4 November 2016. https://www.gov.uk/government/publications/genetically-modified-organisms-rothamsted-research-16r0802 (Zugriff 19.4.2021)
- Degani E, Leigh SG, Barber HM, Jones HE, Lukac M, Sutton P, Potts SG (2019): Crop rotations in a climate change scenario: short-term effects of crop diversity on resilience and ecosystem service provision under drought. *Agriculture, Ecosystems & Environment* **285**: 106625.
- DEUTSCH CA, TEWKSBURY JJ, TIGCHELAAR M, BATTISTI DS, MERRILL SC, HUEY RB, NAYLOR RL (2018): Increase in crop losses to insect pests in a warming climate. *Science* **361** (6405): 916. DOI: 10.1126/science.aat3466.
- Deutscher Bundestag (1998): Abschlußbericht der Enquete-Kommission "Schutz des Menschen und der Umwelt Ziele und Rahmenbedingungen einer nachhaltig zukunftsverträglichen Entwicklung". http://dipbt.bundestag.de/doc/btd/13/112/1311200.pdf (letzter Zugriff: 05.12.2019).
- Deutscher Wetterdienst (DWD) (2020): Nationaler Klimareport 2020.
- DIETZ-PFEILSTETTER A, MENDELSOHN M, GATHMANN A, KLINKENBUß D (2021): Considerations and Regulatory Approaches in the USA and in the EU for dsRNA-Based Externally Applied Pesticides for Plant Protection. *Frontiers in Plant Science* (12). DOI: 10.3389/fpls.2021.682387.
- DOS REIS SP, MARQUES DN, FERREIRA BARROS NL, NAZARÉ MONTEIRO COSTA C, BATISTA DE SOUZA CR (2018): Genetically Engineered Food Crops to Abiotic Stress Tolerance. *Genetically Engineered Foods*. Elsevier. S. 247–279.,
- Duchêne E, Huard F, Dumas V, Schneider C Merdinoglu D (2010): The challenge of adapting grapevine varieties to climate change. *Clim. Res.* **41** (3): 193–204. DOI: 10.3354/cr00850.

- DüngG (2017): Düngegesetz vom 9. Januar 2009 (BGBl. I S. 54, 136), zuletzt geändert durch Art. 1 Gesetz vom 5. Mai 2017, BGBl. I S. 1068.
- DüV (2017): Verordnung über die ENGLAnwendung von Düngemitteln, Bodenhilfsstoffen, Kultursubstraten und Pflanzenhilfsmitteln nach den Grundsätzen der guten fachlichen Praxis beim Düngen (Düngeverordnung, DüV) vom 26. Mai 2017 (BGBl. I S. 1305), die durch Artikel 1 der Verordnung vom 28. April 2020 (BGBl. I S. 846) geändert worden ist.
- DUVICK DN (2005): The Contribution of Breeding to Yield Advances in maize (Zea mays L.). *Advances in Agronomy* **86**, S. 83–145.
- ECKERSTORFER MF, ENGELHARD M, HEISSENBERGER A, SIMON S, TEICHMANN H (2019): Plants Developed by New Genetic Modification Techniques—Comparison of Existing Regulatory Frameworks in the EU and Non-EU Countries. *Front. Bioeng. Biotechnol.* **7**: 26 Doi:10.3389/fbioe.2019.00026.
- EG-Nitratrichtlinie (91/676/EWG vom 12. Dezember 1991) Bekämpfung der Gewässerverunreinigung durch Nitrate aus der Landwirtschaft. https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/?uri=LEGISSUM%3AI28013
- EHLERS W, Goss M (2016): Water dynamics in plant production. 2nd edition. Wallingford, Boston: CABI.
- EILENBERG J, HAJEK A, LOMER C (2001): Suggestions for unifying the terminology in biological control. *BioControl* **46** (4): 387–400.
- ESHED Y, LIPPMAN ZB (2019): Revolutions in agriculture chart a course for targeted breeding of old and new crops. *Science* **366** (6466). DOI: 10.1126/science.aax0025.
- EU COM (2021): Sustainable development in the European Union: monitoring report on progress towards the SDGs in an EU context: 2021 edition. Publications Office, LU.
- EU COM (2020a): Delivering on the UN's Sustainable Development Goals A comprehensive approach, SWD (2020) 400 final. Brussels.
- EU COM (2020b): "Vom Hof auf den Tisch" eine Strategie für ein faires, gesundes und umweltfreundliches Lebensmittelsystem [WWW Document]. URL https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A52020DC0381 (accessed 9.4.21).
- EU COM (2019): The European Green Deal.
- EU COM (2010): A decade of EU-funded GMO research. (2001 2010). Luxemburg: EU Publ. Office.
- European Network of GMO Laboratories (ENGL) (2019): Detection of food and feed plant products obtained by new mutagenesis techniques.
- FANGUEIRO D, HJORTH M, GIOELLI F (2015): Acidification of animal slurry a review. *Journal of Environmental Management* **149**: 46-56.
- FERNANDEZ-CORNEJO J, WECHSLER S, LIVINGSTON M, MITCHELL L (2014): Genetically Engineered Crops in the United States: Department of Agriculture, Economic Research Service.
- Forschungsinstitut für biologischen Landbau (FiBL) (2012): Techniken der Pflanzenzüchtung Eine Einschätzung für den ökologischen Landbau.
- FINGER R, EL BENNI N, KAPHENGST T, EVANS C, HERBERT S, LEHMANN B et al. (2011): A Meta Analysis on Farm-Level Costs and Benefits of GM Crops. *Sustainability* **3** (5): 743–762. DOI: 10.3390/su3050743.
- FISHER M (2014): Lack of Chinese Approval for Import of US Agricultural Products Containing Agrisure VipteraTM MIR 162: A Case Study on Economic Impacts in Marketing Year 2013/14; NGFA: Washington DC, USA. Available online: http://ngfa.org/wp-content/uploads/Agrisure-Viptera-MIR-162-Case-Study-An-Economic-Impact-Analysis.pdf.
- FISCHER RAT, EDMEADES GO (2010): Breeding and Cereal Yield Progress. *Crop Sci.* 50, S-85-S-98. DOI: 10.2135/cropsci2009.10.0564.

- FISTER AS, LANDHERR L MAXIMOVA SN, GUILTINAN MJ (2018): Transient Expression of CRISPR/Cas9 Machinery Targeting TcNPR3 Enhances Defense Response in Theobroma cacao. *Front Plant Sci* **9**, S. 268. DOI: 10.3389/fpls.2018.00268.
- FLACHOWSKY H, HANKE MV, PEIL A, STRAUSS SH, FLADUNG M (2009): A review on transgenic approaches to accelerate breeding of woody plants. *Plant Breeding* **128**, 217-226
- FLACHOWSKY H, LE ROUX P-M, PEIL A, PATOCCHI A, RICHTER K, HANKE MV (2011) Applying a high-speed breeding technology to apple (Malus × domestica) based on transgenic early flowering plants and marker-assisted selection. *New Phytologist* **192**, 364-377
- FLETCHER SJ, REEVES PT, HOANG BT, MITTER N (2020): A Perspective on RNAi-Based Biopesticides. *Front Plant Sci* **11**, S. 51. DOI: 10.3389/fpls.2020.00051.
- FLUCKE C, DE MOL F, GEROWITT B (2014): Zum Einfluss der Fruchtfolge auf die Abundanzen künstlich etablierter Unkrautarten in zwei Feldversuchen. *Julius-Kühn-Archiv* (443): 149.
- FREYER B (2016): Ökologischer Landbau: Grundlagen, Wissensstand und Herausforderungen. UTB.
- FRICKE E (2017): Effiziente Bewässerungstechnik und -steuerung–Stand und Trends. In: Bewässerung in der Landwirtschaft, Thünen Working Paper 85.
- GANDORFER M, SCHLEICHER S, HEUSER S, PFEIFFER J, DEMMEL M (2017): Landwirtschaft 4.0—Digitalisierung und ihre Herausforderungen. *Ackerbau-technische Lösungen für die Zukunft* 9.
- GASSMANN AJ, PETZOLD-MAXWELL JL, KEWESHAN RS, DUNBAR MW (2011): Field-evolved resistance to Bt maize by western corn rootworm. *PloS one* **6** (7), e22629. DOI: 10.1371/journal.pone.0022629.
- GAYNOR RC, GORJANC G, BENTLEY AR, OBER ES, HOWELL P, JACKSON R et al. (2017): A Two-Part Strategy for Using Genomic Selection to Develop Inbred Lines. *Crop Science* **57** (5): 2372–2386. DOI: 10.2135/cropsci2016.09.0742.
- GESSESE M, BARIANA H, WONG D, HAYDEN M, BANSAL U (2019): Molecular Mapping of Stripe Rust Resistance Gene Yr81 in a Common Wheat Landrace Aus27430. *Plant Disease* 103 (6): 1166–1171. DOI: 10.1094/PDIS-06-18-1055-RE.
- GOCHT A, CONSMÜLLER N, THOM F, GRETHE H (2021): Economic and Environmental Consequences of the ECJ Genome Editing Judgment in Agriculture', Agronomy **11** (6): 6. Doi: 10.3390/agronomy11061212.
- GONG Z, XIONG L, SHI H, YANG S, HERRERA-ESTRELLA LR, XU G et al. (2020): Plant abiotic stress response and nutrient use efficiency. *Science China. Life Sciences* 63 (5): 635–674. DOI: 10.1007/s11427-020-1683-x.
- GONZÁLEZ FG, CAPELLA M, RIBICHICH KF, CURÍN F, GIACOMELLI JI, AYALA F et al. (2019): Field-grown transgenic wheat expressing the sunflower gene HaHB4 significantly outyields the wild type. *Journal of experimental botany* 70 (5): 1669–1681. DOI: 10.1093/jxb/erz037.
- GONZÁLEZ MN, MASSA GA, ANDERSSON M, TURESSON H, OLSSON N, FÄLT AS, STORANI L, DÉCIMA ONETO CA, HOFVANDER P FEINGOLD SE (2020): Reduced Enzymatic Browning in Potato Tubers by Specific Editing of a Polyphenol Oxidase Gene via Ribonucleoprotein Complexes Delivery of the CRISPR/Cas9 System. *Frontiers in Plant Science*, 10, 1649. https://doi.org/10.3389/fpls.2019.01649
- Greer DH (2012): Modelling leaf photosynthetic and transpiration temperature-dependent responses in Vitis vinifera cv. Semillon grapevines growing in hot, irrigated vineyard conditions. *AoB PLANTS* 2012, pls009. DOI: 10.1093/aobpla/pls009.
- GROHMANN L, KEILWAGEN J, DUENSING N, DAGAND E, HARTUNG F, WILHELM R et al. (2019): Detection and Identification of Genome Editing in Plants: Challenges and Opportunities. *Front Plant Sci* **10**, S. 236. DOI: 10.3389/fpls.2019.00236.

- CHEN G, ZHOU Y, KISHCHENKO O, STEPANENKO A, JATAYEV S, ZHANG D, BORISJUK N (2021): Gene editing to facilitate hybrid crop production. *Biotechnology Advances* **46**. DOI: 10.1016/j.biotechadv.2020.107676.
- HAENEL HD, RÖSEMANN C, DÄMMGEN U, DÖRING U, WULF S, EURICH-MENDEN B, FREIBAUER A, DÖHLER H, SCHREINER C, OSTERBURG B (2018): Berechnung von gas- und partikelförmigen Emissionen aus der deutschen Landwirtschaft 1990 2016, Report zu Methoden und Daten (RMD) Berichterstattung 2018, Thünen-Report 57, 428 S. https://literatur.thuenen.de/digbib_extern/dn059722.pdf (abgerufen am 16.04.2021)
- HAMM U, HÄRING AM, HÜLSBERGEN KJ, ISERMEYER F, LANGE S, NIGGLI U et al. (2017): Research strategy of the German Agricultural Research Alliance (DAFA) for the development of the organic farming and food sector in Germany. *Org. Agr.* **7** (3): 225–242. DOI: 10.1007/s13165-017-0187-5.
- HANCOCK JF, FINN CE, LUBY JJ, DALE A, CALLOW PW, SERÇE S (2010) Reconstruction of the Strawberry, Fragaria ×ananassa, Using Genotypes of F. virginiana and F. chiloensis. HortScience **45**(7), 1006-1013
- HANKE MV, FLACHOWSKY H, PEIL A, EMERIEWEN OF (2020): Malus x domestica Apple. Richard E. Litz, Fernando Pliego-Alfaro und Jose Ignacio Hormaza (Hg.): Biotechnology of fruit and nut crops. 2. ed. Walligford, UK, Boston, USA: CABI.
- HATT S, FRANCIS F, Xu Q, Wang S, Osawa N (2020): Perennial Flowering Strips for Conservation Biological Control of Insect Pests: From Picking and Mixing Flowers to Tailored Functional Diversity. Yulin Gao, Heikki M. T. Hokkanen und Ingeborg Menzler-Hokkanen (Hg.): Integrative Biological Control, Bd. 20. Cham: Springer International Publishing (Progress in Biological Control): 57–71.
- HAUFF V (Hrsg.) (1987): Unsere gemeinsame Zukunft. Der Brundtland-Bericht der Weltkommission für Umwelt und Entwicklung. Eggenkamp Verlag, Greven.
- HAUSMANN J, BRANDES M, HEIMBACH U (2019): Effects of dropleg application technique during flowering of oilseed rape on insect pests. *Crop protection* **126**, S. 104917.
- HAVERKORT AJ, BOONEKAMP PM, HUTTEN R, JACOBSEN E, LOTZ LAP, KESSEL GJT et al. (2016): Durable Late Blight Resistance in Potato Through Dynamic Varieties Obtained by Cisgenesis: Scientific and Societal Advances in the DuRPh Project. In: *Potato Res.* **59** (1): 35–66. DOI: 10.1007/s11540-015-9312-6.
- HEFFNER EL, SORRELLS ME, JANNINK JL (2009): Genomic Selection for Crop Improvement. *Crop Sci.* **49** (1): 1–12. DOI: 10.2135/cropsci2008.08.0512.
- HEIMBACH U, MÜLLER A (2013): Incidence of pyrethroid-resistant oilseed rape pests in Germany. *Pest Management Science* **69** (2): 209–216.
- HERTER CP, EBMEYER E, KOLLERS S, KORZUN V, MIEDANER T (2019): An experimental approach for estimating the genomic selection advantage for Fusarium head blight and Septoria tritici blotch in winter wheat. *TAG. Theoretical and Applied Genetics.* **132** (8): 2425–2437. DOI: 10.1007/s00122-019-03364-7.
- HJORT C, COLE J, FRÉBORT I (2021): European genome editing regulations: threats to the European bioeconomy andunfit for purpose. *EFB Bioeconomy Journal* 1: 100001. DOI: 10.1016/j.bioeco.2021.100001.
- HLAVÁČOVÁ M, KLEM K, RAPANTOVÁ B, NOVOTNÁ K, URBAN O, HLAVINKA P ET AL. (2018): Interactive effects of high temperature and drought stress during stem elongation, anthesis and early grain filling on the yield formation and photosynthesis of winter wheat. *Field Crops research* **221**, S. 182–195. DOI: 10.1016/j.fcr.2018.02.022.
- HODGKIN T, BORDONI P (2012): Climate Change and the Conservation of Plant Genetic Resources. *Journal of Crop Improvement* **26** (3): 329–345. DOI: 10.1080/15427528.2011.609928.
- HOWARD PH (2015): Intellectual Property and Consolidation in the Seed Industry. *Crop Sci.* **55** (6): 2489–2495. DOI: 10.2135/cropsci2014.09.0669.

- Hu B, Wang W, Ou S, Tang J, Li H, Che R et al. (2015): Variation in NRT1.1B contributes to nitrate-use divergence between rice subspecies. *Nature Genetics* **47** (7): 834–838. DOI: 10.1038/ng.3337.
- Hu H, Xiong L (2014): Genetic engineering and breeding of drought-resistant crops. *Annual Review of Plant Biology* 65, S. 715–741. DOI: 10.1146/annurev-arplant-050213-040000.
- IRFAN M, AZIZ T, MAQSOOD MA, BILAL HM, SIDDIQUE KHM, XU M (2020): Phosphorus (P) use efficiency in rice is linked to tissue-specific biomass and P allocation patterns. *Scientific Reports* **10** (1): 4278. DOI: 10.1038/s41598-020-61147-3.
- IWAMOTO M, TAGIRI A (2016): MicroRNA-targeted transcription factor gene RDD1 promotes nutrient ion uptake and accumulation in rice. *The Plant Journal for Cell and Molecular Biology* **85** (4): 466–477. DOI: 10.1111/tpj.13117.
- IZQUIERDO J, BLANCO-MORENO JM, CHAMORRO L, GONZÁLEZ-ANDÚJAR JL, SANS FX (2009): Spatial distribution of weed diversity within a cereal field. *Agron. Sustain. Dev.* **29** (3): 491–496. DOI: 10.1051/agro/2009009.
- JACOBI A (2012): Sommerweizen Flexible Alternative für die Spätsaat. Hrsg. Praxisnah. Online verfügbar unter https://www.praxisnah.de/index.cfm/article/6933.html.
- JAKAB G, MADARÁSZ B, SZABÓ JA, TÓTH A, ZACHÁRY D, SZALAI Z, KERTÉSZ Á, DYSON J. 2017. Infiltration and Soil Loss Changes during the Growing Season under Ploughing and Conservation Tillage. *Sustainability* **9**(10): 1726.
- JIA H, ZHANG Y, ORBOVIĆ V, XU J, WHITE FF, JONES JB, WANG N (2017): Genome editing of the disease susceptibility gene Cs LOB 1 in citrus confers resistance to citrus canker. *Plant Biotechnology Journal* **15** (7): 817–823.
- JORASCH P (2020): Potential, Challenges, and Threats for the Application of New Breeding Techniques by the Private Plant Breeding Sector in the EU. *Frontiers in Plant Science* **11**, S. 582011. DOI: 10.3389/fpls.2020.582011.
- Jupe F, Witek K, Verweij W, Sliwka J, Pritchard L, Etherington GJ et al. (2013): Resistance gene enrichment sequencing (RenSeq) enables reannotation of the NB-LRR gene family from sequenced plant genomes and rapid mapping of resistance loci in segregating populations. *The Plant Journal for cell and molecular biology* **76** (3): 530–544. DOI: 10.1111/tpj.12307.
- Jung C, Kage H, Niggli U, von Tiedemann A, Hrsg. (2021): Pflanzenproduktion in Deutschland–Bestandsaufnahme und Perspektiven für die Zukunft. Nova Acta Leopoldina 426, Wissenschaftliche Verlagsgesellschaft Stuttgart.
- KALAITZANDONAKES N, ALSTON, JM, BRADFORD KJ (2007): Compliance costs for regulatory approval of new biotech crops. *Nature biotechnology* **25** (5): 509–511. DOI: 10.1038/nbt0507-509.
- Kamphuis LG, Gao LL, Turnbull CGN, Singh KB (2019): Medicago truncatula—aphid interactions. *The Model Legume Medicago truncatula:* Wiley S. 363–368.
- Kanski L, Naumann M, Pawelzik E (2020): Flavor-Related Quality Attributes of Ripe Tomatoes Are Not Significantly Affected Under Two Common Household Conditions. *Front Plant Sci* **11**: 472. DOI: 10.3389/fpls.2020.00472.
- KARUNARATHNE SD, HAN Y, ZHANG XQ, LI C (2020): Advances in Understanding the Molecular Mechanisms and Potential Genetic Improvement for Nitrogen Use Efficiency in Barley. *Agronomy* **10** (5): 662. DOI: 10.3390/agronomy10050662.
- Kehlenbeck H, Rajmis S (2017): Sortenresistenzen II Was bleibt unterm Strich? *DLG Mitteilungen* **133** (2): 56–57.

- Khabbazi SD, Khabbazi AD, Cevik V, Ergül A (2020): Genetic engineering of horticultural crops contributes to the improvement of crop nutritional quality and shelf life. *Transgenic Technology Based Value Addition in Plant Biotechnology:* Elsevier, S. 247–272.
- KHAJURIA C, IVASHUTA S, WIGGINS E, FLAGEL L, MOAR W, PLEAU M et al. (2018): Development and characterization of the first dsRNA-resistant insect population from western corn rootworm, Diabrotica virgifera virgifera LeConte. *PloS one* 13 (5), e0197059.
- Kiaer LP, Weisbach AN; Weiner J (2013): Root and shoot competition: a meta-analysis. *J Ecol* **101** (5): 1298–1312. DOI: 10.1111/1365-2745.12129.
- KIM D, ALPTEKIN B, BUDAK H (2018): CRISPR/Cas9 genome editing in wheat. *Functional & Integrative Genomics* **18** (1): 31–41. DOI: 10.1007/s10142-017-0572-x.
- KIMBALL BA (2016): Crop responses to elevated CO2 and interactions with H2O, N, and temperature. *Current Opinion in Plant Biology* **31**, S. 36–43. DOI: 10.1016/j.pbi.2016.03.006.
- KIS A, HAMAR É, THOLT G, BÁN R, HAVELDA Z (2019): Creating highly efficient resistance against wheat dwarf virus in barley by employing CRISPR/Cas9 system. *Plant Biotechnology Journal* **17** (6): 1004–1006. DOI: 10.1111/pbi.13077.
- KLAAßEN H, FREITAG J (2004): Ackerunkräuter und Ackerungräser rechtzeitig erkennen: Landwirtschaftsverlag.
- KLEE HJ (2010): Improving the flavor of fresh fruits: genomics, biochemistry, and biotechnology. In: *The New Phytologist* **187** (1): 44–56. DOI: 10.1111/j.1469-8137.2010.03281.x.
- KLOCKE B, DACHBRODT-SAAYDEH S, SOMMERFELDT N (2017): Möglichkeiten und Grenzen: Anbau von resistenten Winterweizen-Sorten. *Cereal Technology* **17** (3): 67–70.
- KLÜMPER W, QAIM M (2014): A meta-analysis of the impacts of genetically modified crops. *PloS one* **9** (11): e111629. DOI: 10.1371/journal.pone.0111629.
- KOCH E, HERZ A, KLEESPIES RG, SCHMITT A, STEPHAN D, JEHLE JA (2019): Statusbericht Biologischer Pflanzenschutz 2018. 125 S. Seiten. Berichte aus dem Julius Kühn-Institut, Nr. 203 (2019): Statusbericht Biologischer Pflanzenschutz 2018. DOI: 10.5073/BERJKI.2018.203.000.
- Коск MA (2021): Open Intellectual Property Models for Plant Innovations in the Context of New Breeding Technologies. *Agronomy* **11** (6): 1218. DOI: 10.3390/agronomy11061218.
- KOLOTA E, ADAMCZEWSKA-SOWINSKA K (2013): Living Mulches in Vegetable Crops Production: Perspectives and Limitations (A Reviev). *Acta Sci. Pol. Hortorum Cultus* **12** (6): 127–142.
- KOTTMANN L, HEGEWALD H, FEIKE T, LEHNERT H, KEILWAGEN J, VON HÖRSTEN D, MICHAEL GREEF J, WEGENER J. (2019): Standraumoptimierung im Getreideanbau durch Gleichstandsaat. *Journal für Kulturpflanzen* **71** (4): S. 90-94. DOI: 10.5073/JfK.2019.04.03.
- KRATZ S, SCHICK J, SCHNUG E (2016): Trace elements in rock phosphates and P containing mineral and organo-mineral fertilizers sold in Germany. *Science of the Total Environment* **542**: 1013–1019.
- Kratz S, Schick J, Shwiekh R, Schnug E (2014): Abschätzung des Potentials erneuerbarer P-haltiger Rohstoffe in Deutschland zur Substitution rohphosphathaltiger Düngemittel. *Journal für Kulturpflanzen* **66** (8): 261–275.
- Kristoffersen R, Heick TM, Müller GM, Eriksen LB, Nielsen GC, Jørgensen LN (2020): The potential of cultivar mixtures to reduce fungicide input and mitigate fungicide resistance development. *Agronomy for Sustainable Development* **40**(5): 36.
- KTBL (2017): Klimaschutz in der Landwirtschaft Emissionsminderung in der Praxis: KTBL-Heft 119, 60 S. KTBL, Darmstadt

- Kumar G, Rashid MM, Teli B, Bajpai R, Nanda S, Yadav SK (2021): Cultivar Mixture: Old but Impactful Plant Disease Management Strategy. *International Journal of Economic Plants* **8** (3): 113–119.
- KUMAR R, KAUR A, PANDEY A, MAMRUTHA H, SINGH G (2019): CRISPR-based genome editing in wheat: a comprehensive review and future prospects. *Molecular Biology Reports* **46**: 3557–3569.
- Kumar A, Dubey A (2020): Rhizosphere microbiome: Engineering bacterial competitiveness for enhancing crop production. *Journal of Advanced Research* **24**, S. 337–352. DOI: 10.1016/j.jare.2020.04.014.
- KUROTHE RS, KUMAR G, SINGH R, SINGH HB, TIWARI SP, VISHWAKARMA AK et al. (2014): Effect of tillage and cropping systems on runoff, soil loss and crop yields under semiarid rainfed agriculture in India. *Soil and Tillage Research* **140**, S. 126–134. DOI: 10.1016/j.still.2014.03.005.
- LAIDIG F, FEIKE T, HADASCH S, RENTEL D, KLOCKE B, MIEDANER T, PIEPHO HP (2021): Breeding progress of disease resistance and impact of disease severity under natural infections in winter wheat variety trials. *Theoretical and Applied Genetics* **134** (5): 1281–1302. DOI: 10.1007/s00122-020-03728-4.
- LAIDIG F, PIEPHO HP, RENTEL D, DROBEK T, MEYER U (2017): Breeding progress, genotypic and environmental variation and correlation of quality traits in malting barley in German official variety trials between 1983 and 2015. *Theoretical and applied genetics* **130** (11): 2411–2429.
- LAIDIG F, PIEPHO HP, RENTEL D, DROBEK T, MEYER U, HUESKEN A (2017): Breeding progress, variation, and correlation of grain and quality traits in winter rye hybrid and population varieties and national onfarm progress in Germany over 26 years. *Theoretical and applied genetics* **130** (5): 981–998. DOI: 10.1007/s00122-017-2865-9.
- LAPIS-GAZA HR, JOST R, FINNEGAN PM (2014): Arabidopsis PHOSPHATE TRANSPORTER1 genes PHT1,8 and PHT1,9 are involved in root-to-shoot translocation of orthophosphate. BMC Plant Biology **14:** 334. DOI: 10.1186/s12870-014-0334-z.
- LASSOUED R, PHILLIPS, PWB, MACALL DM, HESSELN H, SMYTH SJ (2021): Expert opinions on the regulation of plant genome editing. *Plant biotechnology journal*. DOI: 10.1111/pbi.13597.
- LATI RN, RASMUSSEN J, ANDUJAR D, DORADO J, BERGE TW, WELLHAUSEN C et al. (2021): Site-specific weed management—constraints and opportunities for the weed research community: Insights from a workshop. *Weed Res* **61** (3): 147–153. DOI: 10.1111/wre.12469.
- LAZZARO M, COSTANZO A, BÀRBERI P (2018): Single vs multiple agroecosystem services provided by common wheat cultivar mixtures: Weed suppression, grain yield and quality. *Field Crops Research* **221**: 277-297.
- LEGAVE JM, BLANKE M, CHRISTEN D, GIOVANNINI D, MATHIEU V, OGER R (2013): A comprehensive overview of the spatial and temporal variability of apple bud dormancy release and blooming phenology in Western Europe. *International Journal of Biometeorology* **57** (2): 317–331. DOI: 10.1007/s00484-012-0551-9.
- LEMMON ZH, REEM NT, DALRYMPLE J, SOYK S, SWARTWOOD KE, RODRIGUEZ-LEAL D et al. (2018): Rapid improvement of domestication traits in an orphan crop by genome editing. *Nat Plants* **4** (10): 766–770. DOI: 10.1038/s41477-018-0259-x.
- LfL (2018): Leitfaden für die Düngung von Acker- und Grünland. Gelbes Heft, Stand: 2018, 14. Auflage, Schriftenreihe der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft, 98. https://www.lfl.bayern.de/mam/cms07/publikationen/daten/informationen/leitfaden-duengung-acker-gruenland_gelbes-heft_lfl-information.pdf (abgerufen am 16.04.2021).
- LfL. 2021. Integrierter Pflanzenschutz Weizenkrankheiten.
- LI J, ZHANG X, SUN Y, ZHANG J, DU W, GUO X et al. (2018): Efficient allelic replacement in rice by gene editing: A case study of the NRT1.1B gene. *Journal of Integrative Plant Biology* **60** (7): 536–540. DOI: 10.1111/jipb.12650.

- LI M, XU J, GAO Z, TIAN H, GAO Y, KARIMAN K (2020): Genetically modified crops are superior in their nitrogen use efficiency-A meta-analysis of three major cereals. *Scientific reports* **10** (1): 8568. DOI: 10.1038/s41598-020-65684-9.
- Liao S, Qin X, Luo L, Han Y, Wang X, Usman B et al. (2019): CRISPR/Cas9-Induced Mutagenesis of Semi-Rolled Leaf1,2 Confers Curled Leaf Phenotype and Drought Tolerance by Influencing Protein Expression Patterns and ROS Scavenging in Rice (Oryza sativa L.). ZhaAgronomy 9 (11): 728. DOI: 10.3390/agronomy9110728.
- LIU B, ZHAO S, WU X, WANG X, NAN Y, WANG D CHEN Q (2017): Identification and characterization of phosphate transporter genes in potato. *Journal of Biotechnology* **264**: 17–28. DOI: 10.1016/j.jbiotec.2017.10.012.
- LIU S, JAOUANNET M, DEMPSEY, DA, IMANI J, COUSTAU C, KOGEL KH (2020): RNA-based technologies for insect control in plant production. *Biotechnology Advances* **39**, 107463.
- LOEL J, KENTER C, MÄRLÄNDER B, HOFFMANN CM (2014): Assessment of breeding progress in sugar beet by testing old and new varieties under greenhouse and field conditions. *European Journal of Agronomy* 52, 146–156. DOI: 10.1016/j.eja.2013.09.016.
- LUCAS JA, HAWKINS NJ., FRAAIJE BA (2015): The evolution of fungicide resistance. *Advances in Applied Microbiology* **90**: 29–92. DOI: 10.1016/bs.aambs.2014.09.001.
- Lucht JM (2015) Public Acceptance of Biotechnology and GM Crops. *Viruses* **7**(8): 4254–4281. DOI: 10.3390/v7082819
- Luo L, XIA H, Lu BR (2019): Editorial: Crop Breeding for Drought Resistance. *Front Plant Sci* **10**: 314. DOI: 10.3389/fpls.2019.00314.
- LÜTTGER AB, FEIKE T (2018): Development of heat and drought related extreme weather events and their effect on winter wheat yields in Germany. *Theor Appl Climatol* **132** (1-2): 15–29. DOI: 10.1007/s00704-017-2076-y.
- LV Q ZHONG Y, WANG Y, WANG Z, ZHANG L, SHI J et al. (2014): SPX4 Negatively Regulates Phosphate Signaling and Homeostasis through Its Interaction with PHR2 in Rice. *The Plant cell* **26** (4): 1586–1597. DOI: 10.1105/tpc.114.123208.
- Landwirtschaftskammer Niedersachsen (2018): Empfehlungen zur Grunddüngung. Stand Februar 2018, 8 S. https://www.lwk-niedersachsen.de/index.cfm/portal/pflanze/nav/341/article/11622.html (abgerufen am 16.04.2021)
- LYZENGA WJ, POZNIAK CJ, KAGALE S (2021): Advanced domestication: harnessing the precision of gene editing in crop breeding. *Plant Biotechnology Journal* **19** (4): 660–670. DOI: 10.1111/pbi.13576.
- MACKINTOSH CA, LEWIS J, RADMER LE, SHIN S, HEINEN SJ, SMITH LA, WYCKOFF MN, DILL-MACKY R, EVANS CK, KRAVCHENKO S et al. (2007): Overexpression of defense response genes in transgenic wheat enhances resistance to Fusarium head blight. *Plant Cell Reports* **26**(4): 479-488.
- MAHFOUZ MM (2017): Genome editing: the efficient tool CRISPR-Cpf1. Nat Plants 3 (3): 1-2.
- MAKHOTENKO AV, KHROMOV AV, SNIGIR EA, MAKAROVA SS, MAKAROV VV, SUPRUNOVA TP et al. (2019): Functional Analysis of Coilin in Virus Resistance and Stress Tolerance of Potato Solanum tuberosum using CRISPR-Cas9 Editing. *Doklady. Biochemistry and Biophysics* **484** (1): 88–91. DOI: 10.1134/S1607672919010241.
- MAMINE F (2020): Barriers and levers to developing wheat—pea intercropping in Europe: A review. *Sustainability* **12**(17): 6962.
- MARTÍN-HERNÁNDEZ AM, Picó B (2021): Natural resistances to viruses in cucurbits. Agronomy 11 (1): 23.

- MAT JALALUDDIN NS, OTHMAN RY, HARIKRISHNA JA (2019): Global trends in research and commercialization of exogenous and endogenous RNAi technologies for crops. *Critical Reviews in Biotechnology* **39** (1): 67–78. DOI: 10.1080/07388551.2018.1496064.
- MATRES JM, HILSCHER J, DATTA A, ARMARIO-NÁJERA V, BAYSAL C, HE W et al. (2021): Genome editing in cereal crops: an overview. *Transgenic Research* **30**: 461–498. DOI: 10.1007/s11248-021-00259-6.
- McDougall P (2011): The cost and time involved in the discovery, development and authorisation of a new plant biotechnology derived trait. A consultancy study for Crop Life International, zuletzt geprüft am 16.06.2021.
- MELCHIORRE MN, LASCANO HR, TRIPPI VS (2002): Transgenic wheat plants resistant to herbicide BASTA obtained by microprojectile bombardment. *Biocell* **26**(2): 217.
- MENZ J, MODRZEJEWSKI D, HARTUNG F, WILHELM R, SPRINK T (2020): Genome Edited Crops Touch the Market: A View on the Global Development and Regulatory Environment. *Frontiers in Plant Science* **11**: 586027. DOI: 10.3389/fpls.2020.586027.
- MEUWISSEN THE., HAYES BJ, GODDARD ME (2001): Prediction of Total Genetic Value Using Genome-Wide Dense Marker Maps. *Genetics* **157** (4): 1819–1829. DOI: 10.1093/genetics/157.4.1819.
- MEYER D, SPANAKAKIS A (1998): Eignung von Weizenformen ohne Vernalisationsbedarf für den Herbst- und Frühjahrsanbau (Wechselweizen), Pflanzenbauliche Aspekte und Qualitätsverhalten. *Getreide, Mehl und Brot: technologische Zeitschrift für Getreide, Mehl und Backwaren* **52** (2): 67–78.
- MIEDANER T (2012): Mykotoxine in Weizen und Mais: Fusarien erfolgreich vorbeugen: DLG-Verlag.
- Modrzejewski D (2017): Ergebnisse zur Befragung über Möglichkeiten und Grenzen von neuen Pflanzenzüchtungstechniken im Öko-Landbau. Sebastian Wolfrum, Hauke Heuwinkel, Hans Jürgen Reents, Klaus Wiesinger und Kurt-Jürgen Hülsbergen (Hg.): Ökologischen Landbau weiterdenken. Verantwortung übernehmen, Vertrauen stärken: Beiträge zur 14. Wissenschaftstagung Ökologischer Landbau, Freising-Weihenstephan, 7. bis 10 März 2017. 1. Auflage. Berlin: Verlag Dr. Köster: 654–657. Online verfügbar unter https://orgprints.org/id/eprint/31739/1/Ergebnisse%20zur%20Befragung%20%C3%BCber%20M% C3%B6glichkeiten%20und%20Grenzen.pdf, zuletzt geprüft am 29.08.2021.
- Modrzejewski D, Hartung F, Sprink T, Krause D, Kohl C, Wilhelm R (2019): What is the available evidence for the range of applications of genome-editing as a new tool for plant trait modification and the potential occurrence of associated off-target effects: a systematic map. *Environ Evid* 8 (1). DOI: 10.1186/s13750-019-0171-5.
- MUNDT CC (2002) Use of multiline cultivars and cultivar mixtures for disease management. *Annual Review of Phytopathology* **40**(1): 381-410.
- Nekrasov V, Wang C, Win J, Lanz C, Weigel D, Kamoun S (2017): Rapid generation of a transgene-free powdery mildew resistant tomato by genome deletion. *Scientific Reports* **7** (1): 1–6.
- NEMALI KS, BONIN C, DOHLEMAN FG, STEPHENS M, REEVES WR, NELSON DE et al. (2015): Physiological responses related to increased grain yield under drought in the first biotechnology-derived drought-tolerant maize. *Plant, Cell & Environment* **38** (9): 1866–1880. DOI: 10.1111/pce.12446.
- Nemecek T, von Richthofen JS, Dubois G, Casta P, Charles R, Pahl H (2008): Environmental im-pacts of introducing grain legumes into European crop rotations. *European Journal of Agronomy* 28: 380-393. DOI: 10.1016/j.eja.2007.11.004.
- NGUYEN HC, LIN KH, Ho SL, CHIANG CM, YANG CM (2018): Enhancing the abiotic stress tolerance of plants: from chemical treatment to biotechnological approaches. *Physiologia plantarum* **164** (4): 452–466. DOI: 10.1111/ppl.12812.

- NGUYEN-SY T, CHENG W, TAWARAYA K, SUGAWARA K, KOBAYASHI K (2019): Impacts of climatic and varietal changes on phenology and yield components in rice production in Shonai region of Yamagata Prefecture, Northeast Japan for 36 years. *Plant Production Science* **22** (3): 382–394. DOI: 10.1080/1343943X.2019.1571421.
- Niggli U, Fließbach A (2012): Pflanzenbauliche Methoden und ihr Einfluss auf die Bodenfruchtbarkeit. Mitt. Ges. Pflanzenbauwiss. 24: 5–8.
- NJUGUNA E, COUSSENS G, AESAERT S, NEYT P, ANAMI S, VAN LIJSEBETTENS M (2017): Modulation of energy homeostasis in maize and Arabidopsis to develop lines tolerant to drought, genotoxic and oxidative stresses. *AF* **30** (2). DOI: 10.21825/af.v30i2.8080.
- NÖLKE G, HOUDELET M, KREUZALER F, PETERHÄNSEL C, SCHILLBERG S (2014): The expression of a recombinant glycolate dehydrogenase polyprotein in potato (Solanum tuberosum) plastids strongly enhances photosynthesis and tuber yield. *Plant Biotechnology Journal* **12** (6): 734–742. DOI: 10.1111/pbi.12178.
- NUIJTEN E, MESSMER M, VAN LAMMERTS BUEREN E (2017): Concepts and Strategies of Organic Plant Breeding in Light of Novel Breeding Techniques. *Sustainability* **9** (1): 18. DOI: 10.3390/su9010018.
- Nygren J, Shad N, Kvarnheden A, Westerbergh A (2015): Variation in susceptibility to wheat dwarf virus among wild and domesticated wheat. *PloS one* **10** (4), e0121580.
- OECD, Environment Directorate (2020): Considerations for the Environmental Risk Assessment of the Application of Sprayed or Externally Applied ds-RNA-Based Pesticides. Series on Pesticides No. 104. ENV/JM/MONO(2020)26.
- Oerke EC (2006): Crop losses to pests. J. Agric. Sci. 144 (1): 31–43. DOI: 10.1017/S0021859605005708.
- Pahlmann I, Kage H (2018): Steigerung der N-Effizienz im Ackerbau: Welche Optionen haben wir in intensiven Anbausystemen. Vorträge zur Hochschultagung 2018 "Landwirtschaft und Ernährung im Spannungsfeld zwischen Umwelt, Gesellschaft und Politik". Schriftenreihe der Agrar- und Ernährungswissenschaftlichen Fakultät der Universität Kiel 125: 113-125.
- Pallutt B (2000): Unkrautunterdrückung und-bekämpfung durch Fruchtfolgegestaltung, Bodenbearbeitung, Aussaatzeit, Saatmenge und Stickstoffversorgung. *Pflanzenschutz im Ökologischen Landbau-Probleme und Lösungsansätze-Drittes Fachgespräch am 02.11. 1999 in Kleinmachnow-" Unkrautregulierung im ökologischen Landbau"*: 35-46.
- Pantera A, Burgess PJ, Mosquera Losada R, Moreno G, López-Díaz ML, Corroyer N, McAdam J, Rosati A, Papadopoulos AM, Graves A, et al. (2018): Agroforestry for high value tree systems in Europe. *Agroforestry Systems* **92**(4): 945-959.
- Parisi C, Rodriguez-Cerezo E (2021): Current and future market applications of new genomic techniques. Hg. v. JRC.
- Pearson DE, Callaway RM (2005): Indirect nontarget effects of host-specific biological control agents: Implications for biological control. *Biological Control* **35** (3): 288–298. DOI: 10.1016/j.biocontrol.2005.05.011.
- Pellegrino E, Bedini S, Nuti M, Ercoli L (2018): Impact of genetically engineered maize on agronomic, environmental and toxicological traits: a meta-analysis of 21 years of field data. *Scientific Reports* 8 (1): 3113. DOI: 10.1038/s41598-018-21284-2.
- Peltonen-Sainio P, Jauhiainen L, Laurila IP (2009): Cereal yield trends in northern European conditions: Changes in yield potential and its realisation. *Field Crops Research* **110** (1): 85–90. DOI: 10.1016/j.fcr.2008.07.007.

- Peng Z, Wang L, Xie J, Li L, Coulter JA., Zhang R et al. (2019): Conservation Tillage Increases Water Use Efficiency of Spring Wheat by Optimizing Water Transfer in a Semi-Arid Environment. *Agronomy* **9** (10): 583. DOI: 10.3390/agronomy9100583.
- POLAND JA, BROWN PJ, SORRELLS ME., JANNINK JL (2012): Development of high-density genetic maps for barley and wheat using a novel two-enzyme genotyping-by-sequencing approach. *PloS one* **7** (2), e32253. DOI: 10.1371/journal.pone.0032253.
- PRASUHN V (2012): On-farm effects of tillage and crops on soil erosion measured over 10 years in Switzerland. *Soil and Tillage Research* 120: 137-146.
- PREIßEL S, RECKLING M, CHLÄFKE N, ZANDER P (2015): Magnitude and farm-economic value of grain legume precrop benefits in Europe: A review. *Field Crops Research* **175**: 64-79, DOI: 10.1016/j.fcr.2015.01.012.
- Purnhagen K, Wesseler J (2020): EU Regulation of New Plant Breeding Technologies and Their Possible Economic Implications for the EU and Beyond. *Applied Economic Perspectives and Policy*. DOI: 10.1002/aepp.13084.
- Purnhagen, K.P.; Clemens, S.; Eriksson, D.; Fresco, L.O.; Tosun, J.; Qaim, M.; Visser, R.G.F.; Weber, A.P.M.; Wesseler, J.H.H.; Zilberman, D. Europe's farm to fork strategy and its commitment to biotechnology and organic farming: Conflicting or complementary goals? Trends Plant Sci. 2021, 26, 600–606.
- QAIM M (2020): Role of New Plant Breeding Technologies for Food Security and Sustainable Agricultural Development. *Applied Economic Perspectives and Policy* **42** (2): 129–150. DOI: 10.1002/aepp.13044.
- R4P Network (2016): Trends and Challenges in Pesticide Resistance Detection. *Trends in Plant Science* **21** (10): 834–853. DOI: 10.1016/j.tplants.2016.06.006.
- RAMSDEN MW, KENDALL SL, ELLIS SA, BERRY PM (2017): A review of economic thresholds for invertebrate pests in UK arable crops. *Crop Protection* **96**: 30–43. DOI: 10.1016/j.cropro.2017.01.009.
- RAZZAQ A, SALEEM F, KANWAL M, MUSTAFA G, YOUSAF S, IMRAN ARSHAD HM et al. (2019): Modern Trends in Plant Genome Editing: An Inclusive Review of the CRISPR/Cas9 Toolbox. *International Journal of Molecular Sciences* **20** (16). DOI: 10.3390/ijms20164045.
- REDDY CS, KIM SC, KAUL T (2017): Genetically modified phytase crops role in sustainable plant and animal nutrition and ecological development: a review. *Biotech* **7** (3): 195. DOI: 10.1007/s13205-017-0797-3.
- RIAL-LOVERA K, DAVIES WP, CANNON ND (2017): Implications of climate change predictions for UK cropping and prospects for possible mitigation: a review of challenges and potential responses. Journal of Food and Agriculture **97**: 17–32. DOI: 10.1002/jsfa.7767.
- RINCKER K, NELSON R, SPECHT J, SLEPER D, CARY T, CIANZIO SR et al. (2014): Genetic Improvement of U.S. Soybean in Maturity Groups II, III, and IV. *Crop Sci.* **54** (4): 1419–1432. DOI: 10.2135/cropsci2013.10.0665.
- RODEMANN B (2020): Gleichstandsaat oder Drillsaat? Land und Forst 45: 24–25.
- RODRIGUEZ PA, ESCUDERO-MARTINEZ C, Bos JIB (2017): An Aphid Effector Targets Trafficking Protein VPS52 in a Host-Specific Manner to Promote Virulence. *Plant Physiology* **173** (3): 1892–1903. DOI: 10.1104/pp.16.01458.
- RÖPER KF, GRÖBLINGHOFF F, RUOSS N, BERGLAR J, KRAMPS-ALPMANN D, KORTE K et al. (2017): Klimaoptimierte Anpassungsstrategien in der Landwirtschaft, Abschlussbericht, 92 S. BLE FKZ: 2810HS012.
- Roïz J (2014): Limits of the current EU regulatory framework on GMOs: Risk of not authorized GM event-traces in imports. OCL *Oleagineux Corps Gras Lipides* **21**. DOI:10.1051/ocl/2014037.
- ROSKOSCH A, HEIDECKE P (2018): Klärschlammentsorgung in der Bundesrepublik Deutschland. Hg. v. Umweltbundesamt. Dessau-Roßlau.

- ROßberg D, Michel V, Graf R, Neukampf R (2007): Definition von Boden-Klima-Räumen für die Bundesrepublik Deutschland. *Nachrichtenbl. Deut. Pflanzenschutzd.* **59** (7): 155–161.
- RÜCKAMP D, SCHICK J, HANEKLAUS S, SCHNUG E (2013): Knowledge Report Algorithms for variable-rate application of manure. Baltic Forum for Innovative Technologies for Sustainable Manure Management, Baltic Manure WP4: Standardisation of Manure Types with Focus on Phosphorus, 51 S.
- Russell WA (1991): Genetic Improvement of Maize Yields. Advances in Agronomy 46: 245–298.
- SALIM N, RAZA A (2020): Nutrient use efficiency (NUE) for sustainable wheat production: a review. *Journal of Plant Nutrition* **43** (2): 297–315. DOI: 10.1080/01904167.2019.1676907.
- Saltzmann J, Kehlenbeck H (2018): Wirtschaftlichkeitsbewertung von Pflanzenschutzstrategien in E- und A-Weizen anhand eines Feldversuches in Brandenburg mit sechsgliedriger Fruchtfolge in den Jahren 2004 bis 2016. *Gesunde Pflanzen* **70**(3): 129-138.
- SAMARAH NH, ALQUDAH AM, AMAYREH JA, McAndrews GM (2009): The Effect of Late-terminal Drought Stress on Yield Components of Four Barley Cultivars. *J Agro Crop Sci* **195** (6): 427–441. DOI: 10.1111/j.1439-037X.2009.00387.x.
- SAN MIGUEL K, SCOTT JG (2016): The next generation of insecticides: dsRNA is stable as a foliar-applied insecticide. *Pest Management Science* **72** (4): 801–809. DOI: 10.1002/ps.4056.
- SANCHEZ-GARCIA M, ROYO C, APARICIO,N, MARTÍN-SÁNCHEZ JA, ALVARO F (2013): Genetic improvement of bread wheat yield and associated traits in Spain during the 20th century. *J. Agric. Sci.* **151** (1): 105–118. DOI: 10.1017/S0021859612000330.
- Santosh Kumar VV, Verma RK, Yadav SK, Yadav P, Watts A, Rao MV, Chinnusamy V (2020): CRISPR-Cas9 mediated genome editing of drought and salt tolerance (OsDST) gene in indica mega rice cultivar MTU1010. *Physiology and Molecular Biology of Plants* **26** (6): 1099–1110. DOI: 10.1007/s12298-020-00819-w.
- Sashidhar N, Harloff HJ, Potgleter L, Jung C (2020): Gene editing of three BnITPK genes in tetraploid oilseed rape leads to significant reduction of phytic acid in seeds. *Plant Biotechnology Journal* 18 (11): 2241–2250. DOI: 10.1111/pbi.13380.
- SAUER-KESPER C, LUCIA N, BUSER H, VOGLER U (2011): Bedeutung und Verbrietung des neuen Biotyps-Nr:1 der Grünen Salatlaus in der Deutschschweiz. *Agrarforschung Schweiz* **2** (10): 462–469.
- SAVARY S, WILLOCQUET L, PETHYBRIDGE SJ, ESKER P, MCROBERTS N, NELSON A (2019): The global burden of pathogens and pests on major food crops. *Nature Ecology & Evolution* **3** (3): 430–439. DOI: 10.1038/s41559-018-0793-y.
- Schäfer F, Messmer M (2018): Eckpunktepapier für die Etablierung eines tragfähigen Finanzierungssystems der Biozüchtung. FIBL. Online verfügbar unter https://orgprints.org/id/eprint/38440/1/schaefer-messmer-2018-FiBL_SOEPZ_Eckpunktepapier_VersionOktober_20181016_logos.pdf, zuletzt geprüft am 29.08.2021.
- Schenke D, Cal D (2020): Applications of CRISPR/Cas to Improve Crop Disease Resistance: Beyond Inactivation of Susceptibility Factors. *iScience* **23** (9): 101478. DOI: 10.1016/j.isci.2020.101478.
- Schenkel W, Gathmann A (2021): Regulatory aspects of RNAi in plant production. In: RNAi for Plant Improvement and Protection [S.I.]: CABI Pubslishing.
- Schlathölter I, Jänsch M, Flachowsky H, Broggini GAL, Hanke M-V, Patocchi A (2018) Generation of advanced fire blight resistant apple (Malus domestica) selections of the 5th generation within seven years applying the early flowering approach. *Planta* **247**(6), 1475-1488

- Schmidt A, Kirmer A, Kirmer A, Kirmer S (2020): Seed mixture strongly affects species-richness and quality of perennial flower strips on fertile soil. *Basic and Applied Ecology* 42: 62–72. DOI: 10.1016/j.baae.2019.11.005.
- Schmidt C, Fransz P, Rönspies M, Dreissig S, Fuchs J, Heckmann S et al. (2020): Changing local recombination patterns in Arabidopsis by CRISPR/Cas mediated chromosome engineering. *Nature Communications* **11** (1): 4418. DOI: 10.1038/s41467-020-18277-z.
- Schmidt SM, Belisle M, Frommer WB (2020): The evolving landscape around genome editing in agriculture: Many countries have exempted or move to exempt forms of genome editing from GMO regulation of crop plants. *EMBO Rep.* **21**. DOI:10.15252/embr.202050680.
- Scholz H (1987): Konzeptionelle Vorstellungen des Bundesernährungsministeriums für eine umweltverträgliche Landwirtschaft und deren Realisierungschancen in der EG. *Proceedings "Schriften der Gesellschaft für Wirtschafts-und Sozialwissenschaften des Landbaues e.V."* **23**: 455-469.
- Scientific Foresight Unit, European Parliamentary Research Service (2019): Farming without plant protection products. Unter Mitarbeit von Wannes Keulemans, Dany Bylemans und Barbara de Coninck. Hg. v. European Union. Brussels.
- Selvaraj MG, Ishizaki T, Valencia M, Ogawa S, Dedicova B, Ogata T et al. (2017): Overexpression of an Arabidopsis thaliana galactinol synthase gene improves drought tolerance in transgenic rice and increased grain yield in the field. *Plant Biotechnology Journal* **15** (11): 1465–1477. DOI: 10.1111/pbi.12731.
- Serfling A, Templer SE, Winter P, Ordon F (2016): Microscopic and Molecular Characterization of the Prehaustorial Resistance against Wheat Leaf Rust (Puccinia triticina) in Einkorn (Triticum monococcum). *Front Plant Sci* **7**: 1668. DOI: 10.3389/fpls.2016.01668.
- SHAVRUKOV Y, KURISHBAYEV A, JATAYEV S, SHVIDCHENKO V, ZOTOVA L, KOEKEMOER F et al. (2017): Early Flowering as a Drought Escape Mechanism in Plants: How Can It Aid Wheat Production? *Front Plant Sci* **8**: 1950. DOI: 10.3389/fpls.2017.01950.
- Shi J, Gao H, Wang H, Lafitte HR Archibald, RL, Yang M et al. (2017): ARGOS8 variants generated by CRISPR-Cas9 improve maize grain yield under field drought stress conditions. *Plant Biotechnology Journal* **15** (2): 207–216. DOI: 10.1111/pbi.12603.
- SHIPMAN EN, YU J, ZHOU J, ALBORNOZ K, BECKLES DM (2021): Can gene editing reduce postharvest waste and loss of fruit, vegetables, and ornamentals? *Horticulture Research* **8** (1): 1. DOI: 10.1038/s41438-020-00428-4.
- SIEBERT S, EWERT F, EYSHI REZAEI E, KAGE H, GRAß R (2014): Impact of heat stress on crop yield—on the importance of considering canopy temperature. *Environ. Res. Lett.* 9 (4): 44012. DOI: 10.1088/1748-9326/9/4/044012.
- SIEGWART M, GRAILLOT B, BLACHERE LOPEZ C, BESSE S, BARDIN M, NICOT PC, LOPEZ-FERBER M (2015): Resistance to bio-insecticides or how to enhance their sustainability: a review. *Front Plant Sci* 6: 381. DOI: 10.3389/fpls.2015.00381.
- SINGH RP, RAJARAM S (2002): Breeding for disease resistance in wheat. B. C. Curtis, S. Rajaram und Helena Gómez Macpherson (Hg.): Bread wheat. Improvement and production. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations (Plant production and protection series, 30).
- SINGH B, SALARIA N, THAKUR K, KUKREJA S, GAUTAM S (2019): Functional genomic approaches to improve crop plant heat stress tolerance. (online open peer review, not finalised!). *F1000 Research* 8. DOI: 10.12688/f1000research.19840.1.

- SINGH RP (2012). Pros and cons of utilizing major, race-specific resistance genes versus partial resistance in breeding rust resistant wheat. Proceedings, Borlaug Global Rust Initiative, 2012 Technical Workshop, September 1-4, Beijing, China. Pp. 57-65). Borlaug Global Rust Initiative. ISBN: 13: 978-0-615-70429-6
- SMART RD, BLUM M, WESSELER J (2017): Trends in Approval Times for Genetically Engineered Crops in the United States and the European Union. *J Agric Econ* **68** (1): 182–198. DOI: 10.1111/1477-9552.12171.
- SMITH MR, MYERS SS (2018): Impact of anthropogenic CO2 emissions on global human nutrition. *Nature Clim Change* **8** (9): 834–839. DOI: 10.1038/s41558-018-0253-3.
- SMYTH SJ, McDonald J, Falck-Zepeda J (2014): Investment, regulation, and uncertainty: managing new plant breeding techniques. *GM Crops & Food* 5 (1): 44–57. DOI: 10.4161/gmcr.27465.
- SNOWDON RJ., WITTKOP B, CHEN TW, STAHL A (2020): Crop adaptation to climate change as a consequence of long-term breeding. *TAG. Theoretical and Applied Genetics.* **134**: 1613–1623. DOI: 10.1007/s00122-020-03729-3.
- SPIEGEL AK, GRONLE A, ARNCKEN C, BERNHARDT T, HEß J, SCHMACK J, SCHMID J, SPORY K, WILBOIS KP (2014): Leguminosen nutzen-Naturverträgliche Anbaumethoden aus der Praxis: Bundesamt für Naturschutz (BfN).
- Sprink T, Eriksson D, Schiemann J, Hartung F (2016): Regulatory hurdles for genome editing: Process- vs. product-based approaches in different regulatory contexts. *Plant Cell Rep.* **35**: 1493–1506. DOI:10.1007/s00299-016-1990-2.
- STAHL A, PFEIFER M, FRISCH M, WITTKOP B, SNOWDON RJ (2017): Recent Genetic Gains in Nitrogen Use Efficiency in Oilseed Rape. *Front Plant Sci* 8: 963. DOI: 10.3389/fpls.2017.00963.
- STAHL A, VOLLRATH P, SAMANS B, FRISCH M, WITTKOP B, SNOWDON RJ (2019): Effect of breeding on nitrogen use efficiency-associated traits in oilseed rape. *Journal of Experimental Botany* **70** (6): 1969–1986. DOI: 10.1093/jxb/erz044.
- Sanvido O, Stark M, Romeis J, Bigler F (2006): Ecological impacts of genetically modified crops: experiences from ten years of experimental field research and commercial cultivation. Swiss Expert Committee for Biosafety. *ART-Schriftenreihe* 1: 1–84
- SÉGUIN-SWARTZ G, BECKIE HJ, WARWICK SI, ROSLINSKY V, NETTLETON JA, JOHNSON EN, FALK KC (2013): Pollen-mediated gene flow between glyphosate-resistant Brassica napus canola and B. juncea and B. carinata mustard crops under large-scale field conditions in Saskatchewan. *Can. J. Plant Sci.* **93** (6): 1083–1087. DOI: 10.4141/cjps2013-129.
- SMALE M, SINGH J, DI FALCO S, ZAMBRANO P (2008): Wheat breeding, productivity and slow variety change: evidence from the Punjab of India after the Green Revolution. *Australian Journal of Agricultural and Resource Economics* **52** (4): 419–432. DOI: 10.1111/j.1467-8489.2008.00435.x.
- SMÝKAL P, NELSON M, BERGER J, VON WETTBERG E (2018): The Impact of Genetic Changes during Crop Domestication. *Agronomy* **8** (7): 119. DOI: 10.3390/agronomy8070119.
- SQUIRE GR, BRECKLING B, DIETZ PFEILSTETTER A, JORGENSEN RB, LECOMTE J, PIVARD S et al. (2011): Status of feral oilseed rape in Europe: its minor role as a GM impurity and its potential as a reservoir of transgene persistence. *Environmental Science and Pollution Research International* **18** (1): 111–115. DOI: 10.1007/s11356-010-0376-1.
- STEIN S, STEINMANN HH (2018): Identifying crop rotation practice by the typification of crop sequence patterns for arable farming systems A case study from Central Europe. *European Journal of Agronomy* **92**: 30-40.

- STEINMANN HH, DOBERS ES (2013): Spatio-temporal analysis of crop rotations and crop sequence patterns in Northern Germany: potential implications on plant health and crop protection. *J Plant Dis Prot* **120** (2): 85–94. DOI: 10.1007/BF03356458.
- Sun J, Janisiewicz WJ, Nichols B, Jurick II WM, Chen P (2017) Composition of phenolic compounds in wild apple with multiple resistance mechanisms against postharvest blue mold decay. *Postharvest Biology and Technology* **127**: 68-75.
- TABASHNIK BE, BRÉVAULT T, CARRIÈRE Y (2013): Insect resistance to Bt crops: lessons from the first billion acres. *Nature Biotechnology* **31** (6): 510–521. DOI: 10.1038/nbt.2597.
- TAKAHASHI Y, SAKAI H, YOSHITSU Y, MUTO C, ANAI T, PANDIYAN M et al. (2019): Domesticating Vigna Stipulacea: A Potential Legume Crop With Broad Resistance to Biotic Stresses. *Frontiers in Plant Science* **10**, S. 1607. DOI: 10.3389/fpls.2019.01607.
- Taning CN, Arpaia S, Christiaens O, Dietz-Pfeilstetter A, Jones H, Mezzetti B et al. (2020): RNA-based biocontrol compounds: current status and perspectives to reach the market. *Pest Management Science* **76** (3): 841–845. DOI: 10.1002/ps.5686.
- TANKSLEY SD, McCouch SR (1997): Seed banks and molecular maps: unlocking genetic potential from the wild. *Science* **277** (5329): 1063–1066. DOI: 10.1126/science.277.5329.1063.
- TARDIEU F (2012): Any trait or trait-related allele can confer drought tolerance: just design the right drought scenario. *Journal of Experimental Botany* **63** (1): 25–31. DOI: 10.1093/jxb/err269.
- TEEM JL, ALPHEY L, DESCAMPS S, EDGINGTON MP, EDWARDS O, GEMMELL N et al. (2020): Genetic Biocontrol for Invasive Species. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology* **8**: 452. DOI: 10.3389/fbioe.2020.00452.
- Thuenen Report 57, 428 S. https://literatur.thuenen.de/digbib_extern/dn059722.pdf (abgerufen am 16.04.2021)
- TIWARI JK, PLETT D, GARNETT T, CHAKRABARTI SK, SINGH RK (2018): Integrated genomics, physiology and breeding approaches for improving nitrogen use efficiency in potato: translating knowledge from other crops. *Functional Plant Biology* **45** (6): 587–605. DOI: 10.1071/FP17303.
- TIWARI JK, BUCKSETH T, SINGH RK, KUMAR M, KANT S (2020): Prospects of Improving Nitrogen Use Efficiency in Potato: Lessons From Transgenics to Genome Editing Strategies in Plants. *Front Plant Sci* **11**: 597481. DOI: 10.3389/fpls.2020.597481.
- TIWARI JK, BUCKSETH T, ZINTA R, SARASWATI A, SINGH RK, RAWAT S, CHAKRABARTI SK (2020): Genome-wide identification and characterization of microRNAs by small RNA sequencing for low nitrogen stress in potato. *PloS one* **15** (5), e0233076. DOI: 10.1371/journal.pone.0233076.
- TOIVONEN M, HUUSELA-VEISTOLA E, HERZON, I (2018): Perennial fallow strips support biological pest control in spring cereal in Northern Europe. *Biological Control* **121**, S. 109–118. DOI: 10.1016/j.biocontrol.2018.02.015.
- TOLEDO THOMAZELLA DP, BRAIL Q, DAHLBECK D, STASKAWICZ B (2016): CRISPR-Cas9 mediated mutagenesis of a DMR6 ortholog in tomato confers broad-spectrum disease resistance. *BioRxiv*, 64824.
- TØRRESEN KS, SKUTERUD R, WEISETH L, TANDSÆTHER HJ, HAUGAN JONSEN S (1999): Plant protection in spring cereal production with reduced tillage. I. Grain yield and weed development. *Crop Protection* **18**(9): 595-603.
- TRAVLOS I, DE PRADO R, CHACHALIS D, BILALIS DJ (2020): Editorial: Herbicide Resistance in Weeds: Early Detection, Mechanisms, Dispersal, New Insights and Management Issues. *Front. Ecol. Evol.* **8**. DOI: 10.3389/fevo.2020.00213.

- TROMMETTER M (2008): Intellectual Property Rights in Agricultural and Agro-Food Biotechnologies to 2030. OECD. Online verfügbar unter http://www.oecd.org/dataoecd/11/56/40926131.pdf, zuletzt geprüft am 29.08.2021.
- TRIPATHI JN, NTUI VO, RON M, MUIRURI SK, BRITT A, TRIPATHI L (2019): CRISPR/Cas9 editing of endogenous banana streak virus in the B genome of Musa spp. overcomes a major challenge in banana breeding. *Communications Biology* **2** (1): 1–11.
- TSCHUMI M, ALBRECHT M, COLLATZ J, DUBSKY V, ENTLING MH, NAJAR-RODRIGUEZ AJ, JACOT K (2016): Tailored flower strips promote natural enemy biodiversity and pest control in potato crops. *J Appl Ecol* **53** (4): 1169–1176. DOI: 10.1111/1365-2664.12653.
- TSCHUMI M, ALBRECHT M, ENTLING MH, JACOT K (2015): High effectiveness of tailored flower strips in reducing pests and crop plant damage. *Proceedings. Biological Sciences* **282** (1814). DOI: 10.1098/rspb.2015.1369.
- TSONKOVA P, MIRCK J, BÖHM C, FÜTZ B (2018): Addressing farmer-perceptions and legal constraints to promote agroforestry in Germany. *Agroforestry Systems* **92**(4): 1091-1103.
- TSUDA M, WATANABE K.N, OHSAWA R (2019): Regulatory Status of Genome-Edited Organisms Under the Japanese Cartagena Act. *Front. Bioeng. Biotechnol.* **7**: 387. DOI:10.3389/fbioe.2019.00387.
- UBA (2018): Klärschlammentsorgung in der Bundesrepublik Deutschland. Umweltbundesamt UN (2017): A/RES/71/313.
- UNKEL K, KRAUSE D, SPRINK TH, HARTUNG F, WILHELM R (2020): Mapping of plant SynBio developments in the agri-food sector. *EFS3* **17** (3). DOI: 10.2903/sp.efsa.2020.EN-1687.
- USDA-APHIS, Biotechnology Regulatory Service (2018): Regulatory Status of a Geneome Edited Tomato Variety. Letter to University of Florida.
- USTUN A, ALLEN FL, ENGLISH BC (2001): Genetic Progress in Soybean of the U.S. Midsouth. *Crop Sci.* **41** (4): 993–998. DOI: 10.2135/cropsci2001.414993x.
- VAN DE WOUW M, KIK C, VAN HINTUM T, VAN TREUREN R, VISSER B (2010): Genetic erosion in crops: concept, research results and challenges. *Plant Genet. Res.* **8** (1): 1–15. DOI: 10.1017/S1479262109990062.
- VAN DE WOUW M, VAN HINTUM T, KIK C, VAN TREUREN R, VISSER B (2010): Genetic diversity trends in twentieth century crop cultivars: a meta analysis. *TAG. Theoretical and applied genetics. Theoretische und angewandte Genetik* **120** (6): 1241–1252. DOI: 10.1007/s00122-009-1252-6.
- van Lammerts Bueren ET, Jones S, Tamm L, Murphy KM, Myers JR, Leifert C, Messmer MM (2011): The need to breed crop varieties suitable for organic farming, using wheat, tomato and broccoli as examples: A review. *NJAS: Wageningen Journal of Life Sciences* **58** (3-4): 193–205. DOI: 10.1016/j.njas.2010.04.001.
- VAN RUN PCJ, WÄCKERS FL (2016): Nectar accessibility determines fitness, flower choice and abundance of hoverflies that provide natural pest control. *J Appl Ecol* **53** (3): 925–933. DOI: 10.1111/1365-2664.12605.
- VAN SCHIE CCN, TAKKEN FLW (2014): Susceptibility genes 101: how to be a good host. *Annual Review of Phytopathology* **52**: 551–581. DOI: 10.1146/annurev-phyto-102313-045854.
- VAN TASSEL DL, TESDELL O, SCHLAUTMAN B, RUBIN MJ, DEHAAN LR, CREWS TE, STREIT KRUG A (2020): New Food Crop Domestication in the Age of Gene Editing: Genetic, Agronomic and Cultural Change Remain Coevolutionarily Entangled. *Frontiers in Plant Science* **11**: 789. DOI: 10.3389/fpls.2020.00789.
- VASIL V, CASTILLO AM, FROMM ME, VASIL IK (1992): Herbicide resistant fertile transgenic wheat plants obtained by microprojectile bombardment of regenerable embryogenic callus. *Bio/technology* **10**(6): 667-674.

- VENUS TJ, DILLEN K, PUNT MJ, WESSELER JHH (2017): The Costs of Coexistence Measures for Genetically Modified Maize in Germany. *J Agric Econ* **68** (2): 407–426. DOI: 10.1111/1477-9552.12178.
- VDLUFA (2018): Phosphordüngung nach Bodenuntersuchung und Pflanzenbedarf. Standpunkt, 11 S. https://www.vdlufa.de/Dokumente/Veroeffentlichungen/Standpunkte/2018_Standpunkt_P-Duengung.pdf (abgerufen am 16.04.2021)
- Voss-Fels KP, Stahl A, Wittkop B, Lichthardt C, Nagler S, Rose T et al. (2019): Breeding improves wheat productivity under contrasting agrochemical input levels. *Nature Plants* **5** (7): 706–714. DOI: 10.1038/s41477-019-0445-5.
- WALLACE JG, RODGERS-MELNICK E, BUCKLER ES (2018): On the Road to Breeding 4.0: Unraveling the Good, the Bad, and the Boring of Crop Quantitative Genomics. *Annual Review of Genetics* **52**: 421–444. DOI: 10.1146/annurev-genet-120116-024846.
- WANG W, Hu B, YUAN D, LIU Y, CHE R et al. (2018) Expression of the Nitrate Transporter Gene OsNRT1.1A/OsNPF6.3 Confers High Yield and Early Maturation in Rice. *Plant Cell* **30**(3):638-651. doi: 10.1105/tpc.17.00809
- WANG B, RANJAN R, KHOT LR, PETERS RT (2020): Smartphone Application-Enabled Apple Fruit Surface Temperature Monitoring Tool for In-Field and Real-Time Sunburn Susceptibility Prediction. *Sensors* **20** (3). DOI: 10.3390/s20030608.
- WANG F, WANG C, LIU P, LEI C, HAO W, GAO Y et al. (2016): Enhanced Rice Blast Resistance by CRISPR/Cas9-Targeted Mutagenesis of the ERF Transcription Factor Gene OsERF922. *PloS one* **11** (4): e0154027. DOI: 10.1371/journal.pone.0154027.
- Wang X, Li L, Ding Y, Xu J, Wang Y, Zhu Y et al. (2021): Adaptation of winter wheat varieties and irrigation patterns under future climate change conditions in Northern China. *Agricultural Water Management* **243**: 106409. DOI: 10.1016/j.agwat.2020.106409.
- WANG X, Tu M, WANG D, Liu J, Li Y, Li Z et al. (2018): CRISPR/Cas9-mediated efficient targeted mutagenesis in grape in the first generation. *Plant Biotechnology Journal* **16** (4): 844–855.
- Wang Y, Bealth M, Chalifoux M, Ying J, Uchacz T, Sarvas C et al. (2009): Shoot-specific down-regulation of protein farnesyltransferase (alpha-subunit) for yield protection against drought in canola. *Molecular Plant* **2** (1): 191–200. DOI: 10.1093/mp/ssn088.
- WANG Y, CHENG X, SHAN Q, ZHANG Y, LIU J, GAO C, QIU, JL (2014): Simultaneous editing of three homoeoalleles in hexaploid bread wheat confers heritable resistance to powdery mildew. *Nature Biotechnology* **32** (9): 947–951. DOI: 10.1038/nbt.2969.
- WANG Y, WU WH (2015): Genetic approaches for improvement of the crop potassium acquisition and utilization efficiency. *Current opinion in plant biology* 25, S. 46–52. DOI: 10.1016/j.pbi.2015.04.007.
- WEDGER MJ, PUSADEE T, WONGTAMEE A, OLSEN KM (2019): Discordant Patterns of Introgression Suggest Historical Gene Flow into Thai Weedy Rice from Domesticated and Wild Relatives. *The Journal of Heredity* **110** (5): 601–609. DOI: 10.1093/jhered/esz030.
- WEGENER JK, URSO LM, VON HÖRSTENN D, HEGEWALD H, MINßEN TF, SCHATTENBERG J et al. (2019): Spot farming an alternative for future plant production. Journal of Cultivated Plants, Bd. 71 (4) Themenheft Neue Pflanzenbausysteme. DOI: 10.5073/JfK.2019.04.02.
- WEHLING P, SCHOLZ M, RUGE-WEHLING B, HACKAUF B, FRESE L (2017): Anpassung landwirtschaftlicher Kulturarten an den Klimawandel Optionen aus Sicht der Züchtungsforschung: Verlag Eugen Ulmer.
- Wehner G, Kopahnke D, Richter K, Kecke S, Schikora A, Ordon F (2019): Priming Is a Suitable Strategy to Enhance Resistance Towards Leaf Rust in Barley. *Phytobiomes Journal* **3** (1): 46–51. DOI: 10.1094/PBIOMES-09-18-0041-R.

- Wehner G, Schikora A, Ordon F, Will T (2021): Priming negatively affects feeding behaviour and aphid biomass of Rhopalosiphum padi on barley. *Journal of Pest Science* **94**, 1237–1247.
- WESSELER J, KALAITZANDONAKES N (2019): Present and Future EU GMO Policy. In: EU Bioeconomy, Economics and Policies: Volume II, L. Dries, W. Heijman, R. Jongeneel, K. Purnhagen, and J. Wesseler, Eds. Cham: Springer International Publishing, 2019, pp. 245–256. Doi: 10.1007/978-3-030-28642-2_13.
- WESSELER J, POLITIEK H, ZILBERMAN D (2019): The Economics of Regulating New Plant Breeding Technologies Implications for the Bioeconomy Illustrated by a Survey Among Dutch Plant Breeders. *Front Plant Sci* **10**: 1597. DOI: 10.3389/fpls.2019.01597.
- WIEGHAUS A, PRUFER D, GRONOVER CS (2019): Loss of function mutation of the Rapid Alkalinization Factor (RALF1)-like peptide in the dandelion Taraxacum koksaghyz entails a high-biomass taproot phenotype. Plos One **14** (5): e0217454.
- WÖHNER T, EMERIEWEN OF, HÖFER M (2021): Evidence of apple blotch resistance in wild apple germplasm (Malus spp.) accessions. *Eur J Plant Pathol* **159** (2): 441–448. DOI: 10.1007/s10658-020-02156-w.
- WÖHNER T, PINGGERA J, FRITZSCHE E, PEIL A, PINCZINGER D, HANKE MV (2021): Insights into the susceptibility of raspberries to Drosophila suzukii oviposition. *J Appl Entomol* **145** (3): 182–190. DOI: 10.1111/jen.12839.
- WORRALL EA, BRAVO-CAZAR A, NILON AT, FLETCHER SJ, ROBINSON KE, CARR JP, MITTER N (2019): Exogenous Application of RNAi-Inducing Double-Stranded RNA Inhibits Aphid-Mediated Transmission of a Plant Virus. *Front Plant Sci* 10: 265. DOI: 10.3389/fpls.2019.00265.
- Wu D, Wang P, Jiang C, Yang J, Huo Z, Yu Q (2019): Measured Phenology Response of Unchanged Crop Varieties to Long-Term Historical Climate Change. *Int. J. Plant Prod.* **13** (1): 47–58. DOI: 10.1007/s42106-018-0033-z.
- Wu X, Aravecchia S, Lottes P, Stachniss C, Pradalier C (2020): Robotic weed control using automated weed and crop classification. *J. Field Robotics* **37** (2): 322–340. DOI: 10.1002/rob.21938.
- XIE L, ZHAO H (2019): Sustainable Agriculture and Climate Change. Farooq M and Pisante M (eds.): Innovations in Sustainable Agriculture. Springer Nature. S. 441–468.
- XU J, HUA K, LANG Z (2019): Genome editing for horticultural crop improvement. *Horticulture Research* **6**: 113. DOI: 10.1038/s41438-019-0196-5.
- XUE C, SCHULTE AUF'M ERLEY G, RÜCKER S, KOEHLER P, OBENAUF U, MÜHLING KH, (2016): Late nitrogen application increased protein concentration but not baking quality of wheat. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 2016, 000, 1–11.
- YAN S, REN BY, SHEN J (2021): Nanoparticle-mediated double-stranded RNA delivery system: A promising approach for sustainable pest management. *Insect Science* **28** (1): 21–34. DOI: 10.1111/1744-7917.12822.
- YAN W, CHEN GH, YANG LF, GAI JY, ZHU YL (2014): Overexpression of the rice phosphate transporter gene OsPT6 enhances tolerance to low phosphorus stress in vegetable soybean. *Scientia Horticulturae* **177**: 71–76. DOI: 10.1016/j.scienta.2014.07.037.
- YANG X, CUSHMAN JC, BORLAND AM, LIU Q (2020): Editorial: Systems Biology and Synthetic Biology in Relation to Drought Tolerance or Avoidance in Plants. *Front Plant Sci* **11**: 394. DOI: 10.3389/fpls.2020.00394.
- YANG Z, SINCLAIR TR., ZHU M, MESSINA CD, COOPER M, HAMMER GL (2012): Temperature effect on transpiration response of maize plants to vapour pressure deficit. *Environmental and Experimental Botany* **78**: 157–162. DOI: 10.1016/j.envexpbot.2011.12.034.

- YEY, YUAN J, CHANG X, YANG M, ZHANG L, LU K, LIAN X (2015): The Phosphate Transporter Gene OsPht1,4 Is Involved in Phosphate Homeostasis in Rice. *PloS one* **10** (5), e0126186. DOI: 10.1371/journal.pone.0126186.
- Yin X, Anand A, Quick P, Bandyopadhyay A (2019): Editing a Stomatal Developmental Gene in Rice with CRISPR/Cpf1. *Methods in Molecular Biology* **1917**: 257–268. DOI: 10.1007/978-1-4939-8991-1_19.
- YIN X, BISWAL AK, DIONORA J, PERDIGON KM, BALAHADIA CP, MAZUMDAR S et al. (2017): CRISPR-Cas9 and CRISPR-Cpf1 mediated targeting of a stomatal developmental gene EPFL9 in rice. *Plant Cell Reports* **36** (5): 745–757. DOI: 10.1007/s00299-017-2118-z.
- YOST M, SORENSEN B, CREECH E, ALLEN N, LARSEN R, RAMIREZ R, RANSOM C, REID C, GALE J, KITCHEN B (2019): Defense against drought. Agriculture, Extension, Utah State University.
- Yu H, Lin T, Meng X, Du H, Zhang J, Liu G et al. (2021): A route to de novo domestication of wild allotetraploid rice. *Cell* **184** (5), 1156-1170.e14. DOI: 10.1016/j.cell.2021.01.013.
- ZAMANI-NOOR N, RODEMANN B (2018): Reducing the build-up of Plasmodiophora brassicae inoculum by early management of oilseed rape volunteers. *Plant Pathol* **67** (2): 426–432. DOI: 10.1111/ppa.12732.
- Zeller AK, Zeller YI, Gerhards R (2021): A long-term study of crop rotations, herbicide strategies and tillage practices: Effects on Alopecurus myosuroides Huds. Abundance and contribution margins of the cropping systems. *Crop Protection* **145**: 105613. DOI: 10.1016/j.cropro.2021.105613.
- ZETZSCHE H, SERFLING A, ORDON F (2019): Breeding Progress in Seedling Resistance against Various Races of Stripe and Leaf Rust in European Bread Wheat. *Crop Breed Genet Genom.* **1** (2). DOI: 10.20900/cbgg20190021.
- ZETZSCHE H, FRIEDT W, ORDON F (2020): Breeding progress for pathogen resistance is a second major driver for yield increase in German winter wheat at contrasting N levels. *Scientific Reports* **10** (1): 20374. DOI: 10.1038/s41598-020-77200-0.
- ZHAI Y, CAI S, HU L, YANG Y, AMOO O, FAN C, ZHOU Y (2019): CRISPR/Cas9-mediated genome editing reveals differences in the contribution of INDEHISCENT homologues to pod shatter resistance in Brassica napus L. *Theoretical and Applied Genetics* **132** (7): 2111–2123. DOI: 10.1007/s00122-019-03341-0.
- ZHANG A, LIU Y, WANG F, LIT, CHEN Z, KONG D et al. (2019): Enhanced rice salinity tolerance via CRISPR/Cas9-targeted mutagenesis of the OsRR22 gene. *Molecular breeding : new strategies in plant improvement* **39**. DOI: 10.1007/s11032-019-0954-y.
- ZHANG J, ZHANG, H, LI S, LI J, YAN L, XIA L. (2021): Increasing yield potential through manipulating of an ARE1 ortholog related to nitrogen use efficiency in wheat by CRISPR/Cas9. Journal of Integrative Plant Biology, epub, doi: 10.1111/jipb.13151
- ZHANG J, ZHANG H, LI S, LI J, YAN L, XIA L (2021): Increasing yield potential through manipulating of an ARE1 ortholog related to nitrogen use efficiency in wheat by CRISPR/Cas9. *Journal of Integrative Plant Biology* **00**: 1–15. DOI: 10.1111/jipb.13151.
- ZHANG Z, GE X, Luo X, WANG P, FAN Q, Hu G et al. (2018): Simultaneous Editing of Two Copies of Gh14-3-3d Confers Enhanced Transgene-Clean Plant Defense Against Verticillium dahliae in Allotetraploid Upland Cotton. *Front Plant Sci* **9**: 842. DOI: 10.3389/fpls.2018.00842.
- ZHENG G, FAN C, DI S, WANG X, XIANG C, PANG Y (2017): Over-Expression of Arabidopsis EDT1 Gene Confers Drought Tolerance in Alfalfa (Medicago sativa L.). *Front Plant Sci* **8**: 2125. DOI: 10.3389/fpls.2017.02125.
- ZHONG L, CHEN D, MIN D, LI W, XU Z, ZHOU Y et al. (2015): AtTGA4, a bZIP transcription factor, confers drought resistance by enhancing nitrate transport and assimilation in Arabidopsis thaliana. *Biochemical and Biophysical Research Communications* **457** (3): 433–439. DOI: 10.1016/j.bbrc.2015.01.009.

- ZHOU J, XIN X, HE Y, CHEN H, LI Q, TANG X et al., (2019): Multiplex QTL editing of grain-related genes improves yield in elite rice varieties. *Plant Cell Reports* **38** (4): 475–485. DOI: 10.1007/s00299-018-2340-3.
- ZIMMER S, HAASE T, PIEPHO HP, STOLL E, HEIDT H, BOHN T, HEB J (2016): Evaluation of grain legume cropping systems for animal fodder potential and impacts on subsequent wheat yield under less favourable soil conditions in organic agriculture in Luxembourg. *Journal of Cultivated Plants* **68**: 164-174, DOI: 10.5073/JFK.2016.06.02.
- ZSÖGÖN A, ZERMÁK T, NAVES ER, NOTINI MM, EDEL KH, WEINL S et al. (2018): De novo domestication of wild tomato using genome editing. *Nature Biotechnology* **36**: 1211. DOI: 10.1038/nbt.4272.
- ZWERGER P, AUGUSTIN B, BECKER J, DIETRICH C, FORSTER R, GEHRING K et al. (2017): Integriertes Unkrautmanagement zur Vermeidung von Herbizidresistenz: Verlag Eugen Ulmer.

"Berichte aus der Biologischen Bundesanstalt für Land- und Forstwirtschaft" erscheinen seit 1995 in zwangloser Folge

Seit 2008 werden sie unter neuem Namen weitergeführt:

"Berichte aus dem Julius Kühn-Institut"

Heft 192, 2017	9th Young Scientists Meeting 2017, 6th – 7th November in Siebeldingen - Abstracts -, 2017, 80 S.
Heft 193, 2018	Sekundäre Pflanzenstoffe – Rohstoffe, Verarbeitung und biologische Wirksamkeiten, 52. Vortragstagung, 2018, 65 S.
Heft 194, 2018	Netz Vergleichsbetriebe Pflanzenschutz, Zwei-Jahresbericht 2015 und 2016, Analyse der Ergebnisse der Jahre 2007 bis 2016. Bearbeitet von/ Compiled by: Silke Dachbrodt-Saaydeh, Jörg Sellmann, Jörn Strassemeyer, Jürgen Schwarz, Bettina Klocke, Sandra Krengel, Hella Kehlenbeck, 2018.
Heft 195, 2018	Abschätzung der Habitatwirkung veränderter Produktionsverfahren auf Indikatorvogelarten der Ackerbaugebiete im Forschungsvorhaben "Maisanbau für hohen Ertrag und biologische Vielfalt" am Beispiel der Feldlerche (<i>Alauda arvensis</i>). Jörg Hoffmann, Udo Wittchen, 2018, 48 S.
Heft 196, 2018	SPISE 7, 7th European Workshop on Standardized Procedure for the Inspection of Sprayers in Europe Athens, Greece, September 26-28, 2018. Bearbeitet von/Compiled by: Paolo Balsari, Hans-Joachim Wehmann, 2018, 302 S.
Heft 197, 2018	Schlussbericht zum Vorhaben Vorkommen und Schadwirkung des <i>Soil-borne wheat mosaic virus</i> (SBWMV) in Winterweizen. Dr. Ute Kastirr, Dr. Angelika Ziegler, 2018, 34 S.
Heft 198, 2018	Schlussbericht zum Vorhaben Monitoring zum Vorkommen bodenbürtiger Viren in Weizen, Triticale und Roggen in den wichtigsten Getreideanbaugebieten Deutschlands. Dr. Ute Kastirr, Dr. Angelika Ziegler, Dr. Annette Niehl, 2018, 58 S.
Heft 199, 2018	NEPTUN-Gemüsebau 2017. Dietmar Roßberg, Martin Hommes, 2018, 42 S.
Heft 200, 2018	11th Young Scientists Meeting 2018, 14th – 16th November in Braunschweig, - Abstracts -, 86 S.
Heft 201, 2018	Schlussbericht zum Vorhaben Untersuchung von Interaktionen zwischen bodenbürtigen Zuckerrübenviren und deren Auswirkung auf die Rizomania. Dr. Ute Kastirr, Dr. Katja Richert-Pöggeler, 2018, 52 S.
Heft 202, 2018	Trial Report – Closed Transfer Systems (CTS). Matthias Kemmerling, Jens Karl Wegener, Dirk Rautmann, Jan-Philip Pohl, Eckhard Immenroth, Dieter von Hörsten, 2018, 52 S.
Heft 203, 2018	Statusbericht Biologischer Pflanzenschutz 2018. Eckhard Koch, Annette Herz, Regina G. Kleespies, Annegret Schmitt, Dietrich Stephan, Johannes A. Jehle, 2018, 126 S.
Heft 204, 2019	2nd International Plant Spectroscopy Conference (IPSC) 2019. Hartwig Schulz, Catharina Blank, Christoph Böttcher, Benjamin Fürstenau, Andrea Krähmer, Torsten Meiners, David Riewe (Eds.), 137 S.
Heft 205, 2019	Auswertung der Anzahl Resistenzklassen von Wirkstoffen für Pflanzenschutzmittelanwendungen - Evaluation of the number of resistance classes of active ingredients for crop protection applications. Frank Jeske, 45 S.
Heft 206, 2019	12th Young Scientists Meeting 2019, 6th – 8th November in Kleinmachnow - Abstracts -, 2019, 56 S.
Heft 207, 2019	Witterung und Ertrag, 2019, 50 S.
Heft 208, 2020	Report on the legal framework governing the use of nutrient rich side streams (NRSS) as biobased fertilisers (BBFs) EU legislation, 2020, 52 S.
Heft 209, 2020	"Indikatoren zur Früherkennung von Nitratfrachten im Ackerbau" – Studie "Messprogramme der Bundesländer und angrenzender EU-Staaten (NL, DK) zum Abgleich des Frühindikatorensystems". Burkhard Stever-Schoo, Anne Ostermann, Oliver Stock, Martin Kücke, Jörg-Michael Greef, 166 S.
Heft 210, 2021	Netz Vergleichsbetriebe Pflanzenschutz Jahresbericht 2017 - Analyse der Ergebnisse der Jahre 2007 bis 2017. Silke Dachbrodt-Saaydeh, Jörg Sellmann, Jörn Strassemeyer, Jürgen Schwarz, Bettina Klocke, Sandra Krengel, Hella Kehlenbeck, 140 S.
Heft 211, 2021	Produktqualität und Konsumentenverhalten im Spannungsfeld von Nachhaltigkeit und Krisen, 54. Jahrestagung DGQ, 23. März 2021, Georg-August-Universität Göttingen, (online-Veranstaltung) - Abstracts -, 42 S.
Heft 212, 2021	Schlussbericht zum Vorhaben: Aufbau, Selektion und Prüfung von Zuchtstämmen der Zitronenmelisse (Melissa officinalis) mit verbesserter Winterhärte, höherer Ertragsleistung und höherem Gehalt an ätherischem Öl (Phase II). Frank Marthe; Ute Kästner, 86 S.
Heft 213, 2021	13th Young Scientists Meeting Conference 2021, 11th – 13th October in Quedlinburg - Abstracts -, 50 S.
Heft 214, 2021	Schlussbericht zum Vorhaben ModEPSKlim – Modellgestützte Gefährdungsabschätzung des Eichenprozessionsspinners im Klimawandel, Dr. Ute Koch, Dr. Regina G. Kleespies, 30 S.

