

position 77

Gentechnik in Landwirtschaft und Naturschutz



Inhalt

1. Präambel	4
2. Zusammenfassung/Abstract	5
3. BUND-Forderungen	9
4. Einleitung	11
5. Gentechnische Veränderung von Pflanzen und Nutztieren – Wo stehen wir heute?	13
5.1 Bisherige Gentechnik	13
5.2 Neue Gentechnik/Genome Editing	15
6. Ökologische und gesundheitliche Risiken der gentechnischen Veränderung bei Pflanzen und Nutztieren	20
6.1 Spezifische Risiken der neuen Gentechnik	20
6.2 Neue Gentechnik – identisch mit herkömmlicher Züchtung?	22
6.3 Effekte gentechnisch veränderter Organismen auf Nichtzielorganismen	22
6.4 Indirekte Effekte (z. B. Herbizidresistenz)	24
6.5 Gentransfer durch Auskreuzung/Ausbreitung	25
6.6 Gesundheit	27
7. Nicht erfüllte Versprechen – weitere Aspekte	30
7.1 Rückblick unerfüllte Versprechen	30
7.2 Sozioökonomische Effekte des Anbaus gentechnisch veränderter Pflanzen	31
7.3 Patente – aktuelle Entwicklungen	33
7.4 Debatte über Nachweisverfahren von GVO	34

8. Blick in weitere Anwendungen	36
8.1 Molecular Farming – Medikamente und tierische Eiweiße aus Pflanzen	36
8.2 „Gene Drives“ zur Ausrottung von Populationen unerwünschter Wildarten	36
8.3 Gentechnik und Naturschutz	37
9. Aktuelle gesetzliche Gentechnik-Regelungen – EU-Debatte zur Deregulierung	40
10. Politische und gesellschaftliche Debatte – Akteure, Verbraucher*innen-Einstellungen, Ethik	42
11. Glossar	46
12. Quellen	47

1. Präambel

Die Welt steht vor immensen ökologischen, gesellschaftlichen und sozialen Aufgaben, die Klima- und Biodiversitätskrise sind die zentralen Herausforderungen. Der BUND sucht und gestaltet dafür Lösungen, die ökologischen und sozialen Kriterien gerecht werden. Als Umwelt- und Naturschutzverband kämpft er insbesondere für die Einhaltung der 1,5 Grad-Obergrenze in der Klimakrise und für Klimagerechtigkeit, für die Beendigung des Artensterbens, und den Schutz und die Wertschätzung von Natur und biologischer Vielfalt. Wir fordern eine tatsächlich nachhaltige, klimafreundliche Ernährung und Landwirtschaft ohne Gentechnik und eine Minderung des Ressourcenverbrauchs. Kampagnen des BUND zielen auf ein Ende der Vermüllung und Vergiftung unserer Umwelt, unter anderem mit Pestiziden, zahllosen Schadstoffen und Mikroplastik. Als Nachhaltigkeitsverband setzt sich der BUND für soziale wie ökologische Gerechtigkeit, Armutsbekämpfung, Menschenrechte und Demokratie ein. Das eine ist ohne das andere nicht zu haben.

Diese Ziele sind nur zu erreichen, wenn nicht nur alle umwelt- und sozialverträglichen Möglichkeiten zur Steigerung der Effizienz bei der Ressourcennutzung ausgeschöpft werden. Zur absoluten Reduzierung unserer Ressourcenentnahme aus der Umwelt brauchen wir außerdem Suffizienz: wir müssen nicht nur anders, sondern auch weniger konsumieren. Eine nachhaltige Änderung der Lebensweise aller Bürger*innen ist neben der individuellen Verantwortung, eine gemeinsame und gesellschaftliche. Zur Förderung des Gemeinwohls brauchen wir mehr Mitwirkungsrechte der Zivilgesellschaft, vor allem aber förderliche politische Rahmenbedingungen. So fordert der BUND seit langem, durch Energiesparen den Endenergieverbrauch mindestens um die Hälfte zu senken, damit der Rest aus erneuerbaren Energien bereitgestellt werden kann – Studien des Umweltbundesamtes geben diesen Forderungen Recht. Sollen die Ausrottung von immer mehr Arten beendet und unsere Naturräume geschützt werden, dann muss endlich der Flächenverbrauch für immer mehr Straßen-, Gewerbe- und Siedlungsflächen beendet und die Landwirtschaft natur- und tierwohlverträglich werden. Der Rohstoffverbrauch muss im Laufe dieses Jahrhunderts drastisch, z. B. um einen Faktor 10 oder mehr, reduziert werden – eine schnelle und massive Absenkung würde helfen, die Klimakrise zu bewältigen, den Biodiversitätsverlust zu stoppen und den kommenden Generationen in allen Ländern gleiche Entwicklungschancen zu ermöglichen. Jede Branche hat dafür ihren Beitrag zu leisten, so auch die Erzeugung von Lebensmitteln, deren Verarbeitung und Vermarktung und der Konsum. So fordert der BUND eine nachhaltige Erzeugung von guten Lebensmitteln für alle Menschen mit der internationalen Verantwortung für Ernährungssouveränität.

Das sind große Herausforderungen, aber es ist machbar. Jedoch wird die Bewältigung dieser Aufgabe unmöglich, wenn die Politik weiterhin dem Wirtschaftswachstum Vorrang vor der Bewahrung unserer Lebensgrundlagen gibt. Wachstumspolitik, ob

erfolgreich oder nicht, ist der Treiber für Schäden an Natur und Umwelt – beispielsweise durch den Ausbau von Infrastruktur mit exzessivem Flächenverbrauch (Flughäfen, Straßen, Flussausbau), die Förderung einer überschussorientierten Landwirtschaft mit viel zu hohem Tierbestand und dem Prinzip Wachsen oder Weichen. Sie fordert und fördert Niedriglohnsektoren, Einkommenspolarisierung und eine globale Raubwirtschaft. Demokratische Entscheidungen und Bürger*innenmitsprache werden durch Beschleunigungsgesetze und die Schwächung von Bürgerbeteiligung eingeschränkt, um die Wachstumsziele nicht zu gefährden.

Die notwendige sozial-ökologische Transformation bietet die Chance zu einem gerechten und weniger durch Egoismen, Konkurrenz und Ausbeutung bestimmten Leben im Einklang mit den begrenzten planetaren Systemen. Wie notwendig eine solche Wende zum guten Leben ist, haben viele Mitbürger*innen erkannt, nicht zuletzt in der Pandemiekrise seit 2020. Viele Arbeitsverhältnisse und Lebensweisen werden sich ändern und ändern müssen, durch neue Technologien ebenso wie durch eine neue, nachhaltige gemeinwohlorientierte Gestaltung für gute Erwerbs- wie Nichterwerbsarbeit. Das erfordert nicht nur neue Berufsbilder und Qualifikationen, sondern auch, dass Status, Bezahlung und soziale Sicherung in vielen Bereichen von Landwirtschaft, Produktion, Dienstleistungen und Verwaltung verbessert werden.

Der BUND steht nicht nur für die ökologische, sondern auch für soziale, institutionelle und ökonomische Nachhaltigkeit – deshalb enthalten unsere Positionen immer auch Ansätze, die zu sozialer Gerechtigkeit, zu guter Arbeit und zu zukunftsfähigem Wirtschaften beitragen. Dabei blickt der BUND immer über den Tellerrand und entwickelt Perspektiven zusammen mit den Partnerorganisationen in unserem internationalen Netzwerk, Friends of the Earth Europe und Friends of the Earth International und anderen Organisationen und Bündnissen der Zivilgesellschaft, wie dem Agrarbündnis. Es gibt Alternativen zu einer Politik, die mit immer höherer Geschwindigkeit in die Sackgasse fährt! Solche Alternativen zeigt der BUND in den BUND-Positionen, die von den Bundesarbeitskreisen und vom Wissenschaftlichen Beirat des BUND erarbeitet sowie vom Bundesvorstand beschlossen werden. In den Bundesarbeitskreisen wird akademische und nichtakademische Expertise und praktisches Wissen zusammengeführt, im wissenschaftlichen Beirat werden die Positionen von Expert*innen aus 20 Themenbereichen gemeinsam geprüft – der BUND praktiziert seit Jahrzehnten das Prinzip der transdisziplinären Wissenschaft. So basieren alle BUND-Positionen auf mehrfach und interdisziplinär geprüften aktuellen wissenschaftlichen Erkenntnissen und zeigen politische und gesellschaftliche Lösungswege auf. Jede dieser Positionen, auch die hier vorliegende, ist ein wichtiger Baustein im Gesamtbild des sozial-ökologischen Umbaus hin zu einer nachhaltigen Wirtschafts- und Lebensweise.

2. Zusammenfassung

Gentechnik, wie sie seit den 1980ern angewendet wurde, erlaubt, artfremdes Erbmateriale in Organismen zu übertragen und so gentechnisch veränderte Organismen (GVO) zu erzeugen. Sie war von Anbeginn begleitet von der Diskussion über ihr Potential und die damit verbundenen Risiken für Umwelt und menschliche Gesundheit – das gilt bis heute und auch für neue Formen der Gentechnik. Gentechnisch veränderte Pflanzen sollten – so das Versprechen der Hersteller-Unternehmen – vielfältige Probleme der Landwirtschaft lösen und zu weniger Pestiziden und besseren Lebensmitteln führen. Die global im Anbau befindlichen gentechnisch veränderten Pflanzen sind zu über 99 Prozent Herbizid-resistent und/oder insekten-resistent, die vielfach angekündigten Superpflanzen sind nicht in Sicht. Die im letzten Jahrzehnt entwickelten neuen gentechnischen Techniken (NGT) – wie CRISPR/Cas9 – treten nun an, nicht eingelöste Versprechen der bisherigen Gentechnik zu erfüllen und darüber hinaus die Anpassung an den Klimawandel zu ermöglichen. Da mit neuer Gentechnik, auch Genom-Editierung genannt, der Ort der gentechnischen Veränderung präziser zu adressieren ist als mit den bisherigen Methoden, soll die Nutzung der neuen GMO mit weniger Risiken für Mensch und Umwelt verbunden sein. Gentechnik-spezifische Regelungen, wie sie in der EU gelten, werden deshalb von interessierter Seite für NGT als nicht erforderlich dargestellt.

Die neuen Gentechnikverfahren beruhen im Wesentlichen auf der Nutzung spezifischer Nukleasen, die die DNA an bestimmten Stellen schneiden. Über die zelleigene Reparatur der DNA werden Veränderungen erzeugt, die zum knock-out (Funktionsverlust) von Genen führen können oder unter bestimmten Bedingungen (z. B. Vorliegen homologer DNA-Sequenzen) eine DNA-Sequenz reparieren bzw. neue Gene einfügen können. Doch ein präziseres Adressieren des Genomortes bedeutet nicht zwingend, dass die entstehende gentechnische Veränderung ohne Risiko ist. Unerwartete Effekte am Zielort der Veränderung (on-target) und an anderen Stellen des Genoms (off-target) wurden vielfach beschrieben. Möglich ist die Bildung veränderter Proteine und Produkte, die den Pflanzenstoffwechsel beeinflussen und neue, unbekannt, nicht selten unerwünschte Eigenschaften mit sich bringen.

Organismen mit neuen Eigenschaftskombinationen, wie sie bislang nicht möglich waren, sollen entstehen. Parallel zum fortgesetzten Anbau von Herbizid-resistenten und insekten-resistenten GMO werden weltweit zahlreiche Forschungsprojekte der neuen Gentechnik mit einer Vielzahl von Pflanzenarten verfolgt. Neben den bekannten Ackerpflanzen geht es auch um Gemüse und zunehmend um Obstbäume, Zierpflanzen und Bäume bis hin zu Wildpflanzen. Die angestrebten Eigenschaften reichen von der sattsam bekannten Herbizid- und Insektenresistenz über Ertragssteigerung, Resistenz bzw. Toleranz gegen biotische (Pathogene) und abiotische (Hitze, Trockenheit etc.) Stressfaktoren bis zu höherer Lebensmit-

telqualität und veränderter Blütenfarbe bei Blumen. Hinzu kommen Vorschläge, (neue) Gentechnik auch im Bereich des Naturschutzes einzusetzen. Die gentechnische Veränderung von Tieren, z. B. Fischen, rückt stärker ins Blickfeld: Die Anpassung an nicht-tiergerechte Haltungsbedingungen und rascheres Wachstum ist meist das Ziel.

Die mit GMO und ihren neuen Eigenschaften möglicherweise verbundenen Risiken für Umwelt und Gesundheit sind vielfältig – unabhängig davon, ob sie mit neuen oder bisher bekannten Verfahren erzeugt wurden. Neu ist, dass es einfacher scheint, mehrere Eigenschaften gleichzeitig zu verändern (Multiplexing), was die Risikoabschätzung erheblich erschwert. Negative Auswirkungen des Anbaus Herbizid-resistenter Pflanzen sind lange bekannt: Der Herbizideinsatz steigt massiv, die Artenvielfalt geht weiter zurück und Rückstände in Lebens- und Futtermitteln gefährden die menschliche und tierische Gesundheit. Insektenresistente Pflanzen begünstigen das Auftreten resistenter Schadinsekten, was regelmäßig mit weiterer gentechnischer Aufrüstung und Insektizideinsatz beantwortet wird. Zu möglichen Umwelt- und Gesundheitseffekten stress-toleranter Pflanzen oder solcher mit neuen Inhaltsstoffen fehlen hingegen häufig Daten. Könnten sich beispielsweise GMO mit neuen, die Fitness steigernden Eigenschaften mit höherer Wahrscheinlichkeit ausbreiten oder könnten veränderte Inhaltsstoffe die Verträglichkeit von Lebensmitteln beeinflussen?

Gentransfer lässt sich im Freiland, das zeigt die Erfahrung mit bisherigen GMO, nicht verhindern. Je mehr Pflanzenarten der gentechnischen Veränderung zugänglich werden, darunter auch solche, die langlebig sind, Verwandte unter Wildarten haben und sich über große Entfernungen auskreuzen und verbreiten können, desto größer ist das Risiko für unerwartete und unerwünschte Effekte auf die Umwelt. Denn die möglichen Interaktionen zwischen einer Vielzahl von GMO, die mit den unterschiedlichsten neuen Eigenschaften ausgestattet und in großer Zahl ins Freiland entlassen werden sollen, und allen anderen Organismen in ihrem Umfeld lassen sich nicht vorher-sagen.

Neben ökologischen und gesundheitlichen Effekten ist auch mit unerwünschten sozioökonomischen Effekten eines GMO-Einsatzes zu rechnen. In GMO-Anbauländern des Südens zeigen sich starke negative Wirkungen auf die Agrarstruktur, insbesondere auf Kleinbauern. In der EU konzentriert sich die Debatte vor allem auf die Frage der Koexistenz und der Patente. Koexistenz beinhaltet Regeln zur Sicherung der gentechnikfreien Landwirtschaft und Lebensmittelproduktion, z. B. Reinhaltung von Saatgut, Festlegung von Mindestabständen zwischen GMO- und nicht-GMO-Flächen und Trennung der Produktionsschienen. Haftungsregeln im Falle einer GMO-Kontamination und Einrichtung Gentechnik-freier Regionen sowie

die Durchsetzung des Verursacherprinzips sind essentiell. Die technischen Verfahren zur Erzeugung von GVO sowie die damit erzeugten Produkte (Saatgut, Pflanzen etc.) werden regelmäßig zum Patent angemeldet – und zumeist auch patentiert. Patentierung ist für die Saatgutindustrie ein wichtiges Instrument zur Marktbeherrschung und Marktkonzentration, denn patentiertes Saatgut darf nicht zur Weiterzüchtung und zum Nachbau verwendet werden, wie es für Pflanzen aus herkömmlicher Züchtung gilt. Um Kennzeichnung entlang der Lebensmittelkette, Rückverfolgbarkeit und Monitoring von NGT-Pflanzen und -Produkten zu sichern, sind geeignete Nachweisverfahren zu entwickeln und den EU-Mitgliedstaaten und Marktbeteiligten zur Verfügung zu stellen.

Zusätzlich zur landwirtschaftlichen (bzw. forstlichen) Nutzung von GVO werden weitere Anwendungsgebiete der Gentechnik bei Pflanzen propagiert: Produktion von Medikamenten und tierischen Eiweißen (Molecular Farming), Einsatz von GVO im Naturschutz, etwa zur „Wiedereinführung“ ausgestorbener Arten (De-Extinction) oder auch sogenannte Gene Drives. Letztere sollen zum Aussterben von Populationen (z. B. invasiver Arten) bzw. zum Ersatz natürlicher Populationen durch gentechnisch veränderte führen. Im Gegensatz zur bisherigen GVO-Nutzung, bei der eine Ausbreitung von GVO über das Freisetzungs-/Anbauareal nicht erwünscht ist, wäre beim Gentechnikeinsatz bei Wildpflanzen bzw. im Naturschutz und bei Gene Drives die GVO-Ausbreitung Ziel der Vorhaben. Damit verbundene naturschutzrechtliche und ethische Fragen sind völlig ungeklärt.

Nach Ansicht des BUND müssen die politischen Prozesse auf EU-Ebene dazu führen, dass mit NGT erzeugte Pflanzen und Produkte mindestens denselben Regeln unterworfen werden, wie sie für die bisherige Gentechnik gelten, d. h. Zulassungsverfahren mit Risikoabschätzung für jeden GVO, Kennzeichnung, Monitoring und Rückverfolgbarkeit. Laut Europäischem Gerichtshof würde ein Ausschluss von NGT dem Vorsorgeprinzip zuwiderlaufen, zu dessen Umsetzung die existierende EU-Regelung dient. Dies gilt insbesondere auch aus ökologischer Sicht, denn da die neuen Verfahren die Erzeugung genetisch veränderter Sorten „in einem ungleich größeren Tempo und Ausmaß als bei der Anwendung herkömmlicher Methoden der Mutagenese“¹ ermöglichen, würden sie Ökosysteme weiteren nicht abschätzbaren Risiken aussetzen. Dabei sind agrarökologische Produktionsformen ohne GVO-Nutzung längst etabliert und durchaus erfolgreich. Sie zu stärken und weiterzuentwickeln, ist das Gebot der Stunde.

¹ <https://curia.europa.eu/jcms/upload/docs/application/pdf/2018-07/cp180111de.pdf>

Abstract

Genetic engineering, as used since the 1980s, makes it possible to transfer foreign genetic material into organisms and thus to produce genetically modified organisms (GMOs). From the very beginning, it was accompanied by discussions about its potential and the associated risks to the environment and human health. Genetically modified plants were supposed to solve a variety of problems in agriculture and lead to fewer pesticides and better food. More than 99 percent of the genetically modified plants currently in cultivation worldwide are herbicide-resistant and/or insect-resistant, but the much-heralded super plants are not in sight. By using new genetic engineering techniques (NGT), developed within the last decade and also known as genome editing (e.g. CRISPR/Cas9), the unfulfilled promises of genetic engineering shall now be fulfilled. In addition, adaptation to climate change shall be possible. As, compared to previous methods of genetic engineering, the new methods allow addressing the site of modification more precisely, the use of new GMOs is supposed to be associated with lower risks for humans and the environment. For NGT, genetic engineering-specific regulations, as they apply in the EU, are therefore not considered necessary by interested parties.

New genetic engineering techniques are essentially based on the use of specific nucleases that cut the DNA at specific sites. The cell's own DNA repair processes produce changes that can lead to a so called knock-out (loss of function) of genes. Under certain conditions (e.g. if homologous DNA sequences are present), a DNA sequence can be repaired or new genes can be inserted. However, more precise targeting of the genome locus does not necessarily imply that the resulting genetic modification is without risk. Unexpected effects at the target site (on-target) and at other sites of the genome (off-target) have been described in many cases. Modified proteins and products can be formed, which impact plant metabolism and may lead to new, unknown and often undesirable traits.

Organisms with new and previously not possible combinations of traits may be created. While the cultivation of herbicide-resistant and insect-resistant GMOs continues, numerous NGT projects are being pursued worldwide with a variety of plant species. In addition to the well-known arable plants, the focus is also on vegetables and increasingly on fruit trees, ornamental plants and trees, as well as on wild plants. The desired traits range from the well-known herbicide and insect resistance to increased yield and resistance or tolerance to biotic (pathogens) and abiotic (heat, drought, etc.) stress factors, as well as to higher food quality and altered flower color. To use (new) genetic engineering in nature conservation has been proposed, too. Genetic modification of animals, e.g. fish,

is also suggested with more efficient husbandry and faster growth being the main goals.

Environmental and health risks associated with GMOs and their new traits are manifold – regardless of whether GMOs were produced using new or previously known methods. What is new is that it appears to be easier to modify several traits at the same time (multiplexing), which makes risk assessment considerably more difficult. The negative effects of cultivating herbicide-resistant plants have long been known: While herbicide use is increasing heavily, biodiversity continues to decline and residues in food and feed endanger human and animal health. Insect-resistant plants favor the evolution of insect pests resistant to them, which is regularly followed by additional genetic engineering and use of insecticides. With regards to possible environmental and health effects of new GMOs being stress-tolerant or having new ingredients, however, data is generally lacking. Could, for instance, the probability of unwanted spread of these GMOs increase, if the new traits improve their fitness or could altered ingredients influence the quality of food?

Experience with previous GMOs shows that gene transfer cannot be prevented in the field. The more plant species become accessible to genetic modification, including those that are long-lived, have relatives among wild species and can cross-pollinate and spread over large distances, the greater the risk of unexpected and undesirable effects on the environment, if they would be released or cultivated. This is because it is impossible to predict the potential interactions between the various GMOs equipped with many new traits and potentially released in large numbers, and all other organisms in their environments.

In addition to ecological and health effects, undesirable socio-economic effects must be expected. In GMO-producing countries in the South, strong negative effects on the agricultural structure, especially on small farmers, have been observed. In the EU, the debate focuses primarily on the issue of coexistence and patents. Coexistence includes rules to ensure GMO-free agriculture and food production, such as keeping seeds clean, setting minimum distances between GMO and non-GMO areas, and separating production lines. Liability rules in the event of GMO contamination and the establishment of GMO-free regions as well as enforcement of the polluter pays-principle are essential. The technical processes to produce GMOs and the products derived from them (seeds, plants, etc.) are regularly registered for patents – and are in most cases patented. For the seed industry, patenting

is an important instrument for market dominance and market concentration, as patented seeds must not be used for further breeding and reproduction as it is possible for plants from conventional breeding. To ensure labeling along the food chain, traceability and monitoring of NGT plants and products, suitable verification procedures must be developed and made available to EU member states and market participants.

In addition to the agricultural (or forestry) use of GMOs, other areas of application for genetic engineering of plants are being propagated: Production of medicines and animal proteins (molecular farming), use of GMOs in nature conservation, for example to reintroduce extinct species (de-extinction) or so-called gene drives. The latter are intended to lead to the extinction of populations (e.g. invasive species) or the replacement of natural populations with genetically modified ones. In contrast to previous GMO use, where the spread of GMOs beyond the area of release/cultivation is not desired, the use of genetic engineering in wild plants or in nature conservation and gene drives would be aimed at the spread of GMOs. Nature conservation and ethical issues linked to such endeavors are completely unresolved.

BUND is of the opinion, that for NGT plants and products the political processes at EU level must lead to at least the same rules that apply to previously existing genetic engineering and that require approval processes including risk assessment case by case, labeling, monitoring and traceability. According to the European Court of Justice, an exclusion of NGT would run counter to the precautionary principle, which the existing EU regulation on genetic engineering serves to implement. This is particularly true from an ecological point of view, as the new methods enable the production of genetically modified organisms "at a much greater speed and to a much greater extent than with the use of conventional methods of mutagenesis"² and would expose ecosystems to further incalculable risks. In contrast, agroecological forms of production without the use of GMOs have long been established and are quite successful. Strengthening and further developing them is the order of the day.

² <https://curia.europa.eu/jcms/upload/docs/application/pdf/2018-07/cp180111de.pdf>

3. BUND-Forderungen

Der BUND lehnt den Einsatz gentechnisch veränderter Organismen (GVO) und von durch synthetische Biologie hervorbrachten Organismen in der Umwelt ab. Um zu befürchtende ökologische Schäden zu vermeiden, sind im Falle von GVO-Freisetzen oder -Anbau gesetzliche Regelungen zwingend. Diese müssen sorgfältige Zulassungsverfahren mit Einzelfallrisikoprüfung, Kennzeichnung und Rückverfolgbarkeit vorschreiben und die ökologisch und konventionell gentechnikfrei wirtschaftende Land- und Lebensmittelwirtschaft absichern.

Dies gilt für Agrarflächen, sowie für natürliche Ökosysteme und Naturräume, die vermehrt in den Fokus einer gentechnischen Anwendung geraten. Der BUND fordert die Umsteuerung der Landwirtschaft zu ökologischerem Anbau und agrarökologischen Methoden.

MINDESTFORDERUNGEN IN DIESEM ZUSAMMENHANG LAUTEN:

- **Das Vorsorgeprinzip muss für alle GVO, auch für Pflanzen, deren Genom durch neue gentechnische Techniken verändert wurde, ohne Abstriche gelten.**
- **Auch neue gentechnische Verfahren müssen im Rahmen der Freisetzungsrichtlinie gesetzlich reguliert bleiben.** Die Vorgaben der Freisetzungsrichtlinie zur Genehmigungspflicht mit umfassender Risikobewertung, Rückverfolgbarkeit und Kennzeichnung der GVO und daraus hergestellter Lebens- und Futtermittel sowie die Erfassung in einem öffentlich zugänglichen Standortregister sind beizubehalten. Dies gibt das EuGH-Urteil vom Juli 2018 vor.
- **Verbesserung der Zulassungsprüfung und Risikoabschätzung von GVO.** Statt einer Aufweichung des Gentechnik-Regulierungsrahmens ist eine deutliche Ausweitung der Risikobewertung für GVO – alt und neu – erforderlich. Seit Jahren werden auf EU-Ebene GVO zugelassen, gegen die es erhebliche ökologische Bedenken gibt, die jedoch in der Prüfung kaum berücksichtigt werden. Die neue Gentechnik beinhaltet zudem spezifische Risiken, die bislang nicht berücksichtigt werden. Sie ermöglicht umfassendere und raschere Veränderungen als die bisherige Gentechnik. Dabei geht bislang nur ein geringer Anteil der EU-Ausgaben im Bereich Gentechnik in die Risikoforschung.³
- **Sicherstellung der Kennzeichnung und Rückverfolgbarkeit, Entwicklung von Nachweisverfahren.** Die Entwicklung von Nachweisverfahren für neue GVO und daraus hergestellte Lebens- und Futtermittel wurde sträflich vernachlässigt, wohingegen erhebliche öffentliche Mittel in die Anwendungsforschung mit neuen GVO fließen. Bundesregierung und EU-Kommission sind dringend aufgefordert, hier nachzusteuern und dafür zu sorgen, dass die Sicherstellung von Nachweisen ein vergleichbares Gewicht bekommt.
- **Verbesserung der Kennzeichnungsregeln für GVO-Futter- und Lebensmittel (incl. tierische Produkte), Nulltoleranz nicht zugelassener GVO in Lebensmitteln und Saatgut wahren.** Produkte von Tieren, die mit gentechnisch veränderten Futterpflanzen gefüttert wurden, müssen endlich gekennzeichnet werden. Dazu ist eine Änderung des EU-Rechts notwendig, für die sich Deutschland einsetzen muss. An der Nulltoleranz für nicht zugelassene GVO-Bestandteile in Lebensmitteln sowie an der Saatgutreinheit darf nicht gerüttelt werden. Dem Bestreben von GVO-Produzenten, Schwellenwerte für nicht zugelassene GVO einzuführen, ist ein Riegel vorzuschieben.
- **Keine Freisetzung von GVO in Naturräume und Ökosysteme.** Ist schon in landwirtschaftlichen Systemen die Kontrollierbarkeit von GVO kaum möglich (Gentransfer, Auskreuzung, Durchwuchs, Saatgutverunreinigung etc.), so gilt dies umso mehr für Ökosysteme und Naturräume. Ein einmal freigesetzter GVO oder ein bestimmtes Genkonstrukt, das sich im Genpool einer Wildart ausgebreitet hat, muss als nicht-rückholbar gelten. Natürliche Populationen sind vor gentechnischen Veränderungen zu schützen, ihre Evolution durch natürliche Einflüsse ist zu erhalten. Der BUND fordert den konsequenten Schutz von Ökosystemen und setzt auf deren natürlich entstandene Resilienz beim Auftreten neuartiger Stressoren.
- **Keine Freisetzung von Gene Drive-Organismen.** Deutschland muss sich international für ein Verbot der Freisetzung von Gene-Drive-Organismen stark machen.
- **Förderung ökologischer Innovationen.** Gentechnik ist keine Antwort auf die drängenden Nachhaltigkeitsprobleme der Landwirtschaft. Gebot der Stunde ist hingegen die massive Förderung der Agrarwende und ökologischer Innovationen, z. B. Stärkung der Agrarökologie, Verbot von Pestiziden, Ausbau des Ökoanbaus, ökologische Saatgutzüchtung, verbesserter Schutz der Biodiversität etc. (vgl. BUND-Position Landwirtschaft⁴). Das gilt für deutsche und europäische Forschungs- und Förderprogramme gleichermaßen.
- **Keine Patentierung von Pflanzen – und keine Patentierung herkömmlich gezüchteter Pflanzen durch die Hintertür.** Der

³ https://www.martin-haeusling.eu/images/Written_question_on_risk_research.pdf

⁴ https://www.bund.net/fileadmin/user_upload_bund/publikationen/landwirtschaft/bund_positionen_Landwirtschaft_2022.pdf

Zugang zu biologischer Vielfalt und pflanzen genetischen Ressourcen, die für die weitere Züchtung benötigt werden, darf durch Patente nicht kontrolliert, behindert oder blockiert werden. Die EU muss sich zudem endlich für die Umsetzung des Patentierungs-Verbots für konventionell gezüchtete Pflanzen einsetzen.

4. Einleitung

„All technologies respond to regulation. What qualifies them for regulation is not a narrative about whether parts of them look like what happens in nature. It's the fact that they can be used at a scale, or in a place, or in a timescale that could result in harm.“⁵

Seit es in den siebziger Jahren des 20. Jahrhunderts erstmals gelang, artfremdes Erbmaterial in Organismen zu übertragen und so gentechnisch veränderte Organismen (GVO) zu erzeugen, wird über Gentechnik und ihr Potential, aber auch über die damit verbundenen Risiken für Umwelt und menschliche Gesundheit diskutiert. Denn die Verfahren der gentechnischen Veränderung wie auch die neuen Eigenschaften können unerwünschte Effekte mit sich bringen. Grundsätzlich lassen sich mit den gentechnischen Verfahren Zellen aller Organismenarten verändern, von Mikroorganismen über Pflanzen bis zu Tieren reichend. In der medizinischen Forschung spielt zudem die gentechnische Veränderung menschlicher Zellen eine große Rolle.

Besonders im Blick der Öffentlichkeit steht jedoch die gentechnische Veränderung von Pflanzen, die zu besseren Eigenschaften und mehr Ertrag führen soll. Neben den Fragen nach den damit verbundenen Risiken für Mensch und Umwelt wirft der Einsatz von Agrogentechnik aufgrund damit verbundener Änderungen der Landnutzung, wie dem vermehrten Einsatz von Totalherbiziden (Pflanzenvernichtungsmittel) und der Möglichkeit der Patentierung, auch Fragen für Landwirtschaft und Lebensmittelproduktion auf.

Der Versprechen gab es viele: 1995 wurde in den USA die erste gentechnisch veränderte Pflanze, die sogenannte Anti-Matsch-Tomate, angebaut. Sie sollte, da länger haltbar, am Stock ausreifen dürfen und deshalb besser schmecken. Erfolg war ihr nicht beschieden, sie verschwand nach kurzer Zeit vom Markt. Die nächsten Produkte waren Pflanzen mit Resistenzen gegen Herbizide oder Insekten. Bekanntestes Beispiel ist die in den USA erstmals 1996 angebaute Roundup-Ready Sojabohne. Diese von der Firma Monsanto entwickelte gentechnisch veränderte Sojabohne (gerne auch RR-Soja genannt) ist resistent gegen das firmeneigene Breitbandherbizid Glyphosat bzw. dessen bekanntestes Handelsprodukt Roundup. Die Zulassung weiterer Glyphosat-resistenter Nutzpflanzen wie Mais, Baumwolle, Raps, Zuckerrüben und Luzerne folgte, allen voran in den USA, aber auch in Ländern wie Kanada, Argentinien und Brasilien. Herbizid-resistente GVO dürfen in der EU nicht ange-

baut werden, sie werden jedoch in großen Mengen importiert, vor allem für Futtermittel und Agrokraftstoffe.

Parallel wurden mittels Gentechnik Pflanzen entwickelt, die eine Resistenz gegen Schadinsekten tragen. In Europa erlangte der 1998 zugelassene MON810 Mais eine gewisse Berühmtheit, ist er doch der einzige GVO, der in der EU eine Anbauzulassung hat. MON810 Mais wurde zunächst in diversen Mitgliedstaaten angebaut, darunter Deutschland, später wurde jedoch sein Anbau in der Mehrzahl der Mitgliedstaaten verboten. Gründe hierfür waren vor allem Risiken für die Umwelt sowie Fragen der Koexistenz des GVO-Anbaus mit GVO-freiem Anbau, wie etwa dem ökologischen Anbau. 2022 wurde MON810 Mais nur noch in Spanien und Portugal auf insgesamt 69.910 ha angebaut (EFSA 2024).

Die intensive Debatte über Chancen und Risiken der Agrogentechnik führte letztlich zu gesetzlichen Regelungen auf EU-Ebene. Die auf dem Vorsorgeprinzip gründende Freisetzungsrichtlinie von 2001 (2001/18/EG⁶) und ihre Folgeverordnungen schreiben für Anbau und Import gentechnisch veränderter Pflanzen ein Zulassungsverfahren mit Umweltrisikoprüfung, Monitoring, Rückverfolgbarkeit und Kennzeichnung der daraus erzeugten Lebens- und Futtermittel vor. Damit schlug die EU im Umgang mit der Agrogentechnik einen anderen Pfad ein als beispielsweise die USA, die kein kohärentes Regelwerk haben und auch keine gesetzlich gesicherten Kennzeichnungsregeln für gentechnisch erzeugte Lebensmittel kennen.

In den letzten Jahren wurden neue gentechnische Verfahren entwickelt, die den Ort der gentechnischen Veränderung präziser als mit bisheriger Gentechnik möglich bestimmen sollen und denen ein größeres Potential bei geringeren Risiken zugeschrieben wird. Die als Genome Editing oder gezielte Mutagenese bezeichneten Verfahren, am bekanntesten ist das CRISPR/Cas-System – Clustered Regularly Interspaced Short Palindromic Repeats/Cas (Cas steht für CRISPR-associated), sollen zu den seit langem versprochenen neuen, maßgeschneiderten Eigenschaften bei Pflanzen (und Tieren) führen. Befürworter*innen führen an, es ließen sich so höhere Erträge erzielen, krankheitsresistente Pflanzen und bessere Lebensmittel erzeugen sowie Pflanzen an den Klimawandel anpassen. Deshalb solle die neue Gentechnik massiv gefördert und gleichzeitig die Akzeptanz für Agrogentechnik in der Öffentlichkeit erhöht werden. Da die neuen Verfahren präziser und sicherer seien als die der alten Gentechnik, seien viele

⁵ <https://gmwatch.org/en/106-news/latest-news/20369>

(Alle Technologien reagieren auf Regulierung. Was sie für eine Regulierung qualifiziert, ist nicht die Erzählung darüber, ob Teile von ihnen dem ähneln, was in der Natur passiert. Es ist die Tatsache, dass sie in einem Ausmaß, an einem Ort oder in einer Zeitspanne eingesetzt werden können, die zu Schäden führen könnten.)

⁶ <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/LSU/?uri=CELEX:32001L0018>

existierende gesetzliche Regelungen im Gentechnikbereich überflüssig. Die EU-Kommission hat sich diese Interpretation zu eigen gemacht und im Juli 2023 die Deregulierung des EU-Gentechnikrechts für einen Großteil der mit neuer Gentechnik erzeugten Pflanzen und daraus hergestellten Lebens- und Futtermittel vorgeschlagen. Im Frühjahr 2024 schloss sich das Europaparlament (EP) diesem Vorschlag weitgehend an. Im Trilog mit den Mitgliedstaaten soll über die endgültige Regelung verhandelt werden.

Die vorliegende BUND-Position befasst sich vorrangig mit der gentechnischen Veränderung von Pflanzen und den damit verbundenen Risiken für Ökosysteme und menschliche Gesundheit wie auch mit ihren Auswirkungen auf bäuerliche Landwirtschaft, Biobetriebe und Verbraucherschutz. Die aktuelle politische und gesellschaftliche Debatte über die gesetzlichen Regelungen in der EU wird dargestellt. Der Gentechnik-Einsatz bei Nutztieren wird kurz gestreift.

Medizinische Anwendungen der Gentechnik werden hingegen nicht behandelt. Sie berühren ein weiteres sehr umfangreiches Feld und unterliegen zudem anderen Regelwerken.

Diese Position befasst sich auch nicht mit gentechnischen Veränderungen bei Mikroorganismen, die als Produktionsorganismen dienen, denn ihre Behandlung würde den Rahmen dieser Position sprengen. Zu erwarten ist allerdings, dass gentechnisch veränderte Mikroorganismen vermehrt in den Fokus der Gentechnikindustrie gelangen werden, sollen sie doch nicht nur wie bisher in geschlossenen Systemen, sondern trotz erheblicher zu erwartender Risiken direkt im Freiland eingesetzt werden.⁷ Angesichts der großen Hoffnungen des Agrarsektors auf neue Geschäfte mit gentechnisch veränderten Mikroorganismen⁸ wurde in der EU schon eine Deregulierung ins Gespräch gebracht: Das EP beschloss im Februar 2024, dass Kenntnisse bezüglich Mikroorganismen mit Blick auf künftige gesetzliche Initiativen zu überprüfen seien (Erwägungsgrund 9) und dass die Kommission einen entsprechenden Bericht vorlegen solle.⁹ Bislang gelten dafür jedoch noch eigene Regelungen.

Aspekte, die künftig ebenfalls zu behandeln sind, betreffen den Einsatz künstlicher Intelligenz im Rahmen gentechnischer Verfahren (Farooq et al. 2024) sowie den Einsatz sogenannter RNAi-Pestizide (Fletcher et al. 2020). Mit Hilfe von RNAi-Pestiziden (RNAi steht für RNA-Interferenz) sollen wichtige Gene von Schadinsekten stillgelegt werden, damit sie Nutzpflanzen nicht mehr schädigen können.

⁷ <https://foe.org/resources/ge-soil-microbes/>

⁸ <https://grain.org/en/article/7175-corporate-bioinputs-agribusiness-s-new-toxic-trap>

⁹ https://www.europarl.europa.eu/doceo/document/TA-9-2024-0067_EN.pdf

5. Gentechnische Veränderung von Pflanzen und Nutztieren – Wo stehen wir heute?

5.1 BISHERIGE GENTECHNIK

Die inzwischen gerne als klassische Gentechnik bezeichneten Verfahren der gentechnischen Veränderung von Organismen beinhalten die Übertragung von Erbmaterial (DNA¹⁰) eines Spenderorganismus in einen Empfängerorganismus, der in der Regel einer anderen Art angehört. Der entstehende gentechnisch veränderte Organismus (GVO), auch als transgen bezeichnet, kann Pflanze, Tier oder Mikroorganismus sein, wobei die zu übertragenden DNA-Sequenzen (Transgene) kombiniert und aus beliebigen Spenderorganismen stammen können. Auf diese Weise können Gensequenzen über Artgrenzen hinweg übertragen und Eigenschaften aus nicht verwandten Arten in Empfängerorganismen ausgeprägt werden.

Das übertragene Erbmaterial besteht in der Regel aus einem oder mehreren Genen und weiteren Elementen (z. B. Promotoren), die für die Expression der Transgene im Empfänger verantwortlich sind: Mit ihrer Hilfe lässt sich beispielsweise steuern, in welchem Gewebe, in welcher Entwicklungsphase und wie stark die neue genetische Information abgelesen und umgesetzt wird. Um die vergleichsweise wenigen transgenen Zellen einfacher isolieren zu können, werden in der Regel in die Transgen-Konstrukte zusätzlich Markergene eingefügt, die eine Resistenz gegen Antibiotika oder Herbizide vermitteln.

Gentechnisch veränderte Pflanzen

Diese Transgenkassetten werden in Pflanzen zumeist mit Hilfe des Bodenbakteriums *Agrobacterium tumefaciens* eingeführt oder mit Hilfe der sogenannten ballistischen Transformation (auch Partikelbeschuss genannt). Hierbei macht man sich die Fähigkeit von *Agrobacterium tumefaciens*, Teile seiner DNA in Pflanzenzellen zu übertragen, zunutze, indem man die Transgene zunächst in Bakterien einbaut und die Pflanzenzellen anschließend mit den gentechnisch veränderten Bakterien inkubiert. Alternativ können mit DNA-Konstrukten beladene Metallkügelchen in Pflanzenzellen hineingeschossen werden. Die Medien enthalten die entsprechenden Antibiotika oder Herbizide, sodass sich nur die gentechnisch veränderten resistenten Zellen vermehren können. Diese werden dann unter Zugabe von Pflanzenhormonen zu Pflanzen regeneriert.

Die Antibiotika-Resistenzgene bleiben in den GVO erhalten, sind aber jenseits der Selektion nicht erforderlich. Da jedoch ein horizontaler Gentransfer von gentechnisch veränderten

Pflanzen auf Bakterien nicht auszuschließen ist und Bakterien (in Böden, Gewässern oder Darmtrakten) dadurch zusätzliche Antibiotika-Resistenzgene aufnehmen könnten (Nielsen et al. 1998), wurde die Präsenz dieser Gene in GVO kritisch diskutiert. Die Empfehlung lautet, dass Gene, die Resistenzen gegen in der Human- und Tiermedizin eingesetzte Antibiotika vermitteln, nicht eingesetzt werden sollten (van den Eede et al. 2004).

Die Integration der durch *Agrobacterium tumefaciens* oder Partikelbeschuss eingeführten DNA-Sequenzen im pflanzlichen Erbmaterial erfolgt nach dem Zufallsprinzip. Bei diesem Prozess lässt sich nicht steuern, wie viele Kopien der Transgenkassette ganz oder partiell und an welchen Stellen integriert werden und wie sich die Integrationsorte verändern. Jeder GVO ist folglich einzigartig, ein sogenanntes Event mit seinen Besonderheiten wie den jeweiligen Einbauorten und integrierten Transgensequenzen. Eingebaute Transgene können die Sequenz pflanzeigener Strukturgene unterbrechen und damit die Bildung des jeweiligen Genproduktes (Proteins) beeinflussen. Sind Steuerungselemente betroffen, ist das Genprodukt vielleicht noch zu bilden, jedoch kann die Genexpression verändert sein, d. h. wieviel des Proteins zu welchem Zeitpunkt in welchem Gewebe gebildet wird. Neben den erwünschten neuen Eigenschaften der GVO können so auch unerwünschte Eigenschaften entstehen. Unerwartete Effekte wurden bei der bisherigen Gentechnik häufig beobachtet (Wilson et al. 2006, Mertens 2008, Wilson 2021).

Aus der Reihe der gentechnisch veränderten Pflanzen (Transformanten) werden für die weitere Entwicklung dann diejenigen ausgewählt, die dem Ziel der Transformation am nächsten kommen (und die geringsten unerwarteten Effekte zeigen). Dies drückt sich in der jeweiligen Bezeichnung der gentechnisch veränderten Pflanzenlinien aus, Beispiele sind der insektenresistente MON810 Mais, der Glyphosat-resistente Mais NK603 und die Glyphosat-resistente Soja MON40-3-2.

Die Risiken der Gentechnik entstehen aber nicht nur durch die Zufallsprozesse und Unwägbarkeiten der gentechnischen Veränderung an sich, sondern auch durch Effekte der neu in Pflanzen gebildeten Eigenschaften auf die Umwelt und die Gesundheit. Auch erwünschte Eigenschaften können zu unerwünschten Effekten führen, wie das Beispiel der insektenre-

¹⁰ DNA: Abkürzung für deoxyribonucleic acid/Desoxyribonukleinsäure

sistenten GVO zeigt, bei denen neben den Schadinsekten auch zahlreiche andere Insekten getroffen werden. Bei den meisten dieser GVO führen die aus dem Bakterium *Bacillus thuringiensis* stammenden Gene zur Bildung von insektoxischen Proteinen (Bt-Toxine). Aufgrund entsprechender wissenschaftlicher Daten wurde auch das Anbauverbot für den MON810 Mais im Jahr 2009 in Deutschland v. a. mit der Gefährdung der Artenvielfalt begründet.¹¹

Wirkungen, die mit einer veränderten Anbaupraxis etwa bei Herbizid-resistenten Pflanzen zusammenhängen (z. B. mehr Breitbandherbizide), sind zwar indirekt, jedoch keinesfalls zu vernachlässigen, können sie doch sehr umfangreich sein, wie die Erfahrung in den GVO-Anbauländern zeigt (Schütte et al. 2017). Hinzu kommen die ungelösten Probleme der Auskreuzung der Transgene auf Pflanzen der gleichen oder verwandter Arten und die Frage, wieweit die sogenannte Koexistenz zwischen Anbauformen mit und ohne GVO langfristig überhaupt zu sichern ist. Betroffen ist hier insbesondere der biologische Anbau, der aufgrund der EU-Bioverordnung (Art. 11 der VO (EU) 2018/848) und der Vorgaben der Bio-Anbauverbände keine Gentechnik einsetzt, aber auch die wachsende Gruppe der mit dem Siegel Ohne GenTechnik zertifizierten Betriebe.

Mit bisheriger Gentechnik sollten – laut Herstellerversprechen – Pflanzen entwickelt werden, die ertragreicher sind, bessere Lebensmittel liefern und bei deren Anbau weniger Pestizide einzusetzen seien. Von den zahlreich versprochenen neuen Eigenschaften finden sich auf dem Acker jedoch im Wesentlichen zwei: Herbizidresistenz und Insektenresistenz. Dies gilt für nahe 100 Prozent der angebauten GVO. 88 % der global auf ca. 190 Millionen Hektar angebauten GVO sind resistent gegen ein oder mehrere Herbizide, teils kombiniert mit Insektenresistenz, 12 % der GVO sind insektenresistent, wobei sie häufig mehr als ein Resistenzgen tragen.¹² Im Wesentlichen handelt es sich dabei um die sogenannten cash crops Soja, Mais, Baumwolle und Raps, die insbesondere in den USA, Brasilien, Argentinien, Kanada und Indien angebaut werden. Zusammen kommen diese Länder auf 91 Prozent der globalen GVO-Anbaufläche. GVO anderer Kulturarten und andere gentechnisch vermittelte Eigenschaften wie etwa Virusresistenz (z. B. bei der Papaya) spielen eine sehr untergeordnete Rolle.

Die intensive Debatte in der europäischen Öffentlichkeit über Notwendigkeit und Risiken der Gentechnik hat dazu beigetragen, dass der GVO-Anbau in der EU eher begrenzt blieb. Der

1998 zum Anbau zugelassene insektenresistente MON810 Mais ist weiterhin der einzige in der EU angebaute GVO (vornehmlich in Spanien); in Deutschland und mehr als der Hälfte der EU-Länder ist sein Anbau untersagt. Dessen ungeachtet erhielten in den letzten Jahren viele GVO die EU-Zulassung zum Import als Lebens- und Futtermittel.¹³ Die Zulassungen wurden regelmäßig von der EU-Kommission erteilt, obwohl sich unter den Mitgliedstaaten weder dafür noch dagegen eine qualifizierte Mehrheit fand.

Zulassungsverfahren und Kennzeichnungsregeln für Freisetzung und Inverkehrbringen von gentechnisch veränderten Pflanzen und daraus hergestellten Lebens- und Futtermitteln sind im EU-Gentechnikrecht verankert, vor allem in der Freisetzungsrichtlinie 2001/18/EG und der Verordnung 1829/2003/EG.¹⁴ Seit 2015 haben die Mitgliedstaaten die Möglichkeit – und die Mehrheit nutzte sie, um den GVO-Anbau auf Ihren Territorien ganz oder teilweise zu verbieten (sogenanntes opt-out gemäß Richtlinie EU/2015/412). Dieses auf dem Vorsorgeprinzip gründende Regelwerk steht für die neuen Gentechnikverfahren auf dem Prüfstand: Der von der EU-Kommission im Juli 2023 vorgelegte Vorschlag zum Abbau der EU-Vorschriften für Zulassungsprüfung, Kennzeichnung, Monitoring und Rückverfolgbarkeit von mit neuer Gentechnik erzeugten Pflanzen und Produkten daraus wird aktuell auf EU-Ebene verhandelt.

Gentechnisch veränderte Tiere

Die gentechnische Veränderung von Tieren wurde ebenfalls stark propagiert, sie etablierte sich allerdings im Wesentlichen im Forschungsbereich und hier vor allem bei Mäusen und Ratten. Anwendungen, die auf Freisetzungen in die Umwelt bzw. kommerzielle Anwendungen zielen, betreffen neben Fischen auch Insekten und Nutztiere.¹⁵ Die gentechnische Veränderung von Tieren macht andere Verfahren erforderlich als die von Pflanzen, da Embryonen verändert werden müssen, um transgene Tiere zu erhalten, und diese sind bei Säugern nicht ohne weiteres zugänglich. In den letzten Jahrzehnten entwickelte Techniken zur in-vitro Fertilisation und Einpflanzung der veränderten Embryonen in Ammenmütter spielen hier eine wichtige Rolle. DNA-Konstrukte werden zumeist mit Hilfe direkter Mikroinjektion in die Vorkerne der befruchteten Eizellen eingeführt, es können aber auch mit Fremd-DNA behandelte Spermien zur Befruchtung eingesetzt werden sowie Klonierungsverfahren wie bei Dolly, dem Schaf (Shakweer et al. 2023). Bei Tieren wie Insekten oder Fischen, deren Eizellen leicht zugänglich sind, sind Mikroinjektionen die Methode der Wahl. Auch hier unter-

¹¹ <https://www.keine-gentechnik.de/dossiers/mais-mon810>

¹² <https://www.isaaa.org/resources/publications/briefs/55/executivesummary/default.asp>

¹³ <https://webgate.ec.europa.eu/dyna2/gm-register/>

¹⁴ https://food.ec.europa.eu/plants/genetically-modified-organisms/gmo-authorisation_en

¹⁵ <https://gentechfrei.ch/de/themen/nutztiere/3070-tierstudie>

liegt die Integration der Transgene Zufallsprozessen, lässt sich also nicht steuern. Die bereits erwähnten Technik-immanenten Risiken gelten weiter.

Die Ziele der gentechnischen Veränderung sind sehr vielfältig. Bei Säugern reichen sie von Antworten auf Forschungsfragen (vor allem Mäuse und Ratten) über veränderte Milchzusammensetzung, Hitzetoleranz und höhere Wachstumsraten bei Rindern bis zur Krankheitsresistenz bei Schweinen¹⁶ und vielem mehr (Wheeler 2013). Auch medizinische Nutzungen werden diskutiert, hier insbesondere die Xenotransplantation von Schweineorganen auf den Menschen (und Primaten). Da mit starken Abstoßungsreaktionen zu rechnen ist, müssten Schweinezellen, -gewebe und -organe gentechnisch verändert (sprich: an den Menschen angepasst) sein. Das Vorhandensein endogener Schweine-Retroviren (porzine endogene Retroviren, PERV), die beim Menschen Erkrankungen auslösen könnten, stellt jedoch eine weitere Hürde dar, die mit zusätzlichen Veränderungen via Genom-Editierung überwunden werden soll (Rodrigues Costa et al. 2023). Die Idee, in der Milch transgener Nutztiere medizinisch relevante Substanzen, z. B. die antimikrobiellen Proteine Lactoferrin und Lysozym, produzieren zu lassen, wird schon länger verfochten (Velandar et al. 1997, Cooper et al. 2015). Bislang gibt es jedoch kaum kommerziell einsetzbare medizinische Produkte aus transgenen Nutztieren, denn Humanproteine lassen sich einfacher und billiger aus Zellkulturen in Fermentern gewinnen.¹⁷

Die Enthornung von Rindern ist ein weiteres Ziel der Gentechnik: Die Eigenschaft „hornlos“ sollte mittels neuer Gentechnik in Milchviehrassen eingeführt werden. Nicht durch den Antragsteller, sondern durch Aufsichtsbehörden der USA wurde jedoch festgestellt, dass auch Antibiotikaresistenzgen-Sequenzen eingebaut wurden (Norris et al. 2019), was die bereits geplante Vermarktung zur Weiterzüchtung dieser hornlosen Rinder stoppte.

Anders ist die Situation bei Fischen: Nach jahrelangen Verfahren wurde in den USA und Kanada transgener Lachs der Firma Aquabounty zugelassen, der wesentlich rascher wachsen und so die Verzehrrife in etwa der Hälfte der Zeit erreichen soll. Er erhielt ein Wachstumsgen aus einer anderen Lachsart, das unter der Kontrolle einer Regelungseinheit steht, die zur permanenten Produktion des Wachstumshormons führt.¹⁸ Um ein Entweichen der transgenen Lachse in maritime Systeme zu vermeiden, sollen die Eier in Becken im Inland produziert und

dann zur Entwicklung aus Kanada nach Panama gebracht werden. Denn entwichene transgene Lachse könnten die neuen Eigenschaften durch Kreuzung mit ihren wilden Artgenossen in Wildpopulationen eintragen und diese gefährden (Benessia & Barbiero 2015). Weitere transgene Fische (z. B. Rote Meerbrassen) sind in Japan zugelassen.¹⁹ In Norwegen wurde 2023 die Freisetzung von mit neuer Gentechnik veränderten Lachsen beantragt: Für die Entwicklung der Fortpflanzungsorgane wichtige Gene wurden ausgeschaltet, um so Sterilität zu erzeugen, die eine Ausbreitung in die Umwelt begrenzen soll.²⁰ Die Risikobewertung norwegischer Wissenschaftler*innen kommt jedoch zu einem negativen Ergebnis (Hindar et al. 2023). Die gentechnische Veränderung macht auch vor Zierfischen nicht halt: Zebrafische, die in verschiedenen Farben leuchten, entkamen in Brasilien aus Fischfarmen und vermehren sich offenbar in Bächen in atlantischen Wäldern (Moutinho 2022). Der Import all dieser transgenen Tiere in die EU ist nicht erlaubt.

Gentechnik soll, mit Blick auf eine agronomische Nutzung, künftig auch eine wichtige Rolle bei Insekten, z. B. Schadinsekten, spielen. Gentechnisch veränderte Varianten werden von der Firma Oxitec (mit Bayer als internationalem Partner) unter dem Label Friendly™ insects als „precision-based pest suppression system that is safe, environmentally-friendly and self-limiting“ angepriesen.²¹ Es geht dabei vor allem um Schadschmetterlinge, die inzwischen Resistenzen gegen Bt-Toxine entwickelt haben, z. B. den Herbst-Heerwurm. Sie sollen mittels gentechnisch veränderter Männchen bekämpft werden, die im Labor produziert und regelmäßig freigesetzt, nach Paarung mit Wildtypweibchen ein Letalgene an die Nachkommenschaft weitergeben. So lasse sich die Zahl der Schadinsekten reduzieren. In Brasilien fanden erste Freisetzungsversuche statt – mit unklarem Ergebnis.²² Bienen selbst gentechnisch zu verändern, scheint aktuell nicht prioritär zu sein, wohl aber gibt es Projekte zur Veränderung von Darmbakterien, die Bienen besser vor Varroa-Milben (Leonard et al. 2020) bzw. dem Nosema-Pilz (Huang et al. 2023) schützen sollen.

5.2 NEUE GENTECHNIK/GENOME EDITING

Mit neuer Gentechnik sollen sich genetische Sequenzen mit Hilfe von Endonukleasen (DNA-spaltenden Enzymen), die DNA an bestimmten Erkennungssequenzen schneiden (englisch: site-directed nucleases), verändern lassen (Hilscher et al. 2016). Die Bezeichnung Genome Editing ist Ausdruck der Hoffnung und des Versprechens von Forscher*innen, diese Änderungen würden präzise erfolgen – wie die Änderung eines

¹⁶ https://foe.org/wp-content/uploads/2019/09/FOE_GManimalsReport_ExecSumm_web.pdf

¹⁷ <https://gentechfrei.ch/de/themen/nutztiere/3070-tierstudie>

¹⁸ <https://aquabounty.com/our-salmon>; <https://biofortified.org/2019/03/12/gmo-salmon-approved/>

¹⁹ <https://www.testbiotech.org/gentechnik-grenzen/crispr-meerbrasse/basistext>

²⁰ <https://www.testbiotech.org/aktuelles/lachs-aus-neuer-gentechnik-diskussion-ueber-umweltrisiken>

²¹ <https://www.oxitec.com/en/food-sustainability> (präzises Unterdrückungssystem für Schadinsekten, das sicher, umweltfreundlich und selbstlimitierend ist)

²² <https://infogm.org/en/brazil-gmo-insects-to-the-rescue-of-bt-corn/>

Textes. Dass dieses Bild verkürzt ist und der komplexen Wirklichkeit von Organismen nicht gerecht wird, zeigen zahlreiche Forschungsergebnisse zu unerwünschten und nicht vorhergesehenen Effekten der gentechnischen Veränderungen.

Voraussetzung für den Einsatz der Endonukleasen ist, dass die entsprechenden DNA-Sequenzen bekannt sind. Zelleigene, von außen nicht steuerbare Reparatursysteme reparieren die entstandenen Doppelstrangbrüche der DNA nach dem Zufallsprinzip. Die häufigste Form der Reparatur wird als Non-Homologous End Joining (NHEJ, nicht-homologe Endverknüpfung) bezeichnet. Dabei können Veränderungen (Mutationen) der DNA-Sequenz entstehen, indem an der Schnittstelle z. B. falsche Basen oder kleinere Sequenzen eingefügt werden oder auch verloren gehen (sogenannte indels: insertions, deletions). Dadurch können – in jedem Einzelfall unterschiedlich – die Leseraster der betroffenen Gene verändert werden, was zum Ausschalten der Genfunktion führen kann (knock-out), aber auch zur Veränderung des Genprodukts. Ein weiteres Reparatursystem, HDR (Homology-Directed Repair, von Sequenzhomologie abhängige Reparatur), nimmt in der Zelle vorliegende DNA-Sequenzen als Vorlage für die Reparatur. Da HDR nur in einer bestimmten Phase des Zellzyklus erfolgt, werden die meisten DNA-Schäden durch die nicht-homologe Endverknüpfung (NHEJ) repariert.

Ältere Verfahren wie TALEN (Transcription Activator-Like Effector Nuclease) und ZNF (Zinc-Finger Nuclease) nutzen Proteine, die bestimmte DNA-Sequenzen erkennen und schneiden können (Townsend et al. 2009). Da diese Verfahren aufwendig sind, wurden sie nicht sehr breit eingesetzt. Mutationen an gezielten Stellen sollen auch mit ODM (Oligonucleotide-Directed Mutagenesis) entstehen, indem kurze, synthetisch hergestellte einzelsträngige DNA-Abschnitte (Oligonucleotide), die bis auf kleine Abweichungen komplementär zu bestimmten DNA-Sequenzen sind, in die Zellen eingebracht werden. Die entsprechenden zellulären Vorgänge sind allerdings nicht im Einzelnen verstanden. Der Herbizid-resistente Raps der Firma Cibus soll so entstanden sein.

Das inzwischen vorherrschende Verfahren der neuen Gentechnik ist CRISPR/Cas – **C**lustered **R**egularly **I**nterspaced **S**hort **P**alindromic **R**epeats/**C**as (Cas steht für CRISPR-associated). Es stammt aus Bakterien und dient dort der Abwehr gegen eindringende Viren.²³ Solche Abwehrsysteme kommen in vielen Bakteriengattungen vor (Nishimasu und Nureki 2017). Das am häufigsten genutzte CRISPR/Cas-System ist CRISPR/Cas9 aus dem Bakterium *Streptococcus pyogenes*. Die Wissenschaftlerinnen Doudna und Charpentier (2014) erkannten, dass es auch als molekularbiologische Methode in verschiedenen

Organismen angewandt werden kann und erhielten hierfür 2020 den Nobel-Preis für Chemie. Das System lässt sich vergleichsweise leicht an neue Ziele und Organismen anpassen. Diese Flexibilität hat zu einer beispiellosen Ausweitung der Anwendung geführt (Broothaerts et al. 2021).

Funktionsweise von CRISPR/Cas9

CRISPR/Cas9-Systeme bestehen aus RNA-Protein-Komplexen, die mit Hilfe einer synthetischen RNA (guide RNA) spezifische DNA-Sequenzen erkennen und mit der Nuklease Cas9 die DNA schneiden. Über die guide RNA wird das Cas-Protein an die sequenzmäßig passende gewünschte Stelle der DNA geleitet und in Position gebracht. Dort schneidet die Nuklease den DNA-Doppelstrang, sofern direkt angrenzend eine spezifische kurze PAM-Sequenz (Protospacer Adjacent Motif) im Genom vorhanden ist. Die zelleigenen Reparatursysteme verknüpfen anschließend die DNA wieder, in der Regel über die nicht-homologe Endverknüpfung (NHEJ). Dieser Prozess, als SDN1 (Site-Directed Nuclease 1) bezeichnet, lässt sich nicht steuern und ist fehlerbehaftet.

Der seltene Fall der DNA-Reparatur mittels HDR, bei dem kurze DNA-Sequenzen als Vorlage genutzt werden, die mit dem Zielbereich der DNA bis auf die gewünschte Veränderung homolog sind, wird als SDN2 (Site-Directed Nuclease 2) bezeichnet. SDN3 (Site-Directed Nuclease 3) beruht ebenfalls auf HDR und beschreibt Verfahren, bei denen größere DNA-Sequenzen mit CRISPR/Cas in die Zelle eingebracht werden. So sollen sich große (auch fremde) Genabschnitte einführen lassen.

Da es vergleichsweise einfach ist, eine zur anvisierten DNA-Sequenz passende RNA zu synthetisieren, wurde die Methode der gentechnischen Veränderung durch CRISPR/Cas rasch in vielen Labors übernommen und auf zahlreiche Organismen ausgeweitet, z. B. Mikroorganismen, tierische und menschliche Zellen und vermehrt auch Pflanzen. Schon nach wenigen Jahren wurden deshalb zum Einsatz von CRISPR/Cas bei Pflanzen fünfmal mehr wissenschaftliche Arbeiten publiziert als zum Einsatz der älteren Verfahren TALEN und ZFN (Modrzejewski et al. 2019). Voraussetzung ist allgemein die Kenntnis der Zielsequenz, die im jeweiligen Organismus verändert werden soll. Dies ist nicht trivial, da insbesondere Pflanzengenome häufig sehr komplex und viele dieser Genome nicht so gut charakterisiert sind wie die der Modellpflanze Ackerschmalwand (*Arabidopsis thaliana*) und wichtiger Kulturpflanzen.

²³ Fragmente aus dem Viren-erbgut werden (in Form eines regelmäßigen Musters sich wiederholender und umgekehrt angeordneter Sequenzen) ins bakterielle Erbgut integriert, um dann in RNA-Schnipsel umgesetzt zu werden. Bei einer wiederkehrenden Infektion können Bakterien mit Hilfe des CRISPR/Cas-Systems das virale Genom erkennen und zerschneiden.

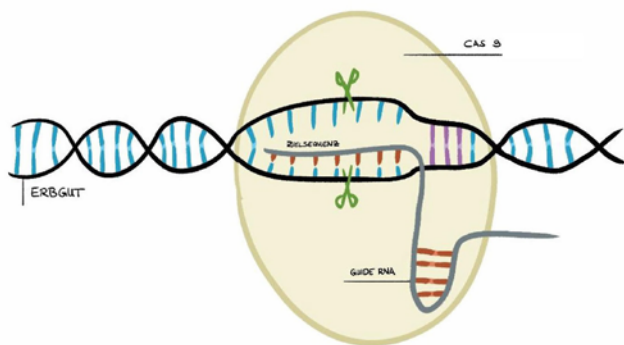


Abb. 1: Schematische Darstellung der Arbeitsweise von CRISPR/Cas: CRISPR/Cas wird durch eine spezifische guide RNA an die Zielsequenz im Erbgut des Zielorganismus geleitet und führt dort einen Doppelstrangbruch ein. In Lila ist die PAM (engl.: protospacer adjacent motif)-Sequenz dargestellt. Sie fungiert als anfängliche Erkennungssequenz für die Genschere. Passt die davor liegende Sequenz zur guide RNA, wird Cas9 aktiv und schneidet dort. (https://fachstelle-gentechnik-umwelt.de/wp-content/uploads/Hintergrundpapier_CRISPRCas_Erklärung_der_Technik.pdf)

Die CRISPR/Cas-Verfahren werden weiterentwickelt: Werden verschiedene guide RNAs eingesetzt, können mehrere Gene gleichzeitig verändert bzw. ausgeschaltet werden – sogenanntes Multiplexing (Li et al. 2017), auch Deletionen definierter Größe (Wada et al. 2020) oder Insertionen sollen sich erzeugen lassen (Pickar-Oliver und Gersbach 2019). Bei Pflanzen, die mehr als zwei Chromosomensätze aufweisen (z. B. Weizen, Kartoffel), lassen sich mehrfach vorhandene Gene (etwa die Gliadin-Gene für Gluten) gleichzeitig verändern; eine starke Reduktion des Gluten-Gehalts soll so erreichbar sein (Sanchez-Leon et al. 2018). Andere Autoren beschreiben den wechselseitigen Austausch ganzer Chromosomenbereiche, etwa bei der Ackerschmalwand (Beying et al. 2020), oder auch eine „Chromosomen-Konstruktion“ (Rönspies et al. 2021). Der Austausch einzelner DNA-Basen wird ebenfalls angestrebt, sogenanntes Base-Editing (BE), um echte Punktmutationen zu erreichen (Mishra et al. 2019). Optimierte und aus anderen Mikroorganismen stammende CRISPR/Cas-Systeme sollen die Anwendung bei Pflanzen vereinfachen oder seltener zu Schnitten an unerwünschter Stelle führen (Wada et al. 2020). Ziel ist auch, mehrere Gene gleichzeitig auszuschalten, z. B. bis zu 12 Gene bei der Ackerschmalwand (Stuttman et al. 2021).

Mit (neuer) Gentechnik veränderte Pflanzenarten

Bereits wenige Jahre nach dem ersten Einsatz von CRISPR/Cas9 bei Pflanzen stieg die Zahl der wissenschaftlichen Studien auf über Tausend an (Modrzejewski et al. 2019). Im Mittelpunkt stand zunächst die Ackerschmalwand (*Arabidopsis thaliana*), nicht zuletzt begründet darin, dass ihr Genom sequenziert und gut erforscht ist. Später aber wurden nahezu alle wichtigen Kulturpflanzen erfasst, begünstigt durch die fortschreitende Sequenzierung vieler pflanzlicher Genome. Besonders viele Projekte befassen sich mit den Getreidear-

ten Reis, Mais, Weizen und Gerste (Ahmar et al. 2023), wie auch mit Tabak, Tomate und Soja. Doch auch Kartoffel, Raps, Klee, Baumwolle und diverse Obst- und Gemüsearten werden mittels CRISPR/Cas gentechnisch verändert. Zierpflanzen, v. a. Blumen, und Wildpflanzen wie Algen und Moose sowie Bäume werden ebenfalls genannt (Erpen-Dalla Corte et al. 2019). Der Einsatz von CRISPR/Cas erstreckt sich bereits auf 45 Pflanzengattungen (Mitglieder von 24 Familien) – und künftig wohl noch auf erheblich mehr, darunter polyploide Arten, die mehr als zwei Chromosomensätze aufweisen (Shan et al. 2020), oder auf Gehölze (Pak & Li 2022).

Die Tomate spielt eine wichtige Rolle, da sie gentechnisch einfach zu bearbeiten ist und eine große ökonomische Bedeutung hat. In Japan wurden 2021 Tomaten mit höherem Gehalt an GABA (γ -Aminobuttersäure, die Blutdruck-senkend wirken soll) zunächst kostenlos verteilt und später dann verkauft (Waltz 2021). Besonderes Potential wird der neuen Gentechnik bei Pflanzen für den Gartenbau (Li et al. 2020) und Arten mit vegetativer Vermehrung wie Kartoffel, Wein, Apfel oder Erdbeere zugeschrieben, da sich langwierige Kreuzungsvorgänge umgehen ließen (Nadakuduti et al. 2018). Mit dem Ziel der Kommerzialisierung werden aktuell vorwiegend die cash crops Raps, Soja und Mais, Kartoffeln und Weizen bearbeitet (Gelinsky 2024). Die wichtigsten Akteure dabei sind die US-Unternehmen Cibus, Calyxt, Corteva und Simplot. Inzwischen sollen neben der GABA-Tomate weitere vier mit neuer Gentechnik erzeugte Pflanzen auf dem Markt sein (USA) und fünfzehn (v. a. Soja, Raps, Kartoffeln) vor der Markteinführung stehen (Gelinsky 2024). Neuerdings werden auch Forschungsansätze zur gentechnischen Veränderung wild lebender Organismen und sogar geschützter Arten verfolgt, etwa, um sie gegen Stressoren widerstandsfähiger zu machen.²⁴ Eine von der EU-Kommission in Auftrag gegebene Studie zum Marktpotential der neuen Gentechnik kam 2021 zum Schluss, dass der allergrößte Teil der Projekte bei Pflanzen in einem frühen bis fortgeschrittenen Forschungsstadium sei und sich nur sehr wenige im vorkommerziellen Stadium befänden.²⁵

Neue Eigenschaften?

Die Liste der mittels alter und vor allem neuer Gentechnik angestrebten Eigenschaften wächst ständig, hohe Erwartungen werden geweckt (Gelinsky 2024, Hüdig et al. 2022). Dabei sollen vermehrt Eigenschaften und Pflanzenarten eine Rolle spielen, die für Verbraucher*innen von Interesse sind.²⁶ Die Pflanzen sollen nicht nur tolerant sein gegen diverse Stressfaktoren, höheren Ertrag haben und rascher wachsen und blühen, sondern auch attraktivere Früchte und schönere Blüten mit längerer Haltbarkeit bilden (Erpen-Dalla Corte et al. 2019), eine vereinfachte Ernte wird ebenfalls angestrebt

²⁴ <https://www.bfn.de/publikationen/positionspapier/gentechnik-naturschutz-und-biologische-vielfalt>

²⁵ <https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC123830>

²⁶ https://www.cast-science.org/wp-content/uploads/2024/03/CAST_IP74-Gene-Edited-Crops.pdf

(Gomez Roldan et al. 2017). Das Joint Research Center (JRC) der EU erhob Daten zu marktrelevanten Anwendungen (Parisi & Rodriguez-Cerezo 2021) und aktualisiert die Daten laufend auf seiner interaktiven Seite.²⁷ Danach stehen an erster Stelle Resistenzen gegen Schaderreger, veränderte Inhaltsstoffe sowie höherer Ertrag. Die vielfach genannte Toleranz gegen abiotischen Stress (Hitze, Trockenheit, Nässe etc.) kommt erst an vierter Stelle, gefolgt von Züchtungsmethoden und Herbizid-Resistenz, andere Eigenschaften folgen unter ferner liefen. Nur sehr wenige der Projekte sind in einem fortgeschrittenen Entwicklungsstadium, als kommerziell verwertbar galt die mittels TALEN veränderte „high-oleic low linolenic“ (HOLL) Soja der US-Firma Calyxt.

Beispiele für Resistenzen gegen pilzliche (z. B. echten Mehltau) und bakterielle (z. B. Bakterienbrand) Krankheitserreger von Weizen, Reis, Mais, Kartoffeln, Tomaten, Zitrusfrüchten, Wein, Apfel und Kakao werden in diversen Studien genannt (Wang et al. 2014a, Borrelli et al. 2018, Modrzejewski et al. 2019, Hüdig et al. 2022). Ähnliches gilt für Resistenzen gegen Viren, beispielsweise bei Reis, Gurken, Tabak, Kartoffel, Cassava und Gerste (Zhao et al. 2020).

Bei 9 von 15 gentechnisch veränderten Pflanzen, die angeblich marktreif sind oder demnächst auf den Markt kommen sollen (Gelinsky 2024), geht es um die **Änderung von Inhaltsstoffen**. Die von Calyxt entwickelte und in den USA auf den Markt gebrachte HOLL-Soja²⁸ ist jedoch in der aktuellen Liste nicht mehr enthalten.²⁹ Sie scheint die in sie gesetzten Erwartungen nicht erfüllt zu haben. Zwecks höherer Haltbarkeit und Stabilität des Öls und vereinfachter Verarbeitung wurde bei der HOLL-Soja die Aktivität wichtiger Enzyme verringert bzw. ausgeschaltet (Demorest et al. 2016). Anteile von 80 % an einfach-ungesättigter Ölsäure (oleic acid) und nur noch 10 % mehrfach-ungesättigter Fettsäuren wie Linol- oder Linolensäure (linolenic acid) sollten eine Härtung des Öls erübrigen. Für andere Ölpflanzen wie Leindotter, Raps, Erdnuss und Reis wird weiterhin eine veränderte Fettsäure-Zusammensetzung angestrebt (Modrzejewski et al. 2019, Gelinsky 2024).

Andere Life-style-Produkte sind Champignons (CRISPR/Cas9)³² und Kartoffeln (TALEN)³³, die nicht oder nicht so

Sojaöl hat normalerweise einen Anteil an einfach ungesättigter Ölsäure von 20 % und einen mehr als dreifach so hohen Gehalt an mehrfach ungesättigten Fettsäuren (55 % Linolsäure und 8 % Linolensäure). Der an sich wünschenswerte hohe Gehalt an mehrfach ungesättigten Fettsäuren hat eine geringere Stabilität und Haltbarkeit (v. a. beim Frittieren) zur Folge. Deshalb wird Sojaöl zur Verarbeitung üblicherweise partiell gehärtet, wobei die sogenannten Transfette entstehen. Diese gelten ihrerseits als gesundheitsgefährdend, da sie zu erhöhten Cholesterolverwerten (v. a. des als schlecht bezeichneten LDL – low-density lipoprotein) im Blut beitragen können. In den USA müssen seit 2003 Transfette gekennzeichnet werden³⁰ und in der EU dürfen laut VO 2019/649 Transfette in Lebensmitteln seit 01.04. 2021 nur noch maximal 2 Gramm pro 100 Gramm Fett ausmachen.³¹

schnell braun werden sollen. Sie werden in den USA nicht reguliert („non-regulated article“). Verringerte Bräunung wird auch bei Salat und Bananen verfolgt (Gelinsky 2024). Entwickelt werden zudem samenlose (Klap et al. 2017) und lange haltbare Tomaten (Yu et al. 2017) oder solche mit vorgeblich gesundheitlichem Nutzen wie höheren Gehalten des Antioxidans Lycopin (Li et al. 2018). Die in Japan zunächst an Privatpersonen verteilte GABA-Tomate (Nonaka et al. 2017) wurde später auf den Markt gebracht.³⁴ Sie wird mit gesundheitsbezogener Werbung (z. B. Blutdrucksenkung, besserer Schlaf, gesündere Haut), verkauft. Schwangeren, Stillenden und Kleinkindern wird ihr Verzehr allerdings nicht empfohlen.³⁵

Weitere Projekte befassen sich mit geringeren Schwermetallgehalten beim Reis, weniger toxischen Alkaloiden in Kartoffeln, weniger Phytat in Mais (der Phosphorhaltige Inhaltsstoff Phytat bindet wichtige Mineralstoffe) oder verändertem Weinsäuregehalt in Trauben (Erpen-Dalla Corte et al. 2019, Modrzejewski et al. 2019). Höhere Anteile an Mikronährstoffen wie Eisen oder Zink und Vitaminen (z. B. Vitamin A bzw. Vitamin E)

²⁷ https://datam.jrc.ec.europa.eu/datam/mashup/NEW_GENOMIC_TECHNIQUES/index.html

²⁸ <https://www.isaaa.org/kc/cropbiotechupdate/article/default.asp?ID=18161>

²⁹ <https://www.gmwatch.org/en/news/latest-news/19784>

³⁰ <https://www.fda.gov/regulatory-information/search-fda-guidance-documents/small-entity-compliance-guide-trans-fatty-acids-nutrition-labeling-nutrient-content-claims-and>

³¹ <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:32019R0649>

³² https://www.aphis.usda.gov/biotechnology/downloads/reg_loi/15-321-01_air_inquiry.pdf

³³ https://www.aphis.usda.gov/biotechnology/downloads/reg_loi/16-090-01_air_inquiry_cbidel.pdf

³⁴ <https://sanatech-seed.com/en/221226-2/>

³⁵ <https://www.testbiotech.org/node/3200>

stehen ebenfalls auf der Wunschliste (Kumar et al. 2022). Um Menschen mit Zöliakie (einer entzündlichen Darmerkrankung, die mit einer Überreaktion des Immunsystems auf Gluten in Verbindung steht und ca. 1 % der Bevölkerung betrifft) zu helfen, wird zudem im Labor daran gearbeitet, den Gluten-Gehalt im Weizen zu reduzieren. Ziel dabei: die mehrfach im Weizengenom vorhandenen Gene für Gliadin (Bestandteil des Klebereiweißes Gluten) per Multiplexing gleichzeitig zu verändern. Über eine starke Reduktion des Gluten-Gehalts durch knock-out wurde berichtet (Sanchez-Leon et al. 2018), doch da selbst geringe Mengen von Gluten Krankheitssymptome auslösen können, wären solche Weizenlinien voraussichtlich weiterhin nicht ausreichend sicher für Betroffene.

Pflanzen mit veränderten Inhaltsstoffen, z. B. spezielle Öle, andere Stärkezusammensetzung oder reduzierte Ligningehalte bei Bäumen und anderen Nutzpflanzen, sollen auch industriell nutzbar sein. Im Rahmen der Bioökonomie-Strategie investiert die Bundesregierung von 2020 bis 2024 bis zu 3,5 Milliarden Euro in Zukunftstechnologien,³⁶ wie weit auch die neue Gentechnik damit gemeint ist, ist nicht ersichtlich.

Die gentechnische **Anpassung von Pflanzen an den Klimawandel** und an damit einhergehende abiotische Stressfaktoren wie Hitze, Trockenheit, Nässe oder höherer Salzgehalt im Boden wird seit langem verfolgt, bislang jedoch mit mäßigem Erfolg. CRISPR/Cas9 soll das ändern. Ziel ist insbesondere die Toleranz gegen Trockenheit und/oder gegen hohen Salzgehalt im Boden bei cash crops wie Mais, Reis, Soja und Weizen (Shi et al. 2017, Hüdig et al. 2022). Da die Stresstoleranz jedoch auf einem komplexen Wechselspiel vieler Gene in Reaktion auf Umweltbedingungen beruht und auf verschiedenen Ebenen reguliert wird (Haak et al. 2017), ist nicht damit zu rechnen, dass die Änderung einzelner Gene tatsächlich zum Erfolg führt (ENSSER 2021).

Darüber hinaus gibt es Vorschläge, mit Hilfe von CRISPR/Cas die **Domestizierung von Wildpflanzen** voranzutreiben, denn Wildpflanzen sind – im Vergleich zu Kulturpflanzen – weniger stressanfällig und nicht von Inputs wie Pestiziden und synthetischen Düngern abhängig; sie haben zumeist einen höheren Gehalt an Mikronährstoffen und ein besser entwickeltes Wurzelsystem und sind nicht selten mehrjährig. Gene, denen in diesem Zusammenhang eine Rolle zugeschrieben wird, sollen, je nach Situation, ausgeschaltet, aktiviert oder eingefügt werden (Fernie und Yan 2019). So sollen aus Tomaten-Wildarten binnen kurzem Lycopen-reiche Zuchtformen mit mehr und größeren Früchten entstehen (Zsögön et al. 2018). Da neudomestizierte Wildpflanzen im Phänotyp möglicherweise noch

stark nicht-domestizierten Wildpflanzen ähneln und deshalb für automatische Unkrautbekämpfungssysteme die Unterscheidung von Kultur- und Wildpflanzen schwierig werden könnte, schlagen Correia et al. (2024) vor, die per Gentechnik neu domestizierten Pflanzen noch weiter gentechnisch zu verändern, damit sie einen farblich oder in Blatt- und Wuchsform unterscheidbaren Phänotyp ausprägen.

Eine gentechnisch vermittelte erhöhte Photosynthese-Rate soll höhere CO₂-Gehalte der Luft in mehr Ertrag umsetzen und damit der Hungerbekämpfung dienen³⁷ (South et al. 2019). Ob dies bei den Getreidearten Weizen, Reis und Mais, den Hauptnahrungspflanzen, tatsächlich den Ertrag steigern würde, wird jedoch von Sinclair et al. (2019) bezweifelt, da für den Sameertrag nicht so sehr die Kohlenstoffaufnahme begrenzend ist, sondern vielmehr die Verfügbarkeit von Wasser und Nährstoffen (Stickstoff, Phosphat und Mikronährstoffe).

Herbizidresistenz ist – neben der Insektenresistenz – seit Jahren die vorherrschende gentechnisch erzeugte Eigenschaft. Sie ist mit einer massiven Zunahme der eingesetzten Menge an Herbiziden, einer Reduktion der Artenvielfalt auf und neben den Äckern sowie dem Auftreten zahlreicher Herbizid-resistenter Beikrautarten verbunden (Schütte et al. 2017). So sind inzwischen 59 Glyphosat-resistente Beikrautarten bekannt.³⁸ Pflanzen werden deshalb zunehmend mit mehreren HR-Genen ausgestattet (sogenannte stacked traits), der für den US-Markt geplante Bayer-Monsanto Mais MON 87429 ist sogar gegen fünf Herbizide resistent.³⁹ Neue Gentechnik soll hier künftig eine wichtige Rolle spielen. Im Vordergrund stehen wieder die cash crops Soja, Mais, Baumwolle und Raps, aber auch diverse andere Arten – und erneut Resistenzen gegen Glyphosat und ALS-Inhibitoren (Modrzejewski et al. 2019). Herbizidresistenz wird sogar als „hot agronomic trait“ für Genome Editing bezeichnet (Hussain et al. 2021).

In Ergänzung zu den in GVO bisher genutzten Bt-Toxingenen soll Genom-Editierung Pflanzen resistent gegen Insekten machen, indem beispielsweise durch eine Veränderung flüchtiger organischer Verbindungen ihre Attraktivität für Schadinsekten reduziert wird (Wani et al. 2022).

³⁶ <https://biooekonomie.de/nachrichten/bundesregierung-setzt-auf-biooekonomie>

³⁷ <https://www.newscientist.com/article/2189520-fixing-a-flaw-in-photosynthesis-could-massively-boost-food-production/>

³⁸ <https://www.newscientist.com/article/2189520-fixing-a-flaw-in-photosynthesis-could-massively-boost-food-production/>

³⁹ <https://civileats.com/2020/07/01/bayer-forges-ahead-with-new-crops-resistant-to-5-herbicides-glyphosate-dicamba-2-4-d-glufosinate-quizalofop/>

6. Ökologische und gesundheitliche Risiken der gentechnischen Veränderung bei Pflanzen und Nutztieren

6.1 SPEZIFISCHE RISIKEN DER NEUEN GENTECHNIK

Die neuen Gentechniken (NGT) nehmen für sich in Anspruch, mit Hilfe spezieller Nukleasen gezielte Genomveränderungen durchzuführen, präziser zu wirken und so dem Zufallsprozess der bisherigen Gentechnik zu entkommen. Doch die Stelle des Eingriffs genauer adressieren zu können, bedeutet keine pauschale Abwesenheit von Risiken (Eckerstorfer et al. 2019, Agapito-Tenfen et al. 2018). Der zelleigene Reparaturmechanismus, der nach einem DNA-Doppelstrangbruch aktiviert wird, lässt sich nicht steuern oder vorhersagen und ist fehleranfällig (Burgio & Teboul 2020). Die Reparatur kann unterschiedlich lange dauern und scheint weniger präzise zu sein als die Reparatur nach einem natürlich entstandenen DNA-Doppelstrangbruch (Brinkman et al. 2018). Jede Reparatur ist deshalb ein Einzelereignis – und in ihrer Wirkung nicht vorherzusehen. Es kann durch den Verlust (Deletion) oder durch Einfügen von Nukleotiden (Insertion) zur Veränderung des Leserasters (frame-shift) kommen. Ein verändertes Leseraster in einem Strukturgen führt häufig zum (gewünschten) Ausschalten von Genen (knock-out), da die mRNA-Synthese vorzeitig abgebrochen oder die Bildung eines funktionsfähigen Proteins nicht unterstützt wird. Nicht alle vermeintlichen knock-outs verhindern jedoch die Proteinexpression, es können auch verkürzte Proteine entstehen (Smits et al. 2019). Neben den erwünschten Effekten sind deshalb unerwartete und unerwünschte Effekte möglich (Chu & Agapito-Tenfen 2022, Koller & Cieslak 2023). Dies gilt auch für die Veränderung regulatorischer DNA-Sequenzen, was zur Bildung der entsprechenden Proteine in falschem Ausmaß, im falschen Gewebe, zum falschen Zeitpunkt oder Entwicklungsstadium führen kann.

Die Erfahrung mit Gentechnik lehrt zudem: GVO im Freiland verhalten sich aufgrund variabler und nicht vorhersehbarer Umweltbedingungen nicht selten anders als im Gewächshaus. So hatten transgene Weizenlinien, die im Gewächshaus als mehlauresistent erkannt wurden, im Freiland bis zu 56 % weniger Ertrag und eine bis zu 40fach höhere Empfindlichkeit gegen den toxischen Mutterkornpilz (Zeller et al. 2010). Die Autoren betonten, dass, abhängig vom Insertionsevent, ein Transgen große Effekte auf den Phänotyp der Pflanze haben kann und dass sich diese Effekte im Freiland umkehren können, wobei

die zugrundeliegenden Mechanismen unbekannt sind. Von Bedeutung sind solche Effekte insbesondere in mehrjährigen Kulturen, z. B. Gehölzen (Greiter et al 2015).

On-target Effekte

Unerwünschten Effekten an der Schnittstelle (on-target) wurde in der Forschung zunächst wenig Aufmerksamkeit geschenkt, da es zu Beginn der Laborversuche mit Talen, CRISPR und Co. zumeist darum ging, ein Gen auszuschalten (knock-out). Wurde das entsprechende Protein nicht mehr gebildet bzw. nachgewiesen, galt dies als hinreichender Beleg für die erfolgreiche Genom-Editierung. Doch die Reparatur des DNA-Doppelstrangbruchs durch die bei SDN 1 (site-directed nuclease 1) vorherrschende Reparaturform (non-homologous end-joining – NHEJ) kann nicht nur zu (kleinen) Deletionen oder Insertionen (Indels) führen, sondern auch bewirken, dass neue mRNA-Versionen entstehen. Diese können zur Bildung neuartiger, evtl. verkürzter und in ihrer Funktion unbekannter Proteine führen (Kapahnke et al. 2016, Lalonde et al. 2017, Mou et al. 2017, Smits et al. 2019).

Der Verlust von Exons (für die Proteinbildung erforderliche Sequenzen)⁴⁰, auch als Exon Skipping bezeichnet, ist eine weitere häufige Konsequenz der Genom-Editierung durch CRISPR/Cas9 (Sharpe und Cooper 2017). Unerwartete Effekte auf mRNA Prozessierung und Proteinsynthese – mit der Folge aberranter Proteine – wurden in der Hälfte der untersuchten kommerziellen menschlichen Zelllinien mit knock-outs für bestimmte Gene gefunden (Tuladhar et al. 2019). Auch große Deletionen und komplexe Umordnungen der Zielregionen wurden beobachtet (Kosicki et al. 2018). Die genetischen Konsequenzen umfangreicher on-target Effekte könnten zudem über die Region hinaus reichen, da beim Verlust von Allelen u. U. wichtige Gene nur noch einfach im Genom vorhanden sind.

Wird mit dem CRISPR/Cas-System eine zum Zielbereich nahezu homologe DNA-Sequenz (Donor-DNA) mit übertragen, kann der Doppelstrangbruch mit dem Homologie-abhängigen Reparatursystem (HDR homology-directed repair) repariert werden. Dieser SDN 2 (site-directed nuclease 2) Fall soll zu präziseren Ergebnissen führen als SDN 1. Doch unerwünschte Effekte können auch hier auftreten, wie der Nachweis von Mehrfach-

⁴⁰ In höheren Zellen wird die von der DNA transkribierte mRNA vor der Umsetzung der Information in Proteine geschnitten und neu zusammengefügt. Dabei werden nicht-kodierende Sequenzen (Introns) entfernt, die für die Proteinbildung notwendigen Sequenzen (Exons) werden zusammengefügt. Bei diesem auch als Splicing bezeichneten Prozess können Exons unterschiedlich zusammengefügt werden, sodass die Bildung unterschiedlicher Proteine möglich ist.

kopien der Donor-DNA bei Mäusen (Skryabin et al. 2020) oder großer Deletionen und Insertionen in menschlichen Stammzellen zeigte (Weisheit et al. 2020).

Wesentliche Erkenntnisse über die Unwägbarkeit des Reparaturprozesses wurden vor allem an tierischen und menschlichen Zellkulturen gewonnen. Auch bei Pflanzen ist jedoch mit vielfältigen on-target Effekten zu rechnen. Unerwünschte on- und off-target Effekte und große Deletionen (bis zu mehr als 500 Basenpaare) wurden beispielsweise bei Reis beschrieben (Biswas et al. 2020a). Auch können Sequenzen der Vektor-Konstrukte an verschiedenen Genomorten eingebaut werden (Braatz et al. 2017). Dies bedeutet, dass obwohl der Ort des Eingriffs vermeintlich präzise angesprochen wird, mit unerwarteten Veränderungen der jeweiligen Region(en) zu rechnen ist, die zu unerwünschten Effekten auf die Aktivität der adressierten und der benachbarten Gene führen können.

Off-target Effekte

Zudem kommt es zu Effekten in Nicht-Zielregionen, sogenannten Off-target-Effekten. Analysen zeigen, dass das CRISPR/Cas9 System eine gewisse Fehlerquote aufweist, also nicht so spezifisch wie angenommen nur die adressierte DNA-Sequenz schneidet. Es werden auch unerwünschte Schnitte an anderer Stelle im Genom (sog. off-target Effekte) beobachtet (Hahn und Nekrasov 2019, Li et al. 2019, Sturme et al. 2022, Guo et al. 2023). Darüber hinaus besitzen Pflanzen häufig Genfamilien mit ähnlichen DNA-Sequenzen. Die von zelleigenen Systemen durchzuführende Reparatur von Schnitten an nicht erwünschten Genomorten ist dabei ähnlich unwägbar wie die an adressierten DNA-Sequenzen. Da Off-Target Effekte mit den üblichen Screeningverfahren nicht sicher erfasst werden, treten sie möglicherweise häufiger auf als in der Literatur beschrieben. Sowohl on-target als auch off-target Effekte können Aktivität und Funktion verschiedener Gene und damit den Pflanzenstoffwechsel beeinflussen und beispielsweise zur Bildung neuer Toxine oder Allergene bzw. zu veränderten Wechselwirkungen der GVO mit ihrer Umwelt führen (Eckertorfer et al. 2019, Koller & Cieslak 2023).

Transfer von CRISPR/Cas-Sequenzen

Zur Einführung des CRISPR/Cas-Systems in Pflanzen wird zumeist das auch in der bisherigen Gentechnik verwendete Bakterium *Agrobacterium tumefaciens* genutzt (Liu et al. 2017, Erpen-Dalla Corte et al. 2019). Das zuvor gentechnisch veränderte Bakterium überträgt mit Hilfe seines T-Plasmids ein DNA-Konstrukt, das für das CRISPR/Cas-System und die entsprechende RNA kodiert, in Pflanzenzellen. Daneben findet ein weiteres Verfahren der bisherigen Gentechnik, die Übertragung von DNA mittels Partikelbeschuss, Anwendung. Den genannten Transformations-Verfahren ist gemeinsam, dass der Ein-

bau der DNA-Sequenzen im Pflanzengenom zufällig und nicht selten an mehreren Stellen erfolgt und in der Regel aus den so gentechnisch veränderten (transgenen) Pflanzenzellen erst Pflanzen regeneriert werden müssen. Bekannt ist, dass die Integration fremder DNA-Sequenzen häufig zu unerwarteten Veränderungen im Genom der Pflanze sowie der Genaktivität führt und die Integrationsorte starke Umordnungen erfahren (Reviews von Wilson et al. 2006, Wilson 2021). Insbesondere bei der Transformation mit *Agrobacterium tumefaciens* kommt es nicht selten zu zusätzlichem unerwünschtem Transfer und Einbau bakterieller DNA-Sequenzen unterschiedlicher Längen an verschiedenen Stellen des Genoms (Jupe et al. 2019). Wird das Cas9-Genkonstrukt weitervererbt und bleibt aktiv, kann es in den Nachkommen weitere Veränderungen bewirken.

Um bei einer eventuellen Markteinführung nicht den gesetzlichen Regelungen für herkömmliche GVO unterworfen zu sein, ist Ziel der Entwicklung, dass die Nachkommen Genom-edierter Pflanzen keine Transgene mehr enthalten. Doch v.a. bei Integration an verschiedenen Genomorten lassen sich Transgensequenzen nicht ohne weiteres durch Kreuzung entfernen (Michno et al. 2020). He und Zhao (2019) diskutieren deshalb auch andere Verfahren, etwa dass sich Transgene selbst eliminieren sollen, nachdem CRISPR/Cas aktiv war (sog. Selbstmord-Funktion). Genom-Editierung von Protoplasten mit DNA-freien CRISPR/Cas-Komplexen (Ribonukleoproteinen) soll die Entstehung von transgenen Pflanzen verhindern (Tsanova et al. 2020). Diese Verfahren stellen jedoch nicht sicher, dass keine Fremd-DNA eingebaut wird, wie Andersson et al. (2018) zeigten: 80 % der mit Ribonukleoproteinen veränderten Kartoffelsprosse mit bestätigten Mutationen wiesen an der Stelle des Doppelstrangbruchs unbeabsichtigte Insertionen auf, die aus nicht völlig abgebauter DNA aus dem Herstellungsprozess des Cas-Proteins sowie aus Kartoffel-DNA stammten.

Eine zusätzliche Hürde für die alte wie die neue Gentechnik ist die Regeneration veränderter Zellen zu Pflanzen, wofür der Einsatz von Wachstumshormonen (z. B. Auxin und Cytokinin) nötig ist. Solche Regenerationsverfahren sind aber nicht für alle Pflanzenarten bzw. Sorten etabliert. Schon länger ist bekannt, dass Regenerationsverfahren zu unerwarteten Veränderungen der Genaktivität und des Phänotyps führen können, was als somaklonale Variation bezeichnet wird (Arencibia et al. 2019, Skirvin et al. 1994). Eine erfolgreiche Regeneration gilt denn auch oft als schwieriger als die gentechnische Veränderung an sich. Deshalb wird intensiv nach Alternativen zur Zell- bzw. Gewebekultur gesucht (Altpeter et al. 2016), beispielsweise, indem der Eingriff direkt am Teilungsgewebe (Meristem) der Pflanzen vorgenommen wird (Maher et al. 2020). Aber bislang ist die Gewebekultur die Regel, auch bei neuer Gentechnik (Cardi et al. 2023).

6.2 NEUE GENTECHNIK – IDENTISCH MIT HERKÖMMLICHER ZÜCHTUNG?

Neue Gentechnik wird von interessierter Seite – beispielsweise der EU-Kommission in ihrem Entwurf vom Juli 2023 zur Änderung der Gentechnikgesetze – gerne mit der klassischen Züchtung gleichgesetzt. Neue Gentechnik erlaubt jedoch Eingriffe in Organismen, die weit über die Möglichkeiten der herkömmlichen Züchtung hinausgehen. Letztere nutzt die genetische Vielfalt der Sorten (und verwandter Wildarten), um durch Kreuzung und anschließende Selektion der Nachkommen neue Pflanzensorten mit höherem Ertrag oder anderen erwünschten Eigenschaften zu entwickeln. Wird die natürliche Mutationsrate durch Bestrahlung oder Behandlung mit Chemikalien erhöht, entstehen Pflanzen, die im EU-Recht zwar als genetisch verändert gelten, aber von GVO-spezifischen Regelungen (z. B. Zulassungsverfahren und Kennzeichnung) ausgenommen sind, da sie, wie der EuGH in seinem Urteil 2018 feststellte,⁴¹ „herkömmlich bei einer Reihe von Anwendungen verwendet wurden und seit langem als sicher gelten“.

Sowohl bei natürlichen als auch bei chemisch oder durch Strahlen induzierten Mutationen werden zelluläre Reparaturprozesse aktiv, welche die genetische Integrität erhalten und möglicherweise bestimmte Genombereiche besonders schützen (Kawall 2019). Monroe et al. (2022) zeigten, dass bei der Ackerschmalwand (*Arabidopsis thaliana*) Mutationen innerhalb von Genen halb so häufig auftreten wie in intergenen Regionen (zwischen den Genen liegende Abschnitte) und in essenziellen Genen sogar um zwei Drittel reduziert sind. Die neue Gentechnik kann diese Schutzmechanismen jedoch umgehen und so die Wahrscheinlichkeit für genetische Veränderungen erhöhen. Genombereiche, die bisher nicht zugänglich waren, können so verändert werden (Kawall 2019, 2021a). Reparaturprozesse nach durch CRISPR/Cas erzeugten Doppelstrangbrüchen entsprechen nicht unbedingt denen nach natürlichen Doppelstrangbrüchen, wie Brinkman et al. (2018) zeigten.

Zudem können mit CRISPR/Cas gleichzeitig mehrere Kopien eines Gens verändert werden, unabhängig davon, ob sie zu Genfamilien gehören oder auf zusätzlichen Chromosomensätzen vorhanden sind. Es lassen sich an allen komplementären Sequenzen Doppelstrangbrüche erzeugen, wobei jeweils unterschiedliche on-target Effekte auftreten können. Da natürliche und induzierte Mutationen auf Zufallsprozessen basieren, sind derartige Veränderungen mit ihnen nicht erreichbar. Auch die gleichzeitige oder sukzessive Veränderung verschiedener Gene durch Multiplexing ist mit herkömmlichen Züchtungsmethoden nicht möglich. CRISPR/Cas erlaubt

darüber hinaus, Kopplungsgruppen zu durchbrechen,⁴² da einzelne Gene adressiert werden können. Genom-Editierung kann deshalb zu Organismen mit neuen Eigenschaftskombinationen führen, wie sie bisher nicht möglich waren (Kawall 2019, 2021a).

CRISPR/Cas lässt sich auch einsetzen, um Gensequenzen für sogenannte Mikro-RNAs (miRNA) zu verändern. Diese kurzen, nicht für Proteine kodierenden miRNA-Sequenzen (20-24 Nukleotide) binden mittels Basenpaarung an mRNA und behindern so die Übersetzung der in der mRNA liegenden genetischen Information in Proteine. Sie sind an der Regulierung nahezu aller komplexer, auf vielen Genen beruhender Prozesse wie Wachstum, Blütenbildung oder Stressreaktion beteiligt, Hunderte solcher miRNAs wurden inzwischen nachgewiesen (Dong et al. 2022, Ma und Hu 2023). Beim Reis führte das knock-out bestimmter miRNAs zu veränderter Aktivität von über 760 für Proteine kodierenden Genen und von mehr als 100 weiteren miRNAs sowie zu rascherem Wachstum bei gleichzeitig kleineren Ähren und Körnern (Zhou et al. 2022). Ertragseigenschaften werden durch das Zusammenspiel vieler Gene bestimmt, die ihrerseits häufig durch miRNAs reguliert werden, wobei einzelne Eigenschaften (z. B. Korngröße) über komplexe Netzwerke von verschiedenen miRNAs kontrolliert werden können (Peng et al. 2019). Ein vielfach als harmlos dargestelltes knock-out eines miRNA-Gens kann damit die Steuerung der Genaktivität massiv beeinflussen und unerwartete Effekte auf den pflanzlichen Stoffwechsel verursachen. Solche knock-outs lassen sich mit CRISPR/Cas erzeugen, nicht aber mit herkömmlicher Züchtung.

6.3 EFFEKTE GENTECHNISCH VERÄNDERTER ORGANISMEN AUF NICHTZIEL-ORGANISMEN

Unerwünschte Effekte gentechnisch veränderter Organismen auf Nichtzielorganismen wurden vielfach beobachtet und begründeten auch Anbauverbote von insektenresistenten Pflanzen. So wirkt das im MON810 Mais gebildete Bt-Toxin nicht nur gegen den Zielorganismus Maiszünsler, sondern schädigt auch andere Organismen.

Zahlreiche Publikationen der letzten Jahre belegen, dass die Bt-Toxine unspezifischer wirken als anfangs dargestellt. Sie gefährden beispielsweise Schmetterlinge, Käfer und Nützlinge (Hilbeck und Otto 2015). Im Bt-Mais wird das Toxin in allen Pflanzenteilen exprimiert und über den Pollen verbreitet. Über Wurzelausscheidungen und abgestorbenes Pflanzenmaterial kann es auch in den Boden gelangen (Saxena et al. 2002) und möglicherweise die Gemeinschaft der Boden-Mikroorganismen beeinflussen (Li et al. 2023). Viele Organismen können so

⁴¹ <https://curia.europa.eu/jcms/upload/docs/application/pdf/2018-07/cp180111de.pdf>

⁴² Eng benachbarte Gene werden in der Regel gemeinsam vererbt, wohingegen entferntere liegende Gensequenzen durch Crossing-over der homologen Chromosomen während der Reifeteilung (Meiose) getrennt werden können. Sind Gene für erwünschte Eigenschaften mit solchen für weniger erwünschte gekoppelt, stellt dies die Züchtung vor Herausforderungen, lassen sich solche Genombereiche doch nur schwer trennen.

dem Toxin ausgesetzt werden, etwa auch dann, wenn auf ihren Futterpflanzen Bt-Toxin-haltige Maispollen abgelagert werden. Solche Szenarien sind nicht unwahrscheinlich, wachsen doch beispielsweise Brennnesseln, Futterpflanzen für viele Schmetterlinge wie Tagpfauenauge (*Inachis io*) und Kleiner Fuchs (*Aglais urticae*) häufig im Umfeld von Äckern, sodass sich hohe Konzentrationen von Maispollen niederschlagen können (Lang et al. 2015). Für Sachsen stellten Musche et al. (2009) fest, dass alle sechs besonders geschützten Schmetterlingsarten während ihrer Larvalentwicklung Maispollen ausgesetzt sein können und für weitere 75 (von insgesamt 148) lebensraumtypische Arten aufgrund der Überlappung von Larvenstadium und Maisblüte eine hohe Expositionswahrscheinlichkeit besteht.

Paula und Andow (2016) legen dar, dass mit Wechselwirkungen zwischen Bt-Pflanzen, pflanzenfressenden und räuberischen Insekten zu rechnen ist. Dies kann auch Nützlinge treffen sowie die Persistenz von Bt-Toxinen in der Nahrungskette erhöhen. Da Pollen des Windblütlers Mais über Hunderte von Metern verbreitet werden (Hofmann et al. 2014), sind negative Effekte auf Insekten und andere Organismen sogar in weiter entfernten Schutzgebieten möglich. Gelangt Bt-Toxin-haltiges Pflanzenmaterial in Gewässer, ist außerdem mit der Gefährdung aquatischer Organismen wie Insektenlarven oder Wasserflöhen zu rechnen (Venter und Bohn 2016). Da die Gehalte der Bt-Toxine von GVO zu GVO variieren und zudem abhängig sind von Pflanzengewebe und Wachstumsstadium, können Nichtzielorganismen sehr unterschiedlichen Toxinmengen ausgesetzt sein (Hilbeck et al. 2020). Dabei sind Schmetterlinge unterschiedlich empfindlich gegen Bt-Toxine, so reagiert der Schwalbenschwanz ähnlich empfindlich wie der Maiszünsler auf das im MON810 Mais gebildete Cry1Ab-Toxin (Lang & Vojtech 2006). Im in der EU vorgeschriebenen Monitoring möglicher Umweltwirkungen durch den Anbau von MON810 Mais wird aber nicht systematisch untersucht, ob empfindliche Nichtziel-Schmetterlinge gefährlichen Mengen von Bt-Maispollen ausgesetzt sind (EFSA 2024). Diese Risiken für Nichtzielorganismen waren ein wesentlicher Grund für das MON810-Anbauverbot in Deutschland im Jahr 2009.⁴³

Um Pflanzen weniger attraktiv für Schadinsekten zu machen, wurde vorgeschlagen, mittels CRISPR/Cas u. a. die Zusammensetzung flüchtiger organischer Verbindungen zu verändern (Wani et al. 2022). Ein solcher Ansatz wäre jedoch mit einem hohen Risiko für unerwünschte Effekte auf Nichtzielorganismen wie Nützlinge und Bestäuber verbunden, da sich dadurch auch die Interaktion mit anderen Insekten verändern könnte (Dudareva et al. 2013).

Auch andere gentechnisch erzeugte Eigenschaften, z. B. eine veränderte Fettsäurezusammensetzung, haben das Potential, Nichtzielorganismen zu schädigen. So könnte die Bildung von mehrfach-ungesättigten Omega-3-Fettsäuren (z. B. Eicosa-pentaen-Säure und Docosahexaen-Säure) in Nutzpflanzen zu unerwarteten Effekten auf terrestrische Ökosysteme führen. Diese als gesundheitlich besonders wertvoll geltenden Fettsäuren werden insbesondere von Algen gebildet und über die Nahrungskette in aquatischen Ökosystemen weitergegeben. Sie spielen eine wichtige physiologische Rolle in Wirbeltieren und anderen Tieren, kommen aber in Nutzpflanzen nur in geringen Mengen vor. Die gentechnische Veränderung von Raps (*Brassica napus*) oder Leindotter (*Camelina sativa*) mit dem Ziel der vermehrten Bildung von Omega-3-Fettsäuren (Napier et al. 2015) könnte deshalb die Interaktionen dieser GVO mit Organismen der Agrarökosysteme verändern, wie am Beispiel des Kohlweißlings (*Pieris rapae*) gezeigt wurde. Wurden Larven mit Omega-3-Fettsäuren in steigenden Anteilen (bis zum Gehalt in entsprechenden GVO) gefüttert, wurden die Schmetterlinge zwar größer, hatten aber kleinere und häufig deformierte Flügel (Hixson et al. 2016). Nicht auszuschließen ist, dass sich derartige Effekte nicht nur auf Schadschmetterlinge, sondern auch auf andere Insekten, evtl. sogar auf Nützlinge erstrecken würden. Sollten Fettsäuren, die für terrestrische Ökosysteme neu sind, in GVO gebildet werden, könnten sich Physiologie und Fortpflanzung terrestrischer Organismen fundamental ändern (Colombo et al. 2018). Da sich die Kreuzblütler Raps und Leindotter leicht mit verwandten Kultur- und Wildpflanzen kreuzen, wäre mit Effekten auf zahlreiche Organismen zu rechnen.

Zudem gilt: Veränderte Gehalte und Zusammensetzungen der Fettsäuren beeinflussen möglicherweise die Bildung von sekundären Inhaltsstoffen und Hormonen sowie Wachstum, Stresstoleranz und die Rolle der Pflanzen im Nahrungsnetz, wie am Beispiel des Leindotters (*Camelina sativa*) aufgezeigt wurde (Kawall 2021b).

Doch das Spektrum der durch neue Gentechnik angestrebten neuen Eigenschaften reicht weit über die Änderung des Fettsäurestoffwechsels hinaus. Unerwartete bzw. unerwünschte Effekte auf Nichtzielorganismen sind möglich. So könnten, da das pflanzliche Abwehrsystem in enger Wechselbeziehung mit dem Mikrobiom der Pflanzen steht (Hacquard et al. 2017), gentechnisch vermittelte Pilzresistenzen auch die natürliche Mikroflora von Pflanzen und Boden und nützliche Mycorrhiza-Pilze beeinflussen. Auch sind Interaktionen zwischen Krankheitserregern und Pflanzenschädlingen nicht ausgeschlossen, denn bei gleichzeitigem Befall können sie antagonistisch (gegenläufig) oder auch synergistisch (verstärkend) sein (Hei-

⁴³ <https://www.keine-gentechnik.de/dossiers/mais-mon810>

mes et al. 2015). Pilzresistenzen können zudem Wachstums- und Alterungsprozesse der Pflanzen beeinflussen (Kusch & Panstruga 2017).

Ein weiteres Ziel alter wie neuer Gentechnik ist ein verringerter Ligningehalt bei Pflanzen wie Luzernen oder Pappeln. Dies soll zu einer höheren Futterqualität oder effizienteren Zellstoffherstellung beitragen. (Jouanin et al. 2000). Lignine sind aber wichtig für die pflanzliche Abwehr von Schädlingen und Pathogenen und verlangsamen den Abbau von Holz (Campbell & Sederoff 1996). Eine veränderte Lignin-Zusammensetzung könnte deshalb die Wechselwirkungen der Pflanzen mit anderen Organismen und ihre Abwehrkraft beeinflussen sowie die Abbaurate verändern (Greiter et al. 2015).

In Zeiten des Klimawandels wird vermehrt argumentiert, Stresstoleranz der Nutzpflanzen stabilisiere Erträge und helfe, widrigen Umweltbedingungen wie Hitze, Trockenheit oder Nässe zu begegnen. In der Debatte um die Deregulierung der EU-Gentechnikgesetze ist dies eines der zuvorderst genannten Argumente. Stresstoleranz und Wachstum werden durch viele Gene und intensive Interaktionen zwischen Pflanzen und Umwelt gesteuert und auf verschiedenen Ebenen reguliert (Haak et al. 2017). So wurde für eine trockenheitstolerante Maissorte ein komplexes Netzwerk von über 170 Genen beschrieben, deren Aktivität bzw. Interaktion mit der Anpassung an Trockenheitsstress zusammenhängt (Thirunavukkarasu et al. 2017). Stresstoleranzgene wirken im Netzwerk gegen diverse Stressfaktoren und beeinflussen nicht nur die Reaktion gegen einen bestimmten Stressfaktor. Sie sind zudem verbunden mit weiteren Stoffwechselwegen und der pflanzlichen Abwehr von Pathogenen (Khan et al. 2011). Effekte solcher Veränderungen auf die Umwelt sind daher schwer vorherzusagen.

Erhöhte Toleranz der Pflanze gegenüber Stressfaktoren wie Hitze oder Trockenheit könnte auch zu einer erhöhten Fitness der Pflanzen führen, sie wuchskräftiger oder persistenter machen, zu mehr Nachkommen führen oder ihre vegetative Vermehrung beschleunigen. Diese Faktoren könnten die Ausbreitung der Pflanze in natürliche Ökosysteme begünstigen. Eine höhere Kältetoleranz von Kulturpflanzen erleichtert beispielsweise die Überwinterung von Pflanzenteilen und Samen, was zu vermehrtem Durchwuchs in Folgejahren führen kann, der wiederum häufig mit Herbiziden bekämpft wird.

Kreuzen sich diese gentechnisch veränderten Pflanzen mit verwandten Arten und Wildpflanzen, können die Nachkommen ebenfalls Fitnessvorteile aufweisen. Ihre Ausbreitung in Ökosysteme, in denen die betreffende Pflanzenart bisher nicht vorkam, wäre möglich – mit negativen Effekten für die Biodiversität. Ein zusätzliches Risiko: Trockenheits- und

Kältetoleranz könnten dazu beitragen, die Anbauregionen für Kulturpflanzen zu erweitern und die Wahrscheinlichkeit für den Gentransfer auf verwandte, aber bisher isolierte Arten oder Wildarten zu erhöhen.

Sollten sich die Wünsche der Industrie nach einem breiten Einsatz neuer Gentechnik bei Pflanzen erfüllen, wäre damit zu rechnen, dass zahlreiche veränderte Nutz- und Wildpflanzen mit unterschiedlichsten neuen Eigenschaften in großer Individuenzahl und in kurzer Zeit in die verschiedensten Ökosysteme entlassen werden (Heinemann et al. 2021). Vielfältige Wechselwirkungen dieser neuen GVO mit Organismen in ihrem Umfeld, die weit über das aus dem Anbau bisheriger GVO bekannte Maß hinausgehen, wären zu erwarten. Koller et al. (2023) fordern deshalb, in der Risikoabschätzung nicht nur das Risiko eines individuellen GVO (Event) zu betrachten, sondern auch die potentiellen Interaktionen der GVO, die direkt oder indirekt zu negativen Effekten führen können – und ein Verbot, bzw. mindestens eine Begrenzung der GVO-Nutzung im Freiland, zur Folge haben müssten.

6.4 INDIREKTE EFFEKTE (Z. B. HERBIZID-RESISTENZ)

Effekte, die aus dem Anbau von GVO sowie der Nutzung der jeweiligen Eigenschaft entstehen, wurden in der Risikobewertung bisher vernachlässigt. Dennoch sind sie ein wesentlicher Bestandteil des mit Gentechnik verbundenen Risikos. Herbizide, insbesondere das beim Anbau der meisten HR-Pflanzen eingesetzte Glyphosat, sind aus ökologischen und gesundheitlichen Gründen hoch umstritten. Ein Ausstieg bzw. Verbot, zumindest eine starke Reduktion des Einsatzes, wird seit langem gefordert, u. a. vom BUND. Risikoanalysen und EU-Zulassungsregeln für Pestizide, und damit auch für Herbizide, müssen dringend verbessert werden (Robinson et al. 2020).

Herbizide sind nicht nur toxisch für Pflanzen, sondern auch für zahlreiche Organismen. Sie beeinträchtigen das Bodenleben, vernichten Beikräuter, nehmen der Tierwelt die Nahrungsgrundlage und tragen so zum dramatischen Artenverlust bei (Schütte et al. 2017). Glyphosat, das die Bildung der Aminosäuren Tryptophan und Phenylalanin hemmt, galt zunächst als wenig toxisch für Mensch und Tier, da ihnen die 5-Enolpyruvylshikimat-3-Phosphat-Synthase (EPSPS), das Zielenzym des Wirkstoffs, fehlt. Doch inzwischen wurde klar, dass Glyphosat keineswegs so harmlos ist. Es steht sogar im Verdacht, krebserregend für den Menschen zu sein.⁴⁴

Da die gentechnische Veränderung ermöglicht, Breitbandherbizide wie Glyphosat während der Wachstumsperiode einzusetzen, ist mit höheren Aufwandsmengen und höheren Rückständen in Ernteprodukten zu rechnen. Damit ist auch

⁴⁴ <https://www.iarc.who.int/wp-content/uploads/2018/07/MonographVolume112-1.pdf>

eine Gefährdung der menschlichen und tierischen Gesundheit verbunden, wie Bohn & Millstone (2019) am Beispiel Glyphosat-resistenter Sojabohnen darlegen. Eine Fülle von Studien belegt (Van Bruggen et al. 2018, Kremer 2020, Lacroix und Kurrasch 2023): Glyphosat beeinflusst nützliche Mikroorganismen, z. B. stickstoffbindende Knöllchenbakterien und für die Nährstoffaufnahme wichtige Mykorrhiza-Pilze, fördert hingegen Schadpilze, z. B. Toxin-bildende Fusarien. Über die Bindung von Mikronährstoffen wie Eisen und Mangan kann es zu Mangelercheinungen der Pflanzen kommen (Mertens et al. 2018). Glyphosat beeinträchtigt auch das Mikrobiom im Verdauungstrakt von Mensch und Tier. Es hemmt Bodenlebewesen wie Regenwürmer (Zaller et al. 2021), schädigt aquatische Organismen (z. B. Plankton und Amphibien) und schwächt Immunsystem und Lernverhalten von Bienen (Motta et al. 2022, Gonalons und Farina 2018). Negative Effekte anderer Stressfaktoren wie beispielsweise Insektizide werden verstärkt. Diverse Studien zeigen zudem, dass handelsübliche Herbizidprodukte erheblich toxischer für terrestrische und aquatische Organismen sind als der Wirkstoff Glyphosat allein, da sie gefährliche Formulierungsmittel und teilweise Verunreinigungen durch Schwermetalle enthalten (Klátyik et al. 2023, 2024).

Im Zuge des Anbaus von herbizidresistenten Pflanzen stieg der Glyphosatverbrauch schon nach kurzer Zeit um ein Vielfaches (Benbrook 2016), was das Auftreten Glyphosat-resistenter Beikräuter begünstigte. Inzwischen wurden weltweit 59 Glyphosat-resistente Beikrautarten beschrieben sowie 6 bzw. 44, die gegen Glufosinat bzw. synthetische Auxine resistent sind und sogar 175 Arten, die resistent gegen ALS-Inhibitoren (Hemmer der Acetolactat-Synthase) sind.⁴⁵ Nicht wenige dieser Beikrautarten sind resistent gegen mehrere Herbizide. Eine geringere Empfindlichkeit gegen Glyphosat sollen weltweit sogar 360 Arten aufweisen, die Hälfte davon findet sich in den USA, wo vor allem Mais-, Soja- und Zuckerrübenfelder betroffen sind. In einigen Regionen kehren Landwirt*innen deshalb wieder zur mechanischen Bekämpfung von Beikräutern und Schädlingen zurück.

Das hat dazu geführt, dass inzwischen GVO mit mehr Herbizidresistenzen auf dem Markt sind, die die Applikation von Herbizid-Cocktails ermöglichen. Doch so verstärken sich die toxischen Effekte der Wirkstoffe auf Mensch und Umwelt und der Verlust der Artenvielfalt beschleunigt sich. Das Beispiel der in den USA auf Millionen Hektar angebauten gegen Dicamba resistenten Baumwoll- und Sojapflanzen zeigt: Dicamba, ein sehr flüchtiges synthetisches Analogon des Pflanzenhormons Auxin (Indol-3-Essigsäure), schädigt zweikeimblättrige nicht-resistente Kultur- und Wildpflanzen noch in großer Entfernung – und zwingt Nachbarn, auf ihren Flächen zur Schadensbe-

grenzung ebenfalls Dicamba-resistente Pflanzen anzubauen. Über die Schäden an Wildpflanzen wird in aller Regel gar nicht erst gesprochen.

Herbizidresistenzen können noch weitere Effekte haben: Die Wirkung von Glyphosat beruht auf der Hemmung der pflanzlichen 5-Enolpyruvylshikimat-3-Phosphat-Synthase (EPSPS), die eine zentrale Rolle im Stoffwechselweg zu aromatischen Aminosäuren (z. B. Tryptophan) und weiteren wichtigen Pflanzeninhaltsstoffen (z. B. Auxin) spielt. Die gentechnisch erzeugte Glyphosat-Resistenz entsteht in aller Regel durch die Überproduktion einer nicht von Glyphosat gehemmten bakteriellen EPSPS-Variante. Resistente Pflanzen überstehen aber nicht nur die Spritzung auf dem Feld, sondern haben auch im Falle einer Verwilderung einen Selektionsvorteil, wenn sie von Glyphosat-Abdrift betroffen sind. So wurden gentechnisch veränderte Glyphosat-resistente Rapspflanzen außerhalb von Äckern an Feldrainen oder Straßenrändern gefunden (Schulze et al. 2014).

Und Glyphosat-Resistenz kann selbst dann einen Fitnessvorteil mit sich bringen, wenn das Herbizid gar nicht eingesetzt wird. Beispielsweise zeigten Nachkommen transgener Glyphosat-resistenter *Arabidopsis thaliana* Pflanzen auch ohne Glyphosatbehandlung eine deutlich erhöhte Fitness: sie wurden größer, bildeten größere Blätter und mehr Biomasse und Samen, die selbst unter Hitze- und Trockenheitsstress besser keimten (Fang et al. 2018). Auch waren die Konzentrationen von Tryptophan und Auxin signifikant erhöht. Bekannt ist, dass das Pflanzenhormon Auxin in wenigen Stoffwechselschritten aus Tryptophan gebildet wird und bei Wachstum, Entwicklung und möglicherweise Stresstoleranz von Pflanzen eine große Rolle spielt (Zhao et al. 2012). Höhere Auxin-Gehalte, die mit der verstärkten EPSPS-Produktion (und dadurch bedingten höheren Tryptophangehalten) zusammenhängen, könnten deshalb die höhere Fitness der Glyphosat-resistenten Pflanzen teilweise erklären. Veränderte Hormongehalte könnten auch die Interaktion mit Insekten verändern, wie Studien an wilder Baumwolle, in der das EPSPS-Transgen nachgewiesen wurde, nahelegen (Vazquez-Barrios et al. 2021).

6.5 GENTRANSFER DURCH AUSKREUZUNG/ AUSBREITUNG

Der Gentransfer von GVO über die Ausbreitung von reproduktionsfähigem Pflanzenmaterial wie Samen oder Knollen oder durch Kreuzung mit Pflanzen der gleichen oder verwandter Arten spielt in der Risikoabschätzung von GVO eine zentrale Rolle. Gentransfer lässt sich nicht verhindern, wie die Erfahrung in Ländern mit GVO-Anbau zeigt (z. B. Price und Cotter 2014, Schafer et al. 2011). Auch die unerwünschte Verbreitung von GVO jenseits von Agrarflächen wurde wiederholt beschrie-

⁴⁵ <https://www.weedscience.org/Summary/SOASummary.aspx>

ben, z. B. Herbizid-resistente Luzerne in den USA (Greene et al. 2015). Auch fand sich Herbizid-resistenter Raps in verschiedenen Ländern (vornehmlich entlang von Transportwegen), ohne dass dort GVO-Anbau stattgefunden hätte, etwa in der Schweiz (Schulze et al. 2014) oder in Japan (Kawata et al. 2013).

Kulturpflanzen kreuzen sich, abhängig von ihrem Befruchtungssystem und der Nähe verwandter Arten, nicht selten mit Wildpflanzen (Ellstrand 2003, Mallory-Smith und Zapiola 2008). Manche dieser kreuzungsfähigen Wildarten gelten als unerwünschte Beikrautarten, z. B. wilder Reis (Wang et al. 2014b). Verwandte Wildarten, mit denen sich die jeweilige Kulturpflanze kreuzen kann, kommen insbesondere in deren Ursprungsregionen vor. Dies gilt beispielsweise in Europa für Raps (*Brassica napus*), der nicht nur mit Kulturarten wie Kohl (*Brassica oleracea*) und Rübsen (*Brassica rapa*) verwandt ist, sondern auch mit Wildarten (Jørgensen et al. 2009) wie Hederich (*Raphanus raphanistrum*), der sich wiederum mit Retticharten kreuzt (Snow et al. 2001). Über solche Brückenarten könnten Transgene und veränderte Gene sogar auf weiter entfernte Wildarten übertragen werden.

Abhängig von den durch die gentechnische Veränderung vermittelten Eigenschaften können Wildarten so ihre Fitness steigern oder Inhaltsstoffe bilden, die in ihren jeweiligen Ökosystemen neu sind. So wurde bereits vor einigen Jahren berichtet, dass transgene Nachkommen einer Kreuzung von Glyphosat-resistentem Reis und wildem Reis eine höhere Fitness (mit mehr Keimlingen und höherer Photosynthese-Rate) aufweisen, was die unerwünschte Ausbreitung der Glyphosat-Resistenz in Wildarten begünstigen würde (Wang et al. 2014b). Effekte auf Mikrobiom, Bodenleben und Interaktionen mit Insekten und anderen Tieren sind zu erwarten. Dabei können sehr komplexe Wirkungsketten betroffen sein: In Mexiko wurde bekannt, dass eine Einkreuzung von Transgenen in wilde Baumwolle die Interaktion zwischen Pflanze, Ameisen und Schadinsekten beeinflusst. Veränderte Gehalte pflanzlicher Hormone führten dazu, dass unterschiedliche Mengen an sogenanntem extra-floralen Nektar gebildet wurden, was sich auf Ameisenpopulationen auswirkte, die eine wichtige Rolle bei der Abwehr von Insektenschädlingen spielen (Vázquez-Barrios et al. 2021).

Sollte der Einsatz von CRISPR/Cas künftig auf zahlreiche Nicht-Kulturarten ausgedehnt werden, stellen sich Fragen nach Auskreuzung und Überdauerung verschärft, da sich die Anzahl möglicher Kreuzungspartner enorm erweitern würde. Darüber hinaus ist eine große Vielfalt von Eigenschaften im Gespräch, die mit bisheriger Gentechnik nicht oder nur sehr schwer erreichbar sind. So können Eigenschaften, die Wachstum, Blütenbildung und Ertrag beeinflussen oder die Pollen- und

Samenbildung wie auch die Keimung verändern, zu höherer Invasivität neuer GVO beitragen (Dolezel et al. 2024).

Vermehrte Neigungen zu Durchwuchs und Ausbreitung gelten als wesentliche Risikofaktoren für GVO mit Toleranz gegen abiotische Stressfaktoren (Khan 2011). Sollte es sich bei GVO mit Stresstoleranz und/oder höherem Wachstumspotential nicht mehr nur um ein- oder zweijährige Kulturpflanzen handeln, sondern um mehrjährige Pflanzen oder gar Bäume mit einer Lebensdauer von Jahrzehnten bis zu Jahrhunderten, ließen sich Effekte einer höheren Fitness noch wesentlich schwerer abschätzen. Die Erfahrung mit eingeführten Arten lehrt, dass es viele Jahre dauern kann, bis sich eine in einem Ökosystem neue Art negativ auf dessen Artenvielfalt auswirkt (Kowarik 2003).

Zudem dürfte es bei vielen der ins Visier genommenen Arten (seltener angebaute Kulturpflanzen, Zierpflanzen, mehrjährige Pflanzen, Bäume) erhebliche Kenntnislücken bezüglich ihrer Befruchtungsverhältnisse, kreuzungsfähigen Verwandten und Auskreuzungsdistanzen geben. Im Vorschlag der EU-Kommission zur Deregulierung des EU-Gentechnikrechts vom Juli 2023 (vergl. Kapitel 9) war keinerlei Begrenzung der zu verändernden Pflanzenarten auf ein- oder zweijährige Kulturarten vorgesehen, Wildarten sind explizit nicht ausgeschlossen. Ökologen kritisierten ein solches Vorgehen massiv und sehen darin eine ernsthafte Bedrohung von Biodiversitätsschutz und Nachhaltigkeit.⁴⁶

Gehölze sind kaum domestiziert, haben oft verwandte Wildarten und zeigen einen ausgeprägten genetischen Austausch innerhalb ihrer Populationen. Bäume produzieren in der Regel große Mengen an Pollen und Samen, die v. a. durch Wind und Tiere über mehrere Kilometer verbreitet werden. Kreuzungen über sehr große Distanzen wurden bei verschiedenen Baumarten nachgewiesen. Dies gilt nicht nur für Windblütler (Kremer et al. 2012), bei denen Distanzen von 40 bis über 100 km beobachtet wurden, sondern auch für Insekten-bestäubte Bäume wie den Speierling (*Sorbus domestica*), bei dem sich noch in Distanzen von 12-16 km Pollentransfer fand (Kamm et al. 2009). Auch bei Pappeln, beliebten Objekten der gentechnischen Veränderung, einschließlich Genome Editing (Cieslak und Koller 2024),⁴⁷ spielt die Verbreitung von Pollen und Samen über große Entfernungen eine wichtige Rolle (DiFazio et al. 2004).

Gehölze interagieren zudem mit einer Vielzahl von Organismen, z. B. dem Boden-Mikrobiom, symbiotischen Pilzen, Insekten, Vögeln, Säugern etc., und spielen eine wichtige Rolle bei den Prozessen, die dem Austausch chemischer Elemente zwischen Organismen und Umwelt (Gesteine, Boden, Luft,

⁴⁶ https://gfoe.org/sites/default/files/ngt_gfoe_final.pdf

⁴⁷ https://fachstelle-gentechnik-umwelt.de/wp-content/uploads/Backgrounder_poplar_22_01_24.pdf

Wasser) dienen (Greiter et al. 2015). Da Bäume außerdem lange leben und zumeist erst nach Jahren Nachkommen produzieren, sind bei der Abschätzung möglicher Effekte des Gentransfers auf die Ökosysteme nicht nur sehr große räumliche, sondern auch zeitliche Distanzen zu berücksichtigen.

In Zeiten des Klimawandels ist es schwierig bis unmöglich, zu prognostizieren, wie sich die Umweltbedingungen, beispielsweise Temperatur, Trockenheit, Niederschläge, Stürme, Pathogene etc., die den Gentransfer über Auskreuzung und Samenverbreitung beeinflussen und die Interaktionen mit der Umwelt mit bedingen, entwickeln werden. Sollte die Jugendentwicklung von Gehölzen durch gentechnische Veränderungen extrem beschleunigt werden, wie für Pappeln vorgeschlagen (Ortega et al. 2022), und würden diese Gehölze rasch und in großer Zahl ausgebracht werden, wäre es nahezu unmöglich, unerwünschte Entwicklungen rechtzeitig zu erkennen und gegebenenfalls einzugreifen. (Cieslak und Koller 2024).

Vermehrungsfähiges Pflanzenmaterial wird aber nicht nur durch Wind, Wasser und Tiere verbreitet, sondern nicht zuletzt durch den Menschen. Die meisten absichtlichen und unabsichtlichen Einführungen fremder invasiver Arten erfolgten durch den Menschen. In Zeiten der Globalisierung haben Handel, Transport, Reisen und Tourismus die Rate der Artenausbreitung (auch invasiver Arten) erheblich beschleunigt (Shine et al. 2000, IPBES 2023). Beabsichtigt oder unbeabsichtigt könnten diese vier Faktoren auch die Ausbreitung bzw. den Eintrag von GVO in viele Ökosysteme beschleunigen – und das über große Entfernungen. Bekannt ist, dass bei der Etablierung von invasiven Arten auch sogenannte sekundäre Einträge über den Transport von Erde, Pflanzenabfällen, Saatgut, Baumschulmaterial oder Setzlingen eine nicht zu vernachlässigende Rolle spielen (Kowarik 2003).

Wolfenbarger und Phifer (2000) weisen darauf hin, dass – selbst bei Übertragung kleiner DNA-Sequenzen – der entstehende Phänotyp durch die neuen erwarteten (und nicht selten unerwarteten) Eigenschaften einen für das Netzwerk der ökologischen Wechselwirkungen neuen Organismus darstellen und irreversible Effekte haben kann. Dies gilt grundsätzlich auch für die neue Gentechnik. Die Risiken mit Hilfe neuer Gentechnik produzierter Pflanzen könnten sich sogar noch erhöhen, da angesichts der neuen Möglichkeiten, mehrere Veränderungen – und damit neue Eigenschaften – gleichzeitig oder kurz hintereinander in Pflanzen zu erzeugen, die Unwägbarkeiten hinsichtlich ihrer Effekte auf Ökosysteme erheblich zunehmen würden.

6.6 GESUNDHEIT

Die Frage nach Risiken der gentechnischen Veränderung von Pflanzen für die menschliche Gesundheit begleitet die Debatte um die Agrogentechnik seit den neunziger Jahren des letzten Jahrhunderts. Auch wenn vielfach argumentiert wird, es gebe trotz vieler Studien keine Belege für Gefahren durch den Verzehr gentechnisch erzeugter Lebensmittel,⁴⁸ ist festzuhalten, dass in Tierversuchen negative Effekte beobachtet wurden (Shen et al. 2022). Die Datenlage zur Wirkung von gentechnisch veränderten Lebensmitteln auf den Menschen ist allgemein unbefriedigend. So sind epidemiologische Erkenntnisse nur schwer zu erreichen, da in Ländern wie den USA, in denen von einem vergleichsweise hohen Anteil von GVO im Lebensmittelsektor auszugehen ist, keine verpflichtende Kennzeichnung besteht. Hilbeck et al. (2015) betonen folglich, dass bezüglich der Sicherheit von gentechnisch veränderten Lebensmitteln kein wissenschaftlicher Konsens existiert.

Risiken können beispielsweise aus neuen Proteinen oder Inhaltsstoffen erwachsen, die allergen oder toxisch wirken könnten, aber auch aus unerwarteten Effekten der gentechnischen Veränderung: Neue Proteine können gebildet oder Art und Menge der in Pflanzen in großer Zahl und Vielfalt vorhandenen sekundären Inhaltsstoffe verändert werden. Die Verträglichkeit von aus GVO erzeugten Lebensmitteln kann so beeinflusst werden (Wilson et al. 2006, Wilson 2021). Die über komplexe Stoffwechselwege verknüpften sekundären Inhaltsstoffe spielen eine große Rolle beim Wachstum, der Schädlings- und Krankheitsabwehr und der Interaktion mit der biotischen und abiotischen Umwelt und sind häufig multifunktional (Erb und Kliebenstein 2020). Sie sind wichtig für die menschliche Gesundheit (z. B. Vitamine, Carotine und Phenole), können aber auch toxisch wirken wie etwa das Alkaloid Solanin der Kartoffel (Friedman 2006).

Mit Hilfe sogenannter omics-Studien – Analysen von mRNA (Transkriptom), Proteinen (Proteom) und Stoffwechselprodukten (Metabolom) – sind inzwischen umfangreiche Charakterisierungen des molekularen Profils von GVO möglich. Im Vergleich zur nicht-GVO Ausgangslinie lassen sich durch den gentechnischen Eingriff bedingte Veränderungen erfassen. Die sechzig von Benevenuto et al. (2023) analysierten omics-Studien von GVO ließen zwar oft detaillierte Informationen vermissen, erlaubten jedoch den Schluss, dass der Kohlenhydrat- und Energiestoffwechsel der GVO besonders häufig von (unerwarteten) Veränderungen betroffen war, was nicht nur Fitness und Stressreaktion der GVO beeinflussen kann, sondern auch die Lebensmittelsicherheit. Für spezifische traits (Eigenschaften) und spezifische Pflanzen mag zutreffen, dass NGT-Pflanzen als ebenso sicher für die Ernährung gelten können. Doch gilt das nicht generell, weshalb eine Einzelfallbetrachtung notwen-

⁴⁸ <https://www.nationalacademies.org/based-on-science/foods-made-with-gmos-do-not-pose-special-health-risks>

dig bleibt. Und auch in der Summe muss dies nicht zutreffen, falls beispielweise (zu) viele GVO mit den gleichen neuen, als gesundheitsfördernd beworbenen Eigenschaften (z. B. höhere Gehalte von Vitamin D oder bestimmten Fettsäuren) auf den Markt kommen sollten (Freeland et al. 2024). Wenn damit eine Überversorgung mit bestimmten Stoffen einhergeht, medikamentenähnlich wirkende Wirkstoffe zu hoch dosiert eingenommen werden, oder die Nährstoffzusammensetzung und Verdaulichkeit der gentechnisch veränderten Pflanzen ebenfalls verändert ist, wäre mit Effekten auf die gesundheitliche Eignung der Lebensmittel zu rechnen.

Herbizid-resistente Pflanzen, vor allem Sojabohnen, machen einen Großteil der in die EU importierten Futtermittel aus. Diese GVO enthalten regelmäßig Rückstände der eingesetzten Herbizide. Insbesondere von Glyphosat-resistenten Pflanzen gewonnene Lebens- (und Futter-)mittel können unerwartet hohe Glyphosat-Rückstände aufweisen (Cuhra 2015). Die aktuell übliche Abschätzung der gesundheitlichen Risiken dieser als Futter- und Lebensmittel dienenden GVO wird als nicht den EU-Vorschriften entsprechend kritisiert, ihre substantielle Verbesserung wird gefordert (Miyazaki et al. 2019).

Zu toxischen Wirkungen von Glyphosat existiert inzwischen sehr umfangreiche Literatur, deren Ergebnisse durch Studien an Tieren und menschlichen Zellen gewonnen wurde (Lacroix und Kurrasch 2023). In den USA, wo Soja und Mais zu über 90 Prozent gentechnisch verändert und sehr häufig Herbizid-resistent sind, ist von einem hohen Glyphosateinsatz auszugehen, der von Samsel und Seneff (2013) in Zusammenhang mit Krankheiten des Verdauungstraktes gebracht wurde. Glyphosat beeinflusst das Mikrobiom des Darms, wie Mesnage et al. (2021) berichten. Die International Agency for Research on Cancer (IARC) der WHO befand 2015, Glyphosat sei wahrscheinlich krebserregend für den Menschen („probably carcinogenic to humans Group“ 2A).⁴⁹ In den USA wurden zahlreiche Gerichtsverfahren gegen Monsanto (jetzt Bayer) von Personen angestrengt, die ihre Krebserkrankung auf die Anwendung von Glyphosat zurückführen. Das Unternehmen wurde zu Strafen bzw. Schadensersatz im Milliardenbereich verurteilt.⁵⁰

Vergleichbare Überlegungen wie bei der klassischen Stoffbewertung sind nicht nur für die im Zusammenhang mit GVO eingesetzten Pestizide anzustellen, sondern auch für GVO selbst, da sie in aller Regel nicht rückholbar sind und negative Effekte erst Jahre nach ihrem Ersteinsatz zum Tragen kommen kön-

Gefährlichkeit oder Risiko? Überlegungen zur Risikobewertung

Auszug aus BUND-Position 69, Herausforderungen für eine nachhaltige Stoffpolitik, S. 33 (2023)⁵¹
Die klassische Stoffbewertung beruht darauf, Wirkung und Exposition zu vergleichen. Ist die erwartete oder gemessene Exposition (Konzentrationen/Dosen in Atemluft, in Nahrung, im Körper oder in der Umwelt) höher als die Wirkungsschwelle, wird ein Risiko festgestellt, das zu verringern ist. Diese Vorgehensweise hat sich einerseits bewährt, weil auf diese Weise unmittelbare Vergiftungen von Mensch und Umwelt erkannt und vermieden werden. Andererseits ist die Prüfung jeder einzelnen Expositionssituation erforderlich, was einen beträchtlichen Aufwand bedeuten kann. Außerdem ignoriert dieser Ansatz, dass bei persistenten und mobilen Stoffen, persistenten und bioakkumulierenden Stoffen sowie Stoffen mit irreversibler Wirkung Exposition und Wirkung entkoppelt sind, d. h. die Wirkungen treten verzögert oder räumlich entfernt vom Zeitpunkt/Ort der Exposition auf. Ein Expositions-/Wirkungs-Vergleich führt in solchen Fällen zu falschen Ergebnissen. Falls man zu einem späteren Zeitpunkt nachteilige Effekte feststellt, ist der Stoff nicht mehr aus der Umwelt rückholbar. REACH nennt solche Stoffe besonders besorgniserregend (SVHC) und zielt auf eine Substitution solcher Stoffe und ihrer Anwendungen. In diesen Fällen bedarf es also nicht der Evaluierung einzelner Expositionsszenarien, sondern Handlungsbedarf ergibt sich allein aus der Gefährlichkeit des Stoffes. Es ist zu fordern, die gefährlichkeitsbezogene Bewertung auf alle „substances of concern“ auszuweiten, d. h. zum Beispiel auch auf extrem persistente Chemikalien (sogenannte Ewigkeitschemikalien) sowie Mikroplastik oder hochgiftige Chemikalien. Will man das Nachhaltigkeitsziel „giftfreie Umwelt“ erreichen, ist der möglichst vollständige Ausstieg aus gefährlichen Chemikalien unerlässlich. Der Risikoansatz hat nur noch seine Berechtigung bei Chemikalien, die die o. g. Kriterien nicht erfüllen sowie im Nachhinein zur Beurteilung von Belastungen (z. B. Altlasten, Gewässerverunreinigungen, Abfälle) und Monitoring-Ergebnissen.

⁴⁹ <https://www.iarc.who.int/featured-news/media-centre-iarc-news-glyphosate/>

⁵⁰ <https://taz.de/Bayer-Aktie-faellt-nach-Glyphosat-Urteil/!5988407/>

⁵¹ <https://www.bund.net/service/publikationen/detail/publication/herausforderungen-fuer-eine-nachhaltige-stoffpolitik-1/>

nen. Zudem können sich GVO, im Gegensatz zu Chemikalien, vermehren und genetisch austauschen, sodass beispielsweise auch Nachkommen aus einer Kreuzung mit Wildpflanzen neue, bislang in den entsprechenden Ökosystemen nicht vorkommende Eigenschaften mit unbekannter Wirkung aufweisen können.

Die mit NGT entstehenden Organismen und Produkte müssen deshalb im Einzelfall umfassend auf ihre Risiken geprüft werden. Die aktuell vorherrschende Praxis, nur agronomische und phänotypische Aspekte von GVO zu betrachten, ist keinesfalls hinreichend (Dolezel et al 2024). Eine pauschale Gleichsetzung dieser GVO mit herkömmlich gezüchteten Pflanzen und ihre Entlassung aus dem Gentechnikrecht, wie von der EU-Kommission vorgeschlagen, ist klar abzulehnen.

7. Nicht erfüllte Versprechen – weitere Aspekte

7.1 RÜCKBLICK UNERFÜLLTE VERSPRECHEN

Die Gentechnik, so lautete die Erzählung vor 30 Jahren, werde den Einsatz von Pestiziden reduzieren, die Erträge steigern, den Landwirten ein höheres Einkommen sichern und den Verbraucher*innen bessere Lebensmittel beschere. Doch wie allseits bekannt, haben sich die Versprechen nicht erfüllt. Weder wurde der Pestizideinsatz reduziert, noch wurden die Hoffnungen auf wesentliche Ertragssteigerungen oder bessere Lebensmittel Wirklichkeit.⁵²

Herbizid- und Insektenresistenz

In den letzten Jahrzehnten, insbesondere in den vergangenen 20 Jahren, hat der Pestizideinsatz weltweit dramatisch zugenommen (Schütte et al. 2017, FAO).⁵³ Der Einsatz von Glyphosat, dem beim Anbau von Herbizid-resistenten GVO zumeist genutzten Herbizid, gar um das fünfzehnfache (Benbrook 2016). Wiederholte Spritzungen pro Saison sind inzwischen häufig, denn aufgrund der Herbizidresistenz wurde die Ausbringung auch in der Kultur möglich. Die Artenvielfalt wurde in den GVO-Anbauflächen reduziert, denn einerseits sind die Herbizide und die fertigen Handelsprodukte direkt toxisch für viele terrestrische und aquatische Organismen (Klátyik et al. 2023, 2024) und andererseits töten sie „bestimmungsgemäß“ Wildpflanzen, die Grundlage der Nahrungsketten sind.

So sind die Populationen des Monarchfalters (*Danaus plexippus*), eines einst in den USA weit verbreiteten Wanderfalters, stark zurückgegangen und dies vor allem im mittleren Westen, dem Hauptanbaugebiet Herbizid-resistenter Soja- und Maispflanzen. Grund dafür ist neben Abholzungen in den Überwinterungsgebieten in Mexiko auch das Verschwinden der wichtigen Futterpflanze *Asclepias syriaca* aufgrund des massiven Herbizideinsatzes (Pleasants und Oberhauser 2012, Taylor et al. 2020).

Der breite Einsatz von Herbiziden begünstigt das Auftreten von Herbizid-resistenten Wildpflanzen, was in aller Regel damit beantwortet wird, dass mehr und weitere Herbizide gespritzt werden. Um den Herbizideinsatz auf Dauer zu sichern, setzt die Biotech-Industrie wie erwähnt zunehmend auf die Kombination verschiedener Herbizid-Resistenzgene: GVO mit sogenannten stacked traits – Kombinationen verschiedener Herbizidresistenz- und Insektenresistenzgene – sind inzwischen eher die

Regel als die Ausnahme, ablesbar auch an der EU-Zulassung von GVO zum Import als Futter- und Lebensmittel.⁵⁴ Der Teufelskreis von immer mehr Herbiziden, mehr Umweltbelastung und mehr resistenten Beikräutern wird so aufrechterhalten, auch wenn Wissenschaftler*innen seit Jahren fordern, bei der Beikrautkontrolle nicht allein auf Herbizide zu setzen (Mortensen et al. 2012).

So führte Monsanto in den USA 2017 gentechnisch veränderte Soja und -Baumwolle ein, die nicht nur resistent waren gegen Glyphosat, sondern auch gegen Dicamba, ein Analogon des Pflanzenhormons Auxin. Der Einsatz des bis dahin nur noch wenig verwendeten Herbizids stieg daraufhin sprunghaft an, im Sojaanbau von 2015 bis 2020 fast auf das Hundertfache (Mortensen et al. 2024).⁵⁵ Da Dicamba sehr flüchtig ist und über Entfernungen von mehr als einem Kilometer verbreitet werden kann (Oseland et al. 2024) und zudem für breitblättrige Pflanzen vierhundertfach toxischer ist als Glyphosat (Mortensen et al. 2012), traten auf benachbarten Flächen mit z. B. nicht-resistenten Kulturpflanzen wie non-GM-Soja und Zuckerrübe oder im Obst- und Gemüsebau enorme Schäden auf, Tausende Fälle wurden gemeldet.⁵⁶ Dies wiederum führte zu Gerichtsverfahren, in deren Folge es zu einer gewissen Einschränkung des Dicamba-Einsatzes kam. Privatgärten und Nicht-Agrarflächen waren ebenfalls betroffen, Schäden an der Artenvielfalt wurden jedoch erst zum Thema, als Imker die Imkerei aufgaben, da ihre Bienen aufgrund des Mangels an Wildpflanzen verhungerten.⁵⁷ Anfang 2024 hob ein Gericht die Genehmigung für Herbizidmischungen, die Dicamba enthalten, auf.⁵⁸ Wie weit sich der Anbau Dicamba-resistenter Pflanzen in den USA dadurch ändern wird, ist offen.

Ähnlich stellt sich die Situation beim Einsatz von Insektiziden dar. Auch hier wird sich das Versprechen, mit insektenresistenten GVO lasse sich der Insektizideinsatz begrenzen, auf die Dauer nicht erfüllen. So nahm in den USA parallel zum Anbau von Bt-Mais gleichzeitig die Saatgutbehandlung mit den für Insekten sehr toxischen Neonicotinoiden bei Mais stark zu, da Monsanto & Co. bzw. die von ihnen abhängigen Saatguthändler gentechnisch verändertes Saatgut vorzugsweise vorbehandelt verkaufen (Kleinschmit und Lilliston 2015). Auch wird über die Zunahme von Sekundärschädlingen berichtet (Smith et al. 2018). In Indien geben Baumwoll-Anbauer*innen

⁵² https://www.bund.net/fileadmin/user_upload_bund/publikationen/umweltgifte/greenwashing-gentechnik-faktencheck-bund.pdf

⁵³ <https://www.fao.org/3/y5031e/y5031e0i.htm>

⁵⁴ <https://webgate.ec.europa.eu/dyna2/gm-register/>

⁵⁵ <https://www.centerforfoodsafety.org/issues/6459/pesticides/dicamba>

⁵⁶ <https://www.regulations.gov/document/EPA-HQ-OPP-2020-0492-0003>

⁵⁷ <https://www.arkansasonline.com/news/2019/jan/05/honey-seller-faults-dicamba-in-closing/>

⁵⁸ <https://www.centerforfoodsafety.org/press-releases/6884/federal-court-halts-spraying-of-monsantos-dicamba-pesticide-across-millions-of-acres-of-cotton-soybeans>

37 Prozent mehr Geld für Insektizide aus als vor Einführung der Bt-Baumwolle (Kranthi & Stone 2020).

Wie im Falle der Herbizidresistenz wächst auch hier die Zahl der Berichte über das Versagen der Technik: Gegen Bt-Toxine resistente Schadinsekten wurden in den Anbauländern Indien, USA, Kanada, Brasilien, Argentinien, Pakistan und Südafrika vermehrt beobachtet (Tabashnik et al. 2023). Der Monitoringbericht zum Anbau der MON810 Maislinie in Spanien und Portugal legt nahe, dass es nicht nur in den genannten Ländern, sondern inzwischen auch in Spanien Populationen der Schadinsekten (Mittelmeer-Maiszünsler) gibt, die weniger empfindlich gegen das Bt-Toxin sind (EFSA 2024).

Und wiederum lautet die von der Biotechindustrie propagierte Lösung: Kombination mehrerer Insektenresistenzgene in einer transgenen Pflanze. Damit dreht sich die Spirale weiter: Unter dem Namen SmartStax vermarktet Monsanto bereits seit 2010 einen transgenen Mais, der sechs verschiedene, gegen Schadschmetterlinge und den Maiswurzelbohrer gerichtete Bt-Toxine bildet und zusätzlich gegen die Herbizide Glyphosat und Glufosinat resistent ist. Seit 2013 ist er in der EU zum Import zugelassen.⁵⁹ Bereits 2017 folgte die US-Zulassung für den sogenannten Smart Stax Pro Mais, der zusätzlich mit einem neuen Wirkmechanismus ausgestattet ist, um den inzwischen vielfach resistenten Maiswurzelbohrer trotzdem zu bekämpfen.⁶⁰ Hier wird die so genannte RNA-Interferenz-Technologie (RNAi) genutzt, mit deren Hilfe in den Larven Gene ausgeschaltet werden, die für ihr Überleben essentiell sind. Doch gegen die RNAi-Methode können sich ebenfalls Resistenzen etablieren, sodass ein dauerhafter und ausreichender Schutz gegen den Wurzelbohrer mit diesen Maßnahmen nicht gesichert ist (Khajuria et al. 2018).

Goldener Reis

Zu Beginn des Jahrhunderts wurde vielfach berichtet, golden rice sei geeignet, dem in armen Ländern verbreiteten Vitamin-A-Mangel und den damit zusammenhängenden Erkrankungen entgegenzuwirken. Der in Europa entwickelte gentechnisch veränderte Reis sollte vermehrt β -Karatol bilden, eine Vorstufe von Vitamin A. Dies war speziell auf asiatische Länder wie Indien, Bangladesch, Indonesien und die Philippinen gerichtet, in denen Reis die Hauptnahrungsquelle ist. Doch der β -Karatol-Gehalt der ersten Version war zu gering, als dass er tatsächlich wirksam gewesen wäre; erst die zweite, von Syngenta entwickelte Version produzierte nennenswerte Mengen (Paine et al. 2005). Im Feldversuch bewährten sich die golden

rice Varianten jedoch nicht, vermutlich, weil die ursprünglich gentechnisch veränderte Sorte nicht an tropische Bedingungen und Krankheiten angepasst war und die integrierten Transgene mit einem Gen für die Wurzelbildung interagierten (Eisenstein 2014). Die mangelnde Akzeptanz von golden rice-Varietäten bei den Farmern spielt bei der bislang nicht sehr erfolgreichen Einführung eine wichtige Rolle (Glover et al. 2020), zumal bäuerliche Züchtung auf den Philippinen zu erfolgreichen Sorten führt.⁶¹ Mit Blick auf den Eingriff in den pflanzlichen Stoffwechsel kommt Wilson zum Schluss, der gentechnische Eingriff an sich sei der einfachere Teil, die echte Herausforderung sei, keine unbeabsichtigten Effekte zu erzeugen, die durch die Störung der vielen miteinander verwobenen biochemischen Pfade und der darauf beruhenden komplexen pflanzlichen Prozesse entstehen (Wilson 2017). Die Alternativen sind lange bekannt: Förderung von Obst- und Gemüseanbau, um den Mangel an Vitamin A und vielen weiteren Mikronährstoffen zu beheben und Verteilung der kostengünstigen Vitamin-A-Präparate v. a. an Kleinkinder, auch in Kombination mit Impfungen.

7.2 SOZIOÖKONOMISCHE EFFEKTE DES ANBAUS GENTECHNISCH VERÄNDERTER PFLANZEN

Die mit gentechnisch veränderten Pflanzen einhergehenden Versprechungen haben auch jenseits von gesundheitlichen und umweltbezogenen Effekten erhebliche Auswirkungen auf soziale und ökonomische Systeme. Die ethischen, politischen und kulturellen Implikationen, die eine enge Berührung mit den sozioökonomischen Effekten haben, werden in den Kapiteln 9 und 10 behandelt.

Sozioökonomische Effekte des Anbaus gentechnisch veränderter Pflanzen wurden von wissenschaftlicher Seite vor allem im Hinblick auf die Auswirkungen in Ländern des Südens wie Brasilien, Argentinien, Indien oder Südafrika untersucht und diskutiert. Insbesondere auch deshalb, weil der tatsächliche Einsatz von GVO, neben den USA und Kanada, dort stattfindet und die Auswirkungen auf die Agrarstruktur und die ökonomische Situation von Landwirtinnen und Landwirten direkt beobachtet und analysiert werden konnten (Bombardi 2024, Spök et al. 2022, Sprink et al. 2022, Andrioli 2020, Compson 2017, Hilbeck & Herren 2016, Fischer et al. 2013).

Mit der Zunahme der Patentierung von gentechnisch veränderten Pflanzen (vgl. Kapitel 7.3) und dem Wachstum des ökologischen Landbaus sowie des mit dem Ohne GenTechnik-Siegel zertifizierten gentechnikfreien Anbaus in Deutschland und

⁵⁹ <https://www.zeit.de/wirtschaft/2013-11/eu-kommission-zulassung-genmais-smartstax>

⁶⁰ <https://www.epa.gov/pesticide-registration/epa-registers-innovative-tool-control-corn-rootworm>

⁶¹ <https://masipag.org/2024/02/on-the-ground-seeds-of-hope-against-golden-rice/>

weiteren europäischen Mitgliedstaaten, stellt sich die Frage nach den sozioökonomischen Auswirkungen für Deutschland und Europa sehr deutlich. Angesichts der in der EU geplanten Deregulierung der bisherigen gesetzlichen Grundlagen gilt dies umso mehr, beispielhaft dargestellt an Auswirkungen auf die Saatgutreinheit, die Koexistenz und die Agrarstruktur.

Die Vielfalt von unabhängigen Züchterinnen und Züchtern in Deutschland und Europa ist dem Züchternvorbehalt zu verdanken. Dieser garantiert mit dem System des Sortenschutzes den freien Zugang zur genetischen Vielfalt und damit die züchterische Freiheit. Das System gewährleistet den Pflanzenzüchter*innen für die Züchtung neuer Sorten den Zugang zu allen vorhandenen Pflanzensorten. Neue Sorten gewährleisten den Züchter*innen durch den Verkauf des Saatguts ihr Einkommen. Für andere Pflanzenzüchter*innen sind jedoch auch neu gezüchtete Sorten zur Weiterzüchtung frei verfügbar.

Mit Anwendung der (neuen) Gentechnik in der Pflanzenzucht wird ebenfalls auf diese große Vielfalt der durch den Züchternvorbehalt entstandenen Sortenvielfalt zurückgegriffen. Gleichzeitig ermöglicht die Technik aber die Patentierung – denn patentieren lassen sich technisch erzeugte Erfindungen und Verbesserungen. Patentierte Pflanzen gelten dann als geistiges Eigentum der Patentinhaber, die über die Nutzung entscheiden. Schon allein die Patentierung der mit neuer Gentechnik veränderten Pflanzen erzeugt Abhängigkeit und Unsicherheit im System und bringt die züchterische Freiheit in Gefahr. Ein vorbehaltloser Zugang zur genetischen Vielfalt ist nicht mehr selbstverständlich. Diese Unsicherheit wird noch weiter befeuert, wenn die Vermeidung von mit neuer Gentechnik hergestellten Pflanzen nur mit sehr hohem Aufwand möglich ist und gegebenenfalls Angaben des Herstellers über deren Herkunft notwendig sind. Damit ist allein die Tatsache, dass nun möglicherweise mit neuer Gentechnik erzeugte Pflanzen im Umlauf sind, eine tickende Zeitbombe für die kleinen und mittelständischen, unabhängigen und freien Pflanzenzuchtbetriebe in Europa.

Direkt damit verknüpft ist das Thema der Koexistenz. Sowohl der ökologische Landbau wie auch die gentechnikfreie Produktion in Europa konnten sich in den letzten 15 Jahren vor allem in Folge der Regelungen zur Koexistenz in einem relativ geschützten Raum entfalten. Anzeigepflicht für den GVO-Anbau, Abstandsregeln zu konventionell und biologisch bewirtschafteten Flächen sowie das Anbauverzeichnis (GVO-Standortregister) in Deutschland haben dazu geführt, dass GVO entweder nicht aufs Feld kamen oder ihr Anbau wieder beendet wurde, weil die berechtigten Interessen der vielen Nicht-GVO-Verwender in direkter Nachbarschaft zu massiv negativ beeinflusst worden wären. Ein weiterer Aspekt ist die

gesetzlich vorgeschriebene gesamtschuldnerische Haftung im Falle von GVO-Kontaminationen und dadurch erzeugten wirtschaftlichen Verlusten bei nicht-GVO Nutzern. Die Scheu vor Schadensersatzforderungen aufgrund von Kontaminationen trug in der Vergangenheit dazu bei, dass Produzent*innen und Landwirt*innen vom GVO-Anbau Abstand nahmen.

Mit der neuen Gentechnik kommen neue Unsicherheiten in die Diskussion um Koexistenz. Von Seiten der NGT-Befürworter*innen werden NGT natürlicher Züchtung gleichgestellt und damit einhergehend Unterscheidungs- und Nachweismöglichkeiten (s. Kasten Nachweisverfahren) in Zweifel gezogen. So soll die Frage nach der Koexistenz gar nicht erst aufkommen. Doch sowohl aus wissenschaftlicher wie auch aus patentrechtlicher Perspektive fehlt der Gleichstellung von NGT mit natürlicher Züchtung die Grundlage (vergl. Kapitel 6.2, 7.3). Wie in Kapitel 6.2 dargestellt, unterscheiden sich die Verfahren der neuen Gentechnik klar von natürlichen Prozessen (von der Überwindung der Zellmembran, über die Einführung der Transgene bis hin zur Manipulation der DNA). Gerade auf diese technischen Prozesse verweisen auch die Produzenten solcher Pflanzen, wenn es darum geht, für sie ein Patent zu beantragen – sowohl für die Herstellungsverfahren wie auch für die erzeugten Pflanzen und Produkte.

Mit dem Einsatz von NGT könnten zudem etablierte Märkte, die Tausende von Akteuren in der ökologischen und gentechnikfreien Produktion auf Wunsch der Verbraucher*innen aufgebaut und entwickelt haben, leichtfertig zerstört werden. Der Saatgutmarkt droht mit zunehmender Patentierung in die Hände weniger Akteure zu fallen, da die mit der Patentierung verbundene Rechtsunsicherheit und drohende Abhängigkeit für kleine und mittlere Züchtungsunternehmen ein zu großes Risiko darstellen würde. Auch die Landwirtschaft sähe sich einer weiteren Verschärfung der Abhängigkeit von wenigen Akteuren ausgesetzt, die den Saatgutmarkt und damit die Früchte, die auf dem Feld stehen, beherrschen. Resilienz, Regionalität, Wahlfreiheit und Kooperation entlang der Wertschöpfungskette von gleichberechtigten Akteuren wären zunehmend bedroht.

Gentechnik (und die damit einhergehende Patentierung) führt zu einer Verschärfung der Konzentrationsprozesse und steht damit einer transparenten und resilienten Lebensmittelproduktion, die auf Kooperation und Zusammenarbeit entlang der ganzen Wertschöpfungskette beruht, diametral gegenüber. Darüber hinaus untergräbt sie den systemischen Ansatz einer problemlösungsorientierten, neuen und kooperativen Landwirtschaft, die in Zusammenarbeit von Forschung, Züchtung und Praktiker*innen die ideale Lösung aus praktischen Herausforderungen entwickelt.

Aus den Auseinandersetzungen über die Gentechnik zu Beginn dieses Jahrhunderts wissen wir zudem, zu welchen sozialen Konflikten in den Dörfern die Diskussion um die Gentechnik geführt hat: Divergierende Risikoeinschätzungen, ein Mangel an Regeln und Vorgaben und eine mit Heilsversprechen aufgeladene Stimmung für die Gentechnik auf der befürwortenden Seite, die sich einem wachsenden Widerstand von Kritiker*innen der Gentechnik gegenüber sah.

Daraus lässt sich ableiten, dass Politik und Gesetzgebung schlecht beraten sind, wenn sie einer Technologie zu viel Raum (und Ressourcen) für ein fiktives und nicht erwiesenes Problemlösungs-Potenzial einräumen. Die Erfahrungen mit der bisherigen Gentechnik weltweit sprechen dafür, Vorsicht walten zu lassen und dem Vorsorgeprinzip und der Risikovorsorge den zentralen Platz einzuräumen.

7.3 PATENTE – AKTUELLE ENTWICKLUNGEN

Mit der Einführung der Gentechnik wuchs der Druck, Organismen als Erfindungen zu patentieren. So wurde die sogenannte Krebsmaus bereits 1992 vom Europäischen Patentamt (EPA) patentiert. Mit der EU-Patentrichtlinie 98/44/EC von 1998 wurden Patente auf gentechnisch veränderte Pflanzen möglich. Die von den USA ausgehende Entwicklung, Patente auf Pflanzen und Tiere und die technischen Verfahren zu ihrer Veränderung zu beantragen und zu erhalten, schuf Anreize zur gentechnischen Veränderung von Pflanzen und war ein wichtiger Treiber der in den vergangenen Jahrzehnten erfolgten Konzentration im Saatgutsektor auf vergleichsweise wenige internationale Akteure (Bonny 2017, Clapp 2018).

Grundsätzlich kann eine patentierte Pflanze nicht von anderen Züchtern zur Weiterzucht und Entwicklung von Sorten eingesetzt werden, es sei denn, es wurden Lizenzverträge vereinbart. Der im Sortenschutz geltende Züchternvorbehalt greift im Patentrecht nicht. Der Patentinhaber kann so Wettbewerbern verbieten, die vom Patent geschützte Pflanze mit Hilfe technischer Verfahren herzustellen und die erzeugten Pflanzen dann zu vermarkten. Die große Mehrzahl der Patentanmeldungen beim EPA und der erteilten Patente im Bereich Pflanzen betrifft gentechnisch veränderte Pflanzen – es wurden hierfür seit 1995 rund 8800 Patente angemeldet und ca. 3100 europäische Patente erteilt.⁶²

Auch Pflanzen aus neuer Gentechnik werden in Europa patentiert. Hier ist eine wachsende Zahl von beantragten und erteilten Patenten zu verzeichnen.⁶³ Die Großen der Branche, wie Corteva, Bayer, KWS, BASF und Syngenta sind die wichtigsten Antragsteller, begleitet von Newcomern wie Pairwise und Inari. Inari hat enge Verbindungen zur Nobelpreisträgerin Jennifer Doudna und sein Führungspersonal besteht zum Teil

aus früheren Mitarbeiter*innen von Syngenta und Bayer.

Für die Landwirtschaft und Züchtung von besonderer Bedeutung ist, dass sich die hier angemeldeten Patente oft nicht nur auf die technischen Verfahren erstrecken, sondern auch auf die biologischen Grundlagen der Züchtung. Betroffen hiervon sind u. a. natürlicherweise vorkommende Genvarianten, die mit NGT lediglich imitiert werden.

Sorgen, dass die zunehmende Zahl von Patenten, v. a. auch im Bereich der neuen Gentechnik, die mittelständische Züchtung, Landwirt*innen, Lebensmittelproduktion und Agrobiodiversität beeinträchtigt, nehmen zu. Ein Beispiel: 2022 wurde der KWS ein Patent auf Mais mit erhöhter Verdaulichkeit erteilt (EP3560330). Das KWS-Patent beansprucht Maispflanzen, unabhängig davon, ob diese aus Zufallsmutagenese (Verwendung spezifischer chemischer Stoffe oder physikalischer Reize wie Sonnenlicht, Bestrahlung) oder aus gentechnischen Verfahren stammen. Wie aus der Patentbeschreibung hervorgeht, wurden die entsprechenden Genvarianten ursprünglich in bereits existierenden Maispflanzen aus konventioneller Züchtung entdeckt.

Mehr und mehr werden herkömmlich gezüchtete Pflanzen, deren Mutationen zufällig entstanden, beansprucht: Ein Viertel der vom EPA in 2023 erteilten Pflanzen-Patente (an Firmen wie Nunhems/BASF, Enza Zaaften, KWS, Rijk Zwaan, Seminis/Bayer und ChemChina/Syngenta) betraf die konventionelle Züchtung diverser Pflanzenarten, z. B. Gurken, Mais, Melonen, Paprika, Raps, Spinat, Tomaten und Weizen.⁶⁴

Bei der Vergabe entsprechender Patente ignoriert das Europäische Patentamt die grundlegenden Unterschiede zwischen der neuen Gentechnik und der Nutzung von zufälligen Mutationen in der Pflanzenzucht: Zwar kann mit der Zufallsmutagenese die genetische Vielfalt erhöht werden, doch können auf diese Weise keine neuen Merkmale direkt und vorhersagbar herbeigeführt werden. Daher sind die Ergebnisse dieser Zufallsprozesse keine technischen Erfindungen im Sinne des Patentrechts. Es ist offensichtlich, dass Zufallsmutagenese diesbezüglich von gentechnischen Verfahren grundlegend zu unterscheiden ist.

Zusätzliche Kosten, rechtliche Unsicherheiten und neue Abhängigkeiten für traditionelle Züchter sind die Folge dieser Entwicklung, zumal viele der Pflanzensorten von mehr als einem Patent betroffen sind. Ein begrenzter Zugang zu genetischen Ressourcen gefährdet die Entwicklung klimaanangepasster Pflanzen und die Lebensfähigkeit der europäischen mittelständischen Züchtungsunternehmen. Weitere Folgen sind ein drohender Verlust der Agrobiodiversität sowie eine

⁶² <https://www.epo.org/de/news-events/press-centre/fact-sheet/447625#q1>

⁶³ https://www.testbiotech.org/sites/default/files/Testbiotech_%202023%20_%20CRISPR%20Patents.pdf

⁶⁴ <https://www.no-patents-on-seeds.org/sites/default/files/news/2024%20Bericht%20Keine%20Patente%20auf%20Saatgut.pdf>

verringerte Auswahl für die Landwirtschaft, Gartenbaubetriebe, die Lebensmittelherstellung und die Verbraucher*innen.

Das EU-Parlament hat nun in seinem Beschluss zur neuen Gentechnik (NGT) im Februar 2024 die EU aufgefordert, „keine Patente auf die biologischen Grundlagen der Pflanzenzucht zu erteilen und die Handlungsfreiheit und die Züchteraussnahme für Sorten zu wahren. Es sollte sichergestellt werden, dass Züchter vollständigen Zugang zu dem genetischen Material von NGT-Pflanzen haben, die per definitionem keine transgenen Pflanzen sind. (...) Die NGT-Pflanzen sollten daher nicht dem Patentrecht unterliegen, sondern zum Schutz des geistigen Eigentums ausschließlich dem System des gemeinschaftlichen Sortenschutzes gemäß der Verordnung (EG) Nr. 2100/94 des Rates, was die Inanspruchnahme der Züchteraussnahme ermöglicht.“⁶⁵ Ob dies im Rahmen des Europäischen Patentübereinkommens (EPÜ), das Grundlage für die Arbeit des EPA ist, überhaupt und gegebenenfalls wann umzusetzen ist, ist sehr fraglich, denn dem EPÜ gehören nicht nur die 27 EU-Mitgliedstaaten an, sondern 12 weitere nicht-EU-Mitglieder. Selbst wenn hier Einigkeit herrschen würde, müssten zur Vorbereitung einer diplomatischen Konferenz und der nachfolgenden Umsetzung der gesetzlichen Änderungen rund 10 Jahre veranschlagt werden.

Was die EU aber kurzfristig erreichen kann, ist die dringend notwendige Stärkung der bestehenden Patentierungs-Verbote im Hinblick auf die konventionelle Züchtung. Dieses Ziel kann schon durch eine Korrektur der Interpretation des bestehenden EPÜ erreicht werden, das EPÜ selbst müsste nicht geändert werden. Die Auslegung des Patentrechts kann durch den Verwaltungsrat des EPA korrigiert werden, der sich vier Mal im Jahr trifft. Hierfür wäre eine Dreiviertel-Mehrheit (30 von 39 Stimmen) ausreichend, die EU könnte 27 der erforderlichen 30 Stimmen einbringen. Bereits 2017 fand eine ähnliche Initiative der EU im Verwaltungsrat des EPA eine breite Mehrheit. Eine Vorlage für einen entsprechenden Text findet sich im österreichischen Patentgesetz, in dem schon 2023 entsprechende Veränderungen beschlossen wurden.

7.4 DEBATTE ÜBER NACHWEISVERFAHREN VON GVO

Der Event-spezifische Nachweis der DNA-Veränderung in GVO (in Futter- und Lebensmitteln) erfolgt allgemein mittels Polymerase-Kettenreaktion (PCR). Antragsteller für das Inverkehrbringen von GVO müssen Verfahren zum Nachweis und zur Identifizierung des GVO sowie Materialproben zur Verfügung stellen. Dies gilt grundsätzlich auch für neue GVO. Für mit neuer Gentechnik erzeugte GVO bedeutet jedoch der

spezifische GVO-Nachweis eine Herausforderung, da laut European Network of GMO Laboratories (ENGL) Methoden für deren Event-spezifische Identifikation nicht unmittelbar zur Verfügung stehen.⁶⁶ Dies diente häufig als Begründung für die Industrie-Forderung, auf den Nachweis neuer GVO und deren Kennzeichnung ganz zu verzichten.

Es wurden jedoch durchaus Vorschläge zum möglichen NGT-Nachweis entwickelt. So könnten neben etablierten PCR-Verfahren (und der Beobachtung des Phänotyps) Aspekte einbezogen werden, die für CRISPR/Cas charakteristisch sind, z. B. PAM-Sequenzen in der Nachbarschaft nachgewiesener Sequenzänderungen, die gleichzeitige Veränderung von Allelen oder Reste der Transgenintegration (Bertheau 2019). Im Falle der Einführung des CRISPR/Cas-Systems als RNA-Protein-Komplex wäre zu prüfen, ob nicht völlig abgebaute DNA aus dem Herstellungsprozess des Cas-Proteins auch in diesen Fällen integriert wurde (Andersson et al. 2018). Zudem kann die Sequenzierung des Gesamtgenoms sehr aufschlussreich sein. Biswas et al. (2020b) beschreiben ein Multiplex-Verfahren zum gleichzeitigen Nachweis von Mutationen der Zielsequenzen (on-target und off-target), die sich von natürlichen Variationen entsprechender Genombereiche unterscheiden lassen. Unbekannte off-target Effekte und Veränderungen außerhalb der Zielregion lassen sich so allerdings nicht erkennen. Auch Metabolomics-Verfahren und deren Weiterentwicklung werden empfohlen, um Veränderungen im Stoffwechsel von Genom-editierten Pflanzen nachzuweisen (Fraser et al. 2020). Bislang sind diese Verfahren jedoch sehr aufwendig und für Routineverfahren nicht geeignet.

NGT wird global unterschiedlich geregelt und eine Offenlegung von Daten über neue GVO ist nicht allgemein zwingend. Verunreinigungen durch nicht-zugelassene GVO – beispielsweise in importiertem Saatgut – stellen besondere Herausforderungen dar. Ribarits et al. (2021, 2022) schlagen zur Entwicklung von Nachweisverfahren deshalb ein international koordiniertes Vorgehen und die Nutzung öffentlich zugänglicher Daten über Forschungs- und Entwicklungsprojekte sowie zu Patenten vor. Ein internationales, öffentlich zugängliches Register für alle neuen GVO, die in Freisetzungen getestet und auf den Markt gebracht werden sollen, wird in diesem Zusammenhang gefordert.

Für eine der ersten mittels neuer Gentechnik (ODM) entwickelten und auf den kanadischen und US-amerikanischen Markt gebrachten Pflanzen, den Herbizid-resistenten Cibus-Raps, entwickelten Chhalliyill et al. (2020) ein spezifisches Nachweisverfahren. Laut Bundesamt für Verbraucherschutz (BVL)

⁶⁵ [https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/ALL/?uri=EP:P9_TA\(2024\)0067](https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/ALL/?uri=EP:P9_TA(2024)0067) (Erwägung 45a)

⁶⁶ <https://gmo-crl.jrc.ec.europa.eu/doc/JRC116289-GE-report-ENGL.pdf>; https://gmo-crl.jrc.ec.europa.eu/doc/JRC133689_kjna31521enn.pdf

⁶⁷ https://www.bvl.bund.de/SharedDocs/Downloads/06_Gentechnik/Ergebnisbericht_Ueberpr%C3%BCfung-und-Beurteilung-Nachweismethode-fuer-herbizidtoleranten-Raps.pdf?__blob=publicationFile&v=4

sei die Methode grundsätzlich geeignet, eine Punktmutation im Genom nachzuweisen, aber weder ausreichend spezifisch noch robust genug, weitere Forschung sei deshalb nötig.⁶⁷

Wie schon erwähnt, sind Antragsteller*innen, die in der EU einen GVO auf den Markt bringen wollen, verpflichtet, Event-spezifische Nachweisverfahren zu liefern und entsprechendes Referenzmaterial bereitzustellen. Die Verordnung 1830/2003/EG über die Rückverfolgbarkeit und Kennzeichnung von aus GVO bestehenden oder GVO enthaltende Produkte sowie daraus hergestellte Lebens- und Futtermittel besagt, dass all diese Produkte kennzeichnungspflichtig sind, es dabei aber keine Rolle spielt, ob diese Anwendung im Endprodukt nachweisbar ist. Zur plausiblen Überprüfung gilt das Prinzip der Rückverfolgbarkeit; geeignete Systeme sind für jeden GVO zu entwickeln. Diese Regeln gelten auch für neue GVO und daraus hergestellte Produkte, d. h. die Kennzeichnungspflicht ist nicht allein vom Nachweis abhängig. Teufel et al. (2024) verweisen darauf, dass derartige Rückverfolgbarkeitssysteme bereits in vielen Fällen etabliert und auch für neue GVO möglich sind. Sie fordern zudem, Unternehmen zu verpflichten, Kontaminationsrisiken in ihrer Lieferkette zu identifizieren und Anstrengungen zur Risikominimierung zu unternehmen.

Die Entwicklung geeigneter Nachweisverfahren für NGT wurde lange sträflich vernachlässigt, das ändert sich nun langsam: Jüngst wurde über Ansätze berichtet, mit denen sich bekannte Mutationen genomeditierter Linien nachweisen und wohl auch von konventionell gezüchteten Pflanzen unterscheiden lassen.⁶⁸ Auch die EU finanziert inzwischen Forschungsprojekte zum Nachweis pflanzlicher NGT-Produkte. Ziel des DARWIN-Projekts ist es, sowohl bekannte DNA-Sequenzen nachzuweisen (spezifischer Nachweis)⁶⁹ wie auch die Verfahren zu identifizieren, die zur DNA-Veränderung geführt haben (unspezifischer Nachweis). Digitale Lösungen zur Rückverfolgbarkeit werden ebenfalls gesucht. Der Biodachverband IFOAM und der Verband Lebensmittel ohne Gentechnik (VLOG) sind Teil des DARWIN-Konsortiums. Pionier-Arbeit in der Schaffung, Validierung und Anwendung neuer Nachweisverfahren für NGT und damit hergestellte pflanzliche und tierische Produkte soll auch im EU-finanzierten Projekt DETECTIVE geleistet werden.⁷⁰

Notwendig ist jedoch, dass die jeweilige NGT-Pflanze dokumentiert und bekannt sein muss. Antragsteller*innen müssen deshalb den Kontrollbehörden entsprechende Informationen und Referenzmaterial liefern – wie das in der EU für gentechnisch veränderte Pflanzen und Produkte längst der Fall ist. Die mit GVO-Nachweisen betrauten staatlichen und privaten Laboratorien sind dabei in die Lage zu versetzen, diese Verfahren

anwenden zu können. Denn zertifizierte Nachweisverfahren für NGT und verpflichtende Rückverfolgbarkeitssysteme sind entscheidend für den Erhalt der gentechnikfreien Landwirtschaft und Lebensmittelproduktion und der Wahlfreiheit für alle Marktbeteiligten und Verbraucher*innen.

⁶⁸ https://www.ble.de/SharedDocs/Meldungen/DE/2024/240702_genomeditierte_Pflanzen.html

⁶⁹ <https://darwin-ngt.eu/>

⁷⁰ <https://detective-ngt.eu/>

8. Blick in weitere Anwendungen

8.1 MOLECULAR FARMING – MEDIKAMENTE UND TIERISCHE EIWEISSE AUS PFLANZEN

Schon länger wird darüber diskutiert, neue Medikamente und tierische Eiweiße aus Pflanzen zu gewinnen. Die Euphorie, Impfstoffe einfach und billig mit Hilfe gentechnisch veränderter Pflanzen zu erzeugen, verblasste allerdings, als sich zeigte, dass Pflanzen, insbesondere wenn sie im Freiland wachsen, keine verlässlichen Produktionsorganismen sind, da die Expression der Gene und damit die Menge der produzierten Proteine durch äußere Bedingungen wie beispielsweise Temperatur, Feuchtigkeit, Schädlinge beeinflussbar ist. Sollten in gentechnisch veränderten Pflanzen Grundstoffe zur Impfstoffherstellung sowie andere Wirkstoffe erzeugt werden, stellt sich die Frage nach einer sicheren Separierung von der Lebensmittelproduktion. Denn Gentransfer und Vermischung müssten unbedingt vermieden werden, um die Lebensmittelsicherheit nicht zu gefährden.

Deshalb wurde vermehrt Tabak als Produktionspflanze für Medikamente propagiert, da er nicht als Lebensmittel dient. So soll es in Kanada begrenzte Freisetzungsversuche mit gentechnisch verändertem Tabak geben, der Interleukin produziert (gedacht als Medikament gegen Darmerkrankungen), erste Anbauanträge für vergleichbare Pflanzen sollen folgen.⁷¹

Biotech-Firmen propagieren das sogenannte Molecular Farming: Im Zuge der wachsenden Nachfrage nach veganen Lebensmitteln wird vermehrt überlegt, transgene Pflanzen als Produktionsstätte für tierische Proteine einzusetzen, deren Eigenschaften und Geschmack mit rein pflanzlichen Produkten nicht ohne weiteres erreichbar sind. So geht es um Milchproteine (Kasein) gewonnen aus Soja, Eiproteine (Ovalbumin) aus Kartoffeln oder Muskelproteine (Myoglobin) aus Mais (Vogel 2023). Doch die US-Food and Drug Agency (FDA) warnt die Branche vor Allergierisiken, denn die genannten Proteine könnten Allergien auslösen und für empfindliche Menschen auch in kleinsten Mengen gefährlich sein.⁷² Während die FDA warnt, verkündet der dem US-Landwirtschaftsministerium (USDA) unterstellte Animal and Plant Health Inspection Service (APHIS), transgene Soja der Firma Moolec, die Schweine-Muskelprotein bildet, unterliege nicht den US-Regeln für GVO, da kein erhöhtes Risiko als Schadorganismus (plant pest) zu erkennen sei. Moolec plant, die Piggy Sooy, deren Protein zu über 25 % aus Schweine-Myoglobin bestehen soll, nach einem Konsultationsprozess mit der FDA möglichst bald zu vermarkten.⁷³ Der Molecular Farming-Markt, an dem diverse andere Unternehmen ebenfalls interessiert sind, die beispielsweise

menschliche Wachstumsfaktoren oder Kasein in Gerste oder Kartoffeln produzieren wollen, soll denn auch in den nächsten Jahren massiv wachsen.⁷⁴

8.2 „GENE DRIVES“ ZUR AUSROTTUNG VON POPULATIONEN UNERWÜNSCHTER WILDARTEN

Mit Hilfe sogenannter Gene Drives sollen sich neu eingefügte Transgene in Wildpopulationen entgegen den Mendelschen Gesetzen verbreiten. Diese Organismen sind zweifelsfrei GVO. Die in ein Chromosom eingebauten DNA-Sequenzen für CRISPR/Cas (sowie weitere Gene, sogenannte Effektorgene) sollen in jeder Generation dafür sorgen, dass die eingeführten Sequenzen auch im homologen Chromosom auftreten. Weisen beide Chromosomen eines Paares die genetische Veränderung auf, kann sie auf alle Kreuzungsnachkommen vererbt werden. Abhängig von der Art der Effektorgene könnte im Extremfall die Gene Drive Technologie zum Aussterben von Populationen bzw. zum Ersatz natürlicher Populationen durch gentechnisch veränderte führen (CSS – ENSSER – VDW 2019, Simon et al. 2018). Propagiert werden Gene Drives zur Bekämpfung der Malaria oder zur Ausrottung invasiver Tierarten, aber auch zur Kontrolle von Pflanzenschädlingen wie der Kirschessigfliege (Gantz et al. 2015, Devos et al. 2021). Auch invasive Pflanzenarten und unliebsame Beikräuter sollen so beherrscht werden, indem beispielsweise Herbizid-resistente Populationen wieder empfindlich werden (Neve 2018, Liu et al. 2024).

Die einzubauenden Sequenzen für Cas-Nuklease und guide RNA (synthetische RNA zu Erkennung spezifischer DNA-Sequenzen) sowie für Regulations- und Effektorgene werden bei Gene Drives flankiert von Bereichen, die homolog zur adressierten Integrationsstelle (Erkennungssequenz) im jeweiligen Genom sind. Die Wahrscheinlichkeit für die ansonsten selten stattfindende DNA-Reparatur durch HDR (homology directed repair) wird dadurch erhöht (entspricht dem Fall SDN3). Abhängig vom jeweiligen Regulationssystem werden die integrierten CRISPR/Cas Sequenzen aktiviert und Cas-Protein und guide RNA gebildet (Hammond et al. 2021). Die Erkennungssequenz auf dem homologen Chromosom wird angesteuert und geschnitten. Bei der Reparatur des Doppelstrangbruchs durch HDR werden dann die CRISPR/Cas Sequenzen (inkl. Effektorgene) als Vorlage verwendet. Das soll sich in jeder Generation wiederholen, sodass möglichst alle Nachkommen einer Kreuzung etwa zwischen Gene Drive-Mücken und Wildtyp-Mücken gentechnische Veränderungen aufweisen, die die Übertragung der Malaria-Erreger behindern

⁷¹ <https://inspection.canada.ca/plant-varieties/plants-with-novel-traits/general-public/pmf/eng/1337444001505/1337444120102>

⁷² <https://www.fda.gov/media/167098/download>

⁷³ <https://www.greenqueen.com.hk/moolec-piggy-sooy-usda-approval-pork-soybeans-molecular-farming>

⁷⁴ <https://www.nongmoproject.org/blog/new-gmo-alert-molecular-farming-is-growing/>

(Gantz et al. 2015). Gemäß den Mendelschen Vererbungsregeln würden jeweils nur ca. 50 % der Kreuzungsnachkommen eine solche Veränderung tragen.

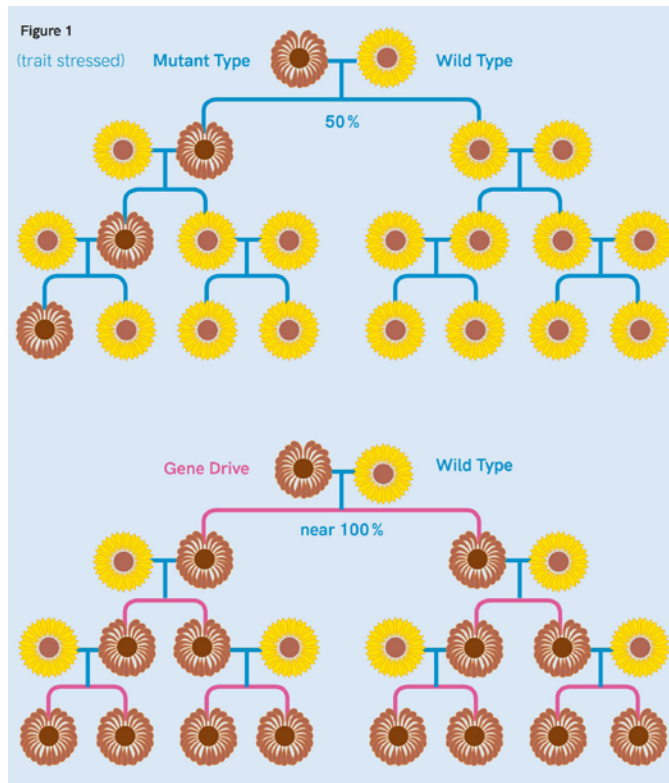


Abb. 2: Gene Drives – Vergleich mit Mendelscher Vererbung (nach CSS - ENSSER - VDW 2019, S. 23; <https://genedrives.ch/report/>): Eine Mutation, die einen Fitnessnachteil mit sich bringt, wird nach den Mendelschen Regeln (Vererbungsrate von 50 %) rasch aus einer Population verschwinden. Ein synthetisches Gene Drive System mit einer Vererbungsrate von nahe 100 % sorgt hingegen für die Ausbreitung der Eigenschaft, unabhängig von Fitnessseigenschaften. Aktuell beziehen sich die Gene Drive Ansätze vorwiegend auf Tiere, insbesondere Insekten.

Zielorganismen sind in der Regel unerwünschte Pathogene und invasive (Tier-)Arten. Die gentechnisch veränderten Varianten der Art sollen gezielt in einer Wildpopulation freigesetzt werden und diese innerhalb weniger Generationen stark dezimieren. Letztendlich könnte es sogar zum Zusammenbruch der Population kommen, sollten mehr als 50 % oder sogar alle Nachkommen ein bestimmtes nachteiliges Gen vom transgenen Elternteil erhalten. Auch wäre so möglich, nur männliche Nachkommen zu erzeugen.

In Kalifornien wurden Forschungen zu Gene Drives gegen Schädlinge im Obstbau wie z. B. die Kirschesigfliege (*Drosophila suzukii*) und bestimmte Blattflöhe finanziert (Henn & Imken 2021). Relativ weit fortgeschritten ist der Einsatz von Gene Drives beim Konsortium Target Malaria: Mit einem Gene Drive ausgestattete Malaria-Mücken (*Anopheles sp.*) sollen in West-

africa freigesetzt werden, um die dort natürlich vorkommende Mückenpopulation zu dezimieren oder sogar auszulöschen. Gene Drives könnten grundsätzlich auch bei (Wild)Pflanzen möglich und etwa zur Bekämpfung von Herbizid-resistenten Beikräutern einsetzbar sein, wie erste Projekte mit *Arabidopsis thaliana* vermuten lassen (Stokstad 2024). In den USA wurde diskutiert, ob mächtige Technologien wie Gene Drives auch zu einem nationalen Sicherheitsrisiko werden könnten (Callaway 2017).

Das Konsortium Genetic Control of Invasive Rodents, bestehend aus Wissenschaftler*innen aus USA, Australien und Neuseeland, argumentiert für den Einsatz von Gene Drives für Nagetiere, die auf Inseln die heimische Fauna verdrängen (Campbell et al. 2019). Das Narrativ, Probleme mit invasiven Arten ließen sich so elegant und ohne Giftstoffe lösen und gleichzeitig lasse sich die Ausbreitung von Gene Drive Organismen in andere Regionen verhindern, muss jedoch massiv in Frage gestellt werden, weil es eine Begrenzung (Containment) nur auf Inseln schlichtweg nicht gibt. Auch stellen Versuche, den Einsatz von Gene Drives durch lokale Entscheidungen zu legitimieren, laut Boersma et al. (2024) eine Instrumentalisierung lokaler Gemeinschaften für nicht-lokale Zwecke dar. In Brasilien sollten freigesetzte transgene Moskitos (der Virus-erkrankungen übertragenden Art *Aedes aegypti*) zur Verkleinerung der natürlichen Populationen führen, denn aufgrund der gentechnischen Veränderung sollten ihre Nachkommen nicht überlebensfähig sein. Dennoch konnten viele Nachkommen dieser Moskitos überleben, sich paaren und weiter ausbreiten (Evans et al. 2019)

8.3 GENTECHNIK UND NATURSCHUTZ

Seit den 1980er Jahren wurde in erster Linie an gentechnischen Anwendungen für Medizin, Technik und Landwirtschaft geforscht. Doch in den letzten Jahren wird zunehmend erwogen, natürlich vorkommende Wildorganismen, zum Teil sogar geschützte Arten, gentechnisch zu verändern, und transgene Wildorganismen für Zwecke des Arten- und Naturschutzes gezielt in Ökosystemen freizusetzen. Ein solcher Ansatz unterscheidet sich fundamental von den üblicherweise diskutierten landwirtschaftlichen Anwendungen neuer Gentechnik, da damit die absichtliche Freisetzung und Verbreitung von GVO außerhalb landwirtschaftlicher Flächen verbunden wäre (BfN 2022, Schell et al. 2019).

Ein circa 200 Seiten umfassender Bericht von Redford et al. (2019) für die International Union for Conservation of Nature (IUCN, Weltnaturschutzorganisation) führte zu einer sehr kontroversen Diskussion (Duesberg 2020). Thematisiert im Bericht

wurden vor allem gentechnische Anwendungen zur Stärkung der Widerstandsfähigkeit bedrohter Arten, Gene Drives und die sogenannte De-Extinction von ausgestorbenen Arten.

Insbesondere vor dem Hintergrund des Klimawandels und der zunehmenden Einschleppung und Verbreitung von Krankheitserregern wird diskutiert, bedrohte Wildarten durch gentechnische Veränderung widerstandsfähiger gegenüber abiotischen oder biotischen Stressoren zu machen (BfN 2022, Dege 2020, Then 2020). So wurde etwa daran geforscht, natürlich vorkommende Korallenarten durch deren gentechnische Veränderung oder durch transgene, mit ihnen in Symbiose lebende Mikroorganismen toleranter gegenüber warmem Wasser zu machen. Bei wildlebenden Amphibien sollte durch Gentechnik eine Resistenz gegenüber Chytridpilzen hervorgebracht werden.

Um eine intensive Landwirtschaft mit Pestizideinsatz weiterhin betreiben zu können, wurde vorgeschlagen, die Widerstandskraft von Honigbienen gegenüber Pestiziden zu erhöhen, indem die Insekten selbst oder in deren Darm lebende Bakterien gentechnisch verändert werden. So sollten pestizidresistente transgene Bienenvölker hervorgebracht werden (Schulte et al. 2014, Leonard et al. 2020, Lütke Schwienhorst 2020). Schadinsekten, die gegen Insektizide resistent wurden, sollten außerdem wieder empfindlich gegen diese Mittel werden (Kaduskar et al. 2022).

Auch Bäume, die bekanntermaßen einen besonders langen Lebenszyklus haben und oft Schlüsselpositionen in Ökosystemen innehaben, geraten verstärkt ins Visier der Gentechnik: In den USA wurde zum Beispiel eine gentechnisch veränderte Variante der Amerikanischen Esskastanie (*Castanea dentata*) entwickelt, die durch Einfügen eines Weizen-Gens tolerant sein soll gegen den Kastanienrindenkrebs, der große Bestände der Baumart in den USA geschädigt hatte (Then 2020). Die Krankheit wird durch den Pilz *Cryphonectria parasitica* verursacht, der zu Beginn des 20. Jahrhunderts von Ostasien nach Nordamerika eingeschleppt wurde. Doch auch abseits des nordamerikanischen Kontinents ist NGT ein Thema: So wird in Australien, das eine leidvolle Geschichte invasiver Arten hat, aktuell besonders intensiv über den Einsatz der Gentechnik zur „Rettung der Natur“ diskutiert.⁷⁵

„De-Extinction“ von ausgestorbenen Arten

Durch Klonen und gentechnische Verfahren sollen ausgestorbene Arten mit Hilfe von noch vorhandenem Genmaterial wieder neu erschaffen und später in Ökosysteme freigesetzt werden (BfN 2022, Then 2020, Kornfeldt 2020). „De-Extinction“ wird zum Beispiel für das ausgestorbene Wollhaarmammut (*Mammuthus primigenius*), die Wandertaube (*Ectopistes mig-*

ratorius) und den Dodo (*Raphus cucullatus*) erwogen. Quellen für Gen-Material sollen ausgestopfte oder in Permafrost eingefrorene Individuen sein. Auch bei derzeit vom Aussterben bedrohten Arten mit nur noch wenigen lebenden Individuen wurden Methoden zu deren „De-Extinction“ diskutiert. Beim Pyrenäen-Steinbock (*Capra pyrenaica pyrenaica*) scheiterte jedoch 1999/ 2000 ein Versuch, das letzte Tier zu klonen und in einer Leihmutter auszutragen: Die geklonten Kitze gingen als Fehlgeburten ab. Ein Tier starb kurz nach der Geburt (Zimmer 2013).

Generell stellt sich die Frage, wie eine ausgestorbene Population (wieder) in ein neues oder weiterhin an Ressourcen knappes Ökosystem angesiedelt und dauerhaft am Leben erhalten werden soll, wenn nicht gleichzeitig grundlegende Parameter, die zum Aussterben geführt oder es begünstigt haben, verändert werden. Wo beispielsweise das Wollhaarmammut ausreichend große Lebensräume und ein Nahrungsangebot finden sollte, bleibt offen. Zudem hätten diese „wiedererweckten“ Arten vermutlich nicht dieselben Eigenschaften wie die ausgestorbenen.

Gentechnisch veränderte Wildorganismen in Ökosystemen?

Im Positionspapier Gentechnik, Naturschutz und biologische Vielfalt des Bundesamts für Naturschutz (BfN) wurden die beschriebenen Gentechnik-Verfahren für Zwecke des Naturschutzes umfassend diskutiert und aus mehreren Gründen kritisch bewertet (BfN 2022). Auch der Deutsche Naturschutzring gelangt zu einer solchen Einschätzung: Grundsätzlich wäre eine transgene Wildart immer anders und keineswegs einer natürlich vorkommenden und durch natürliche evolutive Einflüsse „gewordenen“ Wildpopulation gleichzusetzen (Dege 2020).

Da Gene in der Regel nicht nur ein bestimmtes Merkmal, sondern oft mehrere komplexe chemische Reaktionsabläufe innerhalb von Zellen beeinflussen, kann selbst eine kleine Genomveränderung wie etwa eine durch CRISPR/Cas induzierte Punktmutation die Eigenschaften und das Verhalten eines Organismus in verschiedener Hinsicht wesentlich beeinflussen. Das ökologische Gleichgewicht kann sehr fragil sein und – auch bei vermeintlich kleinen Veränderungen der Rahmenbedingungen – irreversibel gestört werden. Während genetische Daten von Kulturpflanzen vielfach vorhanden sind, ist das Wissen bzgl. der Genetik und Eigenschaften von Wildpflanzen unzureichend.⁷⁶ Es wäre deshalb zu erwarten, dass transgene Wildpflanzen nicht nur die eine gewünschte zusätzliche Eigenschaft, sondern weitere unerwartete Eigenschaften zeigen würden. Unerwartete irreversible Veränderungen im Ökosystem und unbeabsichtigte Auswirkungen auf andere Arten wären dann wahrscheinlich. Dies könnte sich auch erst nach

⁷⁴ https://www.nytimes.com/2024/04/14/science/australia-wildlife-assisted-evolution.html?unlocked_article_code=1.kk0.K2Ky.OlinYiKNCfeN&smid=url-share&utm_source=Live+Audience&utm_campaign=e5a8c8bad3-briefing-dy-20240415&utm_medium=email&utm_term=0_b27a691814-e5a8c8bad3-49877056

⁷⁶ https://gfoe.org/sites/default/files/ngt_gfoe_final.pdf

mehreren Generationen oder bei veränderten Umweltbedingungen zeigen (BfN 2022).

Die Risikobewertung des GVO-Einsatzes auf landwirtschaftlichen Nutzflächen ist jetzt schon sehr komplex und aus Sicht von Umweltverbänden unzureichend. Doch eine Freisetzung von GVO in Naturräume, die der menschlichen Kontrolle entzogen sind und in denen unzureichend verstandene komplexe Wechselwirkungen zwischen den Arten und evolutive Prozesse eine wichtige Rolle spielen, würde die Unsicherheit um ein Vielfaches erhöhen.⁷⁷ Dies gilt umso mehr, als die von der EU-Kommission vorgeschlagene Deregulierung des Gentechnikrechts erlauben würde, verschiedene GVO mit den unterschiedlichsten Eigenschaften in natürlichen Populationen freizusetzen. Aufgrund der Vielzahl möglicher Auswirkungen und der komplexen Interaktionen in einem Ökosystem wäre die weitere Entwicklung weder vorhersehbar noch räumlich und zeitlich kontrollierbar: Mit Rückholbarkeit im Falle eines Schadens wäre nicht zu rechnen (Then 2020).

Im Falle invasiver Arten, eingeschleppter Pathogene und Schädlinge und abiotischer Stressoren ist hingegen auf die natürliche Resilienz von Ökosystemen zu setzen. Je mehr verschiedene Arten in einem Ökosystem vorkommen, umso wahrscheinlicher ist es, dass andere Arten die ökologische Nische einer durch Stressoren geschwächten Art zunächst einnehmen können. Je vielfältiger der Genpool einer unter Stress stehenden Art ist, desto größer ist die Chance, dass Gene für eine Toleranz oder Resistenz gegenüber dem neuen Stressor bereits im Genpool vorhanden sind und sie sich im Laufe der Zeit in der Population etablieren, so dass sich der Bestand der geschwächten Art wieder erholt.

Auch in Deutschland werden gentechnische Methoden zur Züchtung von Forstbäumen erwogen, die gleichermaßen bessere Rohstoffausbeute und Klimaresilienz versprechen.⁷⁸ Abgesehen davon, dass derartige Bäume kaum noch als Wildarten anzusehen wären, würde – falls erfolgreich – ein solches Vorgehen die natürliche Anpassung der Vegetation an den Klimawandel erschweren, die im Wesentlichen eine Nordverlagerung von Vegetationszonen und Artverbreitungen erfordert. Künstlich gegen neue Klimaverhältnisse resistent gemachte, einheimische Arten würden gegebenenfalls Nischen besetzt halten, die dringend für die Zuwanderung südlicherer Arten benötigt werden, die ihrerseits unter dem Druck neuer Klimaverhältnisse aus ihren bisherigen Verbreitungsgebieten im Mittelmeerraum abwandern müssen.

Natürliche Ökosysteme und das Genom von Wildpopulationen haben sich im Laufe von Jahrmillionen entwickelt. Ökosyste-

me wurden in der Vergangenheit schon mit sehr vielen neuen Einflüssen konfrontiert und entwickelten vielfältige Mechanismen der Anpassung. Sie benötigen deshalb weder heute noch in Zukunft die Gentechnik, um mit neu auftretenden abiotischen oder biotischen Stressoren zurechtzukommen, zumal die Risiken eines gentechnischen Eingriffs nicht abschätzbar sind.

⁷⁷ https://gfoe.org/sites/default/files/ngt_gfoe_final.pdf

⁷⁸ https://literatur.thuenen.de/digbib_extern/dn060910.pdf

9. Aktuelle gesetzliche Gentechnik-Regelungen – EU-Debatte zur Deregulierung

2001 wurde die Zulassung von gentechnisch veränderten Organismen (GVO) in der EU nach dem Vorsorgeprinzip geregelt: Nur zugelassene GVOs dürfen auf den Markt, nachdem sie auf ihre Risiken geprüft und bewertet wurden. Sie unterliegen gemäß der EU-Freisetzungsrichtlinie 2001/18/EG der Zulassungs- und Kennzeichnungspflicht, der Rückverfolgbarkeit und einem Monitoring.⁷⁹ Außerdem relevant ist die EU-Verordnung über gentechnisch veränderte Lebensmittel und Futtermittel sowie über die Rückverfolgbarkeit und Kennzeichnung von GVO.⁸⁰

In der EU gelten für Verfahren der neuen Gentechnik (NGT) derzeit dieselben strengen Regeln wie für ältere gentechnische Verfahren. Vor einer möglichen Nutzung müssen daher auch NGT-Produkte gemäß des geltenden EU-Gentechnik-Rechts ein Prüf- und Zulassungsverfahren durchlaufen, da sie mit Risiken verbunden sein können. Dass NGT-Anwendungen in der EU auch in Zukunft noch verantwortungsvollen Regularien unterliegen, ist jedoch nicht gesichert, denn seit 2018 intensivierte sich die Diskussion über die gesetzliche Regelung von NGT.

Der EuGH stellte 2018 fest: **Neue Gentechnik ist Gentechnik.** Initiiert durch eine Klage des französischen Landwirtschaftsverbandes Confédération Paysanne sowie anderen Verbänden vor dem französischen Staatsrat (Conseil d'État) stellte der Europäische Gerichtshof (EuGH) im Juli 2018 in einer Grundsatzentscheidung fest: „Durch Mutagenese gewonnene Organismen sind GVO und unterliegen grundsätzlich den in der GVO-Richtlinie vorgesehenen Verpflichtungen. (...) Mit „Mutagenese“ werden alle Verfahren bezeichnet, die es, anders als die Transgenese, ermöglichen, das Erbgut lebender Arten ohne Einführung einer fremden DNA zu verändern“.⁸¹ Damit steht fest, dass NGT gemäß geltendem EU-Gentechnik-Recht reguliert wird und bleibt.

Die EU-Kommission setzte 2021 jedoch einen Prozess in Gang, in dessen Folge viele der NGT-Anwendungen trotz des Urteils des EuGH dereguliert werden könnten. Dem gingen Diskussionen innerhalb der Mitgliedsstaaten voraus, die zum Teil schon

vorher Fakten schaffen wollten: So sollte in Deutschland 2015 mit neuer Gentechnik erzeugter Herbizid-resistenter Raps der Firma CIBUS freigesetzt werden, erst eine Klage (u. a. des BUND) hat dies verhindert.

Um eine europaweite Regelung zu erreichen, hatte der Rat der Europäischen Union die EU-Kommission zuvor im November 2019 um „eine Studie im Lichte des Urteils des Gerichtshofs in der Rechtssache C-528/16 zu dem Status neuartiger genomischer Verfahren im Rahmen des Unionsrechts“ gebeten. In der im April 2021 veröffentlichten Studie kam die EU-Kommission zum Schluss, für neue Verfahren brauche es neue Regeln.⁸²

Nach der Erstellung von Folgenabschätzungen sowie verschiedenen Konsultationsschritten stellte die EU-Kommission im Juli 2023 ihren Entwurf für eine Verordnung vor.⁸³ Neue Gentechnik wird darin als neue genomische Techniken (NGT) umschrieben, sie soll umfassend dereguliert werden. Der Vorschlag wurde anschließend Rat und EU-Parlament zur Beratung zugeleitet.

Im Februar 2024 haben sich EU-Parlament und Rat damit befasst, Positionen für die Verhandlungen der drei EU-Institutionen (Trilog) zu finden. Über die von der konservativen Berichterstatterin Jessica Polfjärd (Schweden) vorbereitete und im Januar 2024 im federführenden EP-Umweltausschuss (ENVI) verabschiedete Position wurde am 07.02.2024 im Plenum des Europaparlaments abgestimmt. Vor der Abstimmung appellierten Umwelt-, Verbraucher- und Landwirtschaftsverbände eindringlich an die Europaabgeordneten, das europäische Vorsorgeprinzip inklusive Risikoprüfungen für alle GVO sicherzustellen und die Deregulierung abzulehnen. Trotz dieser Kritik stimmte die Mehrheit der Abgeordneten (307) für eine umfassende Deregulierung, 263 stimmten dagegen und 41 enthielten sich.

Zentraler Ansatz des Verordnungsentwurfes ist, für NGT-Pflanzen die verpflichtende Risikoprüfung zu streichen. Die verabschiedete Position sieht vor, zwei Kategorien von NGT-

⁷⁹ <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/ALL/?uri=CELEX%3A32001L0018>

⁸⁰ <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/ALL/?uri=celex%3A32003R1829>

⁸¹ <https://curia.europa.eu/jcms/upload/docs/application/pdf/2018-07/cp180111de.pdf>

⁸² https://germany.representation.ec.europa.eu/news/studie-der-eu-kommission-zu-gentechnik-fur-neue-verfahren-braucht-es-neue-regeln-2021-04-29_de

⁸³ https://food.ec.europa.eu/plants/genetically-modified-organisms/new-techniques-biotechnology_en

Pflanzen einzuführen. NGT-1-Pflanzen sollen als gleichwertig zu konventionellen Pflanzen angesehen werden. Von den Anforderungen der Gentechnik-Gesetzgebung wären sie damit ausgenommen und auch eine Risikoprüfung wäre nicht mehr vorgesehen. Dies gilt auch für NGT-Wildpflanzen wie Bäume, Gräser und Algen, die jetzt ohne Risikoprüfung in die Umwelt gelangen könnten. NGT-2-Pflanzen sollen weiterhin die vorgesehenen Auflagen für gentechnisch veränderte Organismen erfüllen müssen.

Zwar wurden einige wichtige Änderungsanträge, die Kennzeichnung, Rückverfolgbarkeit, Umwelt-Monitoring und die Möglichkeit, Zulassungen zu widerrufen, zum Ziel haben, angenommen. So fand ein Änderungsantrag von Sozialdemokraten und Grünen für eine Kennzeichnungspflicht sämtlicher NGT-Pflanzen entlang der Wertschöpfungskette eine knappe Mehrheit von 317 zu 302 Stimmen. Eine zentrale Forderung von Umwelt- und Verbraucher*innen-Organisationen nach Wahlfreiheit wurde damit aufgegriffen. Auch eine verpflichtende Rückverfolgbarkeit hat das Parlament mehrheitlich beschlossen. Im Ökologischen Landbau sollen NGT-Pflanzen ausgeschlossen bleiben. Wie die Koexistenz mit einer gentechnikfreien Produktion gewährleistet werden soll, bleibt jedoch offen. Zudem wurde ein Verbot der Patentierung von NGT-Pflanzen gefordert.

Doch eine Vielzahl kritischer Punkte wurde gar nicht debattiert. Dazu gehört zuvorderst der Verzicht auf die bislang verpflichtende Umweltrisikoprüfung für die einzelnen NGT-1-Pflanzen. Die von der Kommission genannten Kriterien für eine Einstufung als NGT-1-Pflanze wurden vielfach als wissenschaftlich nicht begründet und mit dem Vorsorgeprinzip nicht vereinbar kritisiert, so vom Bundesamt für Naturschutz (BfN), der staatlichen französischen Agentur für Lebensmittel und Gesundheit (ANSES), der Gesellschaft für Ökologie oder dem Wissenschafts-Netzwerk ENSSER.^{84 85 86 87} Die ungelöste Patentierungsfrage und der Zweifel von Expert*innen, dass der Gesetzesentwurf überhaupt mit dem Vorsorgeprinzip und damit einem der Grundpfeiler der europäischen Verträge vereinbar ist, sind weitere Negativpunkte. Auch stellen sich Fragen hinsichtlich der Übereinstimmung mit dem auch in der EU gültigen Cartagena Protocol, einer internationalen Übereinkunft zur grenzüberschreitenden Verbringung von GVO.⁸⁸

Trotz dieser kleinen Lichtblicke ist das Ergebnis eine katastrophale Entscheidung. So missachteten die Beschlüsse sowohl

das Vorsorgeprinzip als auch das Verursacherprinzip, zentrale Eckpfeiler des europäischen Umwelt- und Verbraucherschutzrechts. Kosten für Maßnahmen zum Schutz der gentechnikfreien Produktion würden den Bäuer*innen und Unternehmen aufgebürdet.

Da es bis Ende Februar 2024 im Rat nicht zu einer gemeinsamen Position der Mitgliedstaaten kam, u. a. auch aufgrund der ungelösten Patentierungsfrage, konnten die Trilog-Verhandlungen vor der Europawahl nicht abgeschlossen werden. (In den Trilog-Verhandlungen wird üblicherweise aus den Vorschlägen der Kommission, der Position des EU-Parlaments und der Position der EU-Mitgliedsstaaten der neue Gesetzesrahmen verhandelt.)

Auch bei weiteren Treffen der EU-Mitgliedstaaten während der ungarischen Ratspräsidentschaft fand sich keine qualifizierte Mehrheit für eine gemeinsame Position: Den Mitgliedstaaten, die sich für die Deregulierung einsetzen, stehen hinreichend viele Länder, die sie ablehnen, gegenüber, wobei sich Deutschland aufgrund unterschiedlicher Positionen der Koalitionspartner regelmäßig enthielt. So startet der Rat auch 2025 (zunächst unter polnischer, dann im zweiten Halbjahr unter dänischer Führung) ohne geeinte Ratsposition – und mit weiterhin unbeantworteten Fragen zu Risikoprüfung, Patentierung, Koexistenz und Wahlfreiheit. In der Auseinandersetzung um eine folgenschwere Deregulierung der Neuen Gentechnik sind die kommenden Monate aber voraussichtlich entscheidend.

⁸⁴ <https://www.bfn.de/en/publications/policy-brief/science-based-regulation-plants-new-genetic-techniques>

⁸⁵ <https://www.anses.fr/en/content/plants-derived-new-genomic-techniques-analysis-category-1-inclusion-criteria-proposed>,
<https://www.anses.fr/en/content/ntg-en>

⁸⁶ https://gfoe.org/sites/default/files/ngt_gfoe_final.pdf

⁸⁷ <https://ensser.org/publications/2023/statement-eu-commissions-proposal-on-new-gm-plants-no-science-no-safety/>

⁸⁸ https://biosicherheit-bch.de/BCH/DE/CartagenaProtokoll/CartagenaProtokoll_node.html, <https://biosafety-info.net/new-publications/why-genome-edited-organisms-are-not-excluded-from-the-cartagena-protocol/>

10. Politische und gesellschaftliche Debatte – Akteure, Verbraucher*innen-Einstellungen, Ethik

Die Ablehnung von Verbraucher*innen gegenüber gentechnischen Veränderungen an den Lebensmitteln auf ihrem Teller hat die politische Debatte lange geprägt – und ist weiterhin ausschlaggebend für die gesellschaftliche Stimmung gegenüber Gentechnik. Das gilt auch für die sogenannte neue Gentechnik: Mehr als 80 % der Verbraucher*innen haben in Umfragen der letzten Jahre konstant angegeben, gentechnisch veränderte Lebensmittel abzulehnen; noch höher war regelmäßig der Prozentsatz derer, die sich eine Kennzeichnung wünschten.⁸⁹

Für die Auseinandersetzung wie auch die politischen Vereinbarungen, die in den letzten Jahrzehnten erreicht wurden, waren neben der Risikodebatte vor allem die Frage der Transparenz und Wahlfreiheit von Verbraucher*innen, aber auch von Landwirt*innen und Lebensmittelunternehmen entscheidend. Zu Kosten-Nutzen-Abwägungen gesellten sich ethische Überlegungen und welche Bedeutung beides in Politik und Gesellschaft hat.

Die Sicherung der Koexistenz war ein zentrales Thema und führte in Deutschland zu Verordnungen, die Mindestabstände zwischen GVO- und nicht-GVO-Flächen sowie Haftungsregelungen im Falle von GVO-Verunreinigungen in Ernteprodukten vorgeben. Insbesondere der Biobereich, in dem die Gentechnik durch EU-Gesetze und Anbau Richtlinien der Verbände verboten ist, sucht sich zu schützen und fordert, dass das Verursacherprinzip umgesetzt wird. Gemeinsam mit Landwirtschafts-, Umwelt- und Verbraucherverbänden sowie der lokalen Politik wurden Gentechnik-freie Regionen eingerichtet.⁹⁰ Zudem wurde von der Bundesregierung 2010 das Kennzeichen Ohne GenTechnik für Produkte von Tieren, die ohne GVO gefüttert werden, etabliert, um so auch den Käufer*innen konventioneller tierischer Lebensmittel ein Mindestmaß an Wahlfreiheit zu sichern.⁹¹ Rund 16.000 Lebensmittel tragen dieses Siegel inzwischen – vor allem bei Milchprodukten ist Ohne Gentechnik mittlerweile eher die Regel als die Ausnahme.

Doch aus der Debatte der letzten Jahrzehnte hat die Lobby der Unternehmen, die gentechnisch verändertes Saatgut ent-

wickeln und verkaufen wollen, Lehren gezogen. So war die gesellschaftliche Diskussion und Wahrnehmung bei den ersten transgenen Sorten geprägt vom öffentlichen Unverständnis gegenüber einer Technik, die Artgrenzen ignoriert, und beispielsweise tierische Gene in Pflanzen einbauen will. Nicht wenigen erschien dies als fast Frankenstein'scher Eingriff in Biologie und Natur, entsprechend wurde auch die Bebilderung in Publikationen und für Aktionen gestaltet.

Vor diesem Hintergrund und unterstützt von der sowieso geführten Auseinandersetzung über das Naturverständnis und das Recht der Menschheit, Natur tiefgreifend zu verändern, entwickelte sich eine rege Debatte um die ethische Bewertung der gentechnischen Veränderung von Lebewesen. Auf der Seite der Befürworter*innen gentechnischer Eingriffe und Veränderungen fanden sich auch in den 1990ern und 2000ern schon Institutionen wie Acatech, die nicht nur mit einer Berechtigung menschlicher Eingriffe argumentierten, sondern sogar mit einer Pflicht zur Veränderung von Natur, wenn damit ein höherer Nutzen für die Menschheit verbunden sei.

Diese Position hat sich trotz der offensichtlich nicht erfüllten Versprechen der GVO der 1. Generation und deren negativen Auswirkungen auf Umwelt und Landwirtschaft (vergl. Kapitel 7.1) kaum geändert, und wird weiterhin sowohl von Wissenschaftler*innen und Forschungsinstitutionen, aber auch von Industrievertreter*innen und Politiker*innen verteidigt.

Insbesondere Richtung Politik scheint in den letzten Jahren dazu massiv PR-Arbeit unternommen worden zu sein. Fast mantraartig und deutlich breiter aufgestellt werden in der Diskussion um die neue Gentechnik nicht nur von mehreren konservativen und liberalen Abgeordneten mögliche Vorteile der Gentechnik thematisiert, sondern beispielsweise auch von Teilen der Grünen und einigen Umweltjournalist*innen die bisherigen kritischen Einstellungen zur Gentechnik hinterfragt.

Vor allem bei den letzteren Gruppen ist dies vermutlich mit dem neuen Versprechen der Gentechnik-Industrie verknüpft, Klimaanpassung zu schaffen und damit die Klimakrise be-

⁸⁹ <https://www.foodwatch.org/de/repraesentative-umfrage-deutliche-mehrheit-befuerwortet-kennzeichnung-und-risikopruefung-von-neuer-gentechnik>, <https://www.keine-gentechnik.de/dossiers/meinungsumfragen>; <https://bfm.bsz-bw.de/frontdoor/deliver/index/docId/1861/file/brs248.pdf>

⁹⁰ <https://www.gentechnikfreie-regionen.de/>

⁹¹ <https://www.ohnegentechnik.org/>

wältigbar zu machen. Wie weit es dieses, in der Tradition der vorherigen großen Versprechungen der Gentechnikindustrie stehende und bis dato völlig unbelegte Versprechen in die politische Debatte geschafft hat, zeigt allein schon seine Nennung in der farm-2-fork-Strategie, also der Ausformulierung der Europäischen Kommission zu landwirtschaftlichen Aspekten für einen Green European Deal.

Gleichzeitig wird bei allen traditionell eher Gentechnik-kritischen Gruppierungen inzwischen eine deutlich geringere Beachtung des ethischen Arguments sichtbar – so gibt es in der aktuellen Debatte kaum Konservative, die auf der Basis eines christlichen Wertrahmens gegen die Nutzung von Gentechnik argumentieren. Auch in den Kirchen scheint die Diskussion weniger intensiv zu sein, insbesondere in der Evangelischen Kirche wird vermehrt die Frage nach Nutzen und Abwägung gestellt. Vom Kommissariat der Katholischen Bischöfe wurde hingegen der Entwurf der EU-Kommission zur Deregulierung der neuen Gentechnik als gegen das Vorsorgeprinzip verstößend kritisiert.⁹² Diese Entwicklung trifft auf eine Gesellschaft, die insgesamt technologieaffiner geworden ist und in anderen Bereichen (von der Digitalisierung und Robotik bis hin zur Debatte um Laborfleisch) vermeintlich die (positive) Erfahrung konkreter Lösungen oder Lösungsmöglichkeiten gemacht hat.

Der Aufruf „Follow the science“ der Klimabewegung wird vor diesem Hintergrund in der Gentechnikdebatte von Forschenden und Unternehmen aufgegriffen und propagiert, ohne dass jedoch kritische wissenschaftliche Stimmen stärker einbezogen würden. Sowohl konkrete fachliche Problembereiche (z. B. on- und off-target-Effekte, Effekte von Genomveränderungen auf Stoffwechsel und Wechselwirkungen der Organismen) wie auch interdisziplinäre Bewertungen (von Ökolog*innen, Naturschützer*innen, aber auch Agrarwissenschaftler*innen verschiedener Disziplinen, Entwicklungsökonom*innen usw.) werden nicht ausreichend ernstgenommen. Zu beobachten sind die unkritische Bewerbung von GVO mit nicht belegten Versprechungen, Interessenskonflikte durch Forschende, die gleichzeitig Patente anmelden wie auch das Ignorieren wissenschaftlicher Einwände gegen die im Kommissions-Entwurf getroffenen Definitionen und Einstufungen von mit neuer Gentechnik erzeugten Organismen.

Dabei profitierte die PR-Arbeit der Gentechnik- und Agrochemie-Industrie nicht nur von den schon genannten beiden Punkten (Dringlichkeit der Klimaanpassung und insgesamt höhere Bereitschaft, Technologien positiver zu bewerten als vor zehn oder zwanzig Jahren). Sie machte sich auch zunutze, dass neue Gentechnik komplexer Erklärungen bedarf. Die – leichter

darzustellende – Einfügung von Fremdgenen über Artgrenzen hinweg steht nicht mehr im Zentrum der neuen Gentechnik, auch wenn sie in der Regel weiterhin Voraussetzung für den Einsatz von CRISPR/Cas ist. Die Erzählung lautet jetzt: Gene werden ausgeschaltet oder synthetisch erzeugte Genabschnitte eingefügt – und das präzise.

Strategisch gut vorbereitet von Unternehmen und Lobbyist*innen wurde dieses Narrativ früh an politische Entscheider*innen und Journalist*innen und in den letzten Jahren auch an die breitere Öffentlichkeit kommuniziert. Sogar die Benennung wurde entsprechend geändert. Obwohl die juristische und gesetzliche Einstufung von CRISPR/Cas und anderen Methoden der neuen Gentechnik klar ist – es handelt sich um gentechnische Eingriffe – wurde zunächst der Begriff „neue Züchtungstechniken“ lanciert. Er ließ sich jedoch nicht breit durchsetzen. „Neue genomische Techniken/Verfahren“ bzw. „new genomic techniques“ sind die nun am weitesten verbreiteten Benennungen, um den Begriff gentechnisch veränderter Organismus zu vermeiden.

Ein Punkt, der in der öffentlichen und politischen Debatte um Gentechnik von Anfang an eine große Rolle spielte, ist die Wahlfreiheit – und wie sie sich sichern lässt. Wahlfreiheit fordern alle: Verbraucher*innen wollen wissen, was auf ihren Tellern landet, und Landwirt*innen und Lebensmittelproduzent*innen wollen nicht den Vorgaben von Biotechunternehmen unterworfen sein. Um GVO-Kontaminationen zu vermeiden, sind Koexistenz-Regeln unerlässlich. Dies gilt in besonderem Maße für den ökologischen Anbau und die ökologische Lebensmittelproduktion, ist hier doch der Einsatz der Gentechnik durch Gesetze und Vorgaben der Verbände untersagt.

Klar ist, dass vor dem Hintergrund der breiten Ablehnung von GVO durch die Mehrheit der Verbraucher*innen eine politische Deregulierung aus Sicht der Industrie vor allem die Abschaffung der Kennzeichnungspflicht beinhalten muss. Denn fehlt die Kennzeichnung, haben Verbraucher*innen keine Chance, sich gegen GVO zu entscheiden, und Landwirt*innen und Lebensmittelunternehmen müssen einen immensen Aufwand betreiben, um GVO aus ihrer Produktion herauszuhalten. Wie gefährlich das von der Industrie wahrgenommen wird, zeigen beispielsweise Klagen in den USA gegen Kennzeichnungsvorgaben und per Gerichtsentscheid angeordnete Rücknahmen von solch einem labelling. Dass in Europa derzeit kaum GVO angebaut werden, liegt eben auch daran, dass die europäischen Bürger*innen die Entscheidungsmöglichkeit haben – und dass es Vorgaben zur Koexistenz gibt,

⁹² <https://kath-buero.de/wp-content/uploads/2023/12/231215-KB-Stellungnahme-NGT-Verordnungsentwurf.pdf>

die sowohl konkrete Maßnahmen vorschreiben wie auch die Haftung regeln.

Dass die Frage der Patentierung die Debatte im Europäischen Parlament wie im Rat bestimmte, verwundert kaum. Denn die drohende Ausweitung der Patentierung von Pflanzen und damit die Ausweitung des Zugriffs weniger großer Unternehmen aufs Saatgut wie auf die Lebensmittelversorgung mobilisiert nicht nur Landwirt*innen, sondern die gesamte Gesellschaft. Züchtung für eine zukunftsfähige Landwirtschaft muss weiterhin unbegrenzten Zugang zu genetischen Ressourcen haben, die nicht von einer Handvoll globaler Unternehmen kontrolliert werden dürfen.

Festzuhalten bleibt, dass sich die gesellschaftliche Debatte über die letzten Jahrzehnte verändert hat. Sowohl die einzelnen Positionen als auch die Gewichtung von Argumenten haben sich verschoben. Eine immer komplexere Debatte trifft auf eine gut vorbereitete und leichter verfangende Pro-Argumentation. Dabei sind viele der Fragen die gleichen geblieben: Welche Risiken bergen GVO für Mensch und Umwelt? Wie kann die Wahlfreiheit bei allen Akteuren gewährleistet bleiben? Was ist mit der Koexistenz, und wie geht die globale Gesellschaft mit Patenten auf Pflanzen und der Konzentration im Saatgutbereich um?

11. Ausblick

Umwelt- und sozialverträgliche Alternativen zur gentechnischen Veränderung von Organismen sind durchaus vorhanden: Sinnvoll ist eine vielfältige, an lokale Bedingungen angepasste Landwirtschaft, die nicht auf Monokulturen und Pestizideinsatz setzt, sondern auf agrarökologische Methoden, die den Boden und die Artenvielfalt schützen. Entgegen der Aussage, für rasche Züchtungserfolge bedürfe es stets der Gentechnik, kann konventionelle Züchtung mithalten und bringt sogar häufig schnellere Erfolge, zu beobachten beispielsweise bei der Züchtung von trockenheitstolerantem Mais oder Bohnen (Gilbert 2014, 2016). Zudem tragen pflanzengenetische Ressourcen (sogenannte „alte Landsorten“), die gesammelt wurden und heute in Genbanken aufbewahrt werden, vielfältige Resistenzen und andere vorteilhafte Eigenschaften in sich, die es zu entdecken gilt. Alte Landsorten sind bereits wichtige Ressourcen für die Züchtung stresstoleranter Pflanzen (Dwivedi et al. 2016). „Let’s liberate diversity!“

Agroforstsysteme, regionale Kreisläufe und weitere zukunftsweisende Ansätze wie Urban Farming und Solidarische Landwirtschaft (SoLaWi) gilt es zu fördern und weiterzuentwickeln. Insbesondere der ökologische Anbau liefert, ganz ohne Gentechnik, gesunde Lebensmittel. Er wirtschaftet klima- und umweltverträglicher und erbringt viele gesellschaftliche Leistungen: Im Vergleich zu konventioneller Produktion führt er zudem zu mehr Biodiversität, erheblich weniger Nitrat im Grundwasser, höherer Kohlenstoffbindung im Boden und geringerem Energieverbrauch.⁹³ Internationale Studien zeigen, dass eine diversifizierte Landwirtschaft nicht nur positive ökologische Wirkungen erzeugt, sondern auch soziale Vorteile, etwa für die bäuerliche Landwirtschaft, mit sich bringt (Rasmussen et al. 2024). Agrarökologie verbessert darüber hinaus die Lebensmittelsicherheit und Ernährung allgemein (Bezner Kerr et al. 2021). Auch der Weltagrarrat (International Assessment of Agricultural Knowledge, Science and Technology for Development, IAASTD) forderte in seinem Bericht die Ausdehnung agrarökologischer Methoden und die Förderung von Kleinbauern, Agrogentechnik, Agrochemie und Patente wurden dagegen kritisch hinterfragt.⁹⁴

Deshalb ist der richtige Weg in eine gute Zukunft: Ausbau einer ökologischeren Land- und Lebensmittelwirtschaft und agrarökologischer Methoden sowie Förderung dieser Entwicklung durch ausreichend (öffentlich finanzierte) Ressourcen in Wissenschaft und Forschung, um eine umwelt- und sozialverträglichere Landwirtschaft und Züchtung zu etablieren.⁹⁵ Gentechnische Veränderungen von Lebewesen und Patente auf Pflanzen sind hierfür nicht notwendig, sondern kontraproduktiv.

⁹³ <https://www.fibl.org/de/infotek/meldung/vorteile-des-biolandbaus-auf-den-punkt-gebracht>

⁹⁴ <https://www.unep.org/resources/report/agriculture-crossroads-global-report>

⁹⁵ https://www.bund.net/fileadmin/user_upload_bund/publikationen/landwirtschaft/bund_positionen_Landwirtschaft_2022.pdf

12. Glossar

Allele:	spezifische Varianten eines Gens an einem bestimmten Genort
Aminosäuren:	Bausteine der Proteine
Basen:	Bausteine der DNA (Adenin, Cytosin, Guanin, Thymin), mit spezifischer Paarung (A+T und C+G)
Cash crops:	Landwirtschaftliche Kulturen, die auf großen Flächen vielfach zu Exportzwecken angebaut werden, z. B. Soja, Mais, Reis, Weizen, Baumwolle.
Cas:	CRISPR-assoziiert, Schneideprotein des CRISPR/Cas-Systems
Cisgene Pflanze:	GVO mit Gen(en) aus kreuzungsfähigen Pflanzen
CRISPR/Cas:	Clustered Regularly Interspaced Short Palindromic Repeats (kurze sich regelmäßig wiederholende palindromische DNA-Sequenzen im Erbgut von Bakterien)/CRISPR-assoziiert
DNA:	deoxyribonucleic acid – Desoxyribonukleinsäure, doppelsträngiges Erbmaterial, aus Nukleotiden aufgebaut
Enzyme:	Proteine, die spezifische Reaktionen bewerkstelligen (z. B. DNA-spaltende Nuklease)
Event:	individueller Fall der gentechnischen Veränderung (z. B. MON810 Mais)
Frameshift:	Verschiebung des DNA-Leserahmens (je drei Nukleotide bestimmen eine Aminosäure)
Gen:	Abfolge von Nukleotiden, enthält in der Regel Information für Protein(e)
Genetische Information:	begründet in der Sequenz der 4 Basen
Genom:	Gesamtheit aller Gene eines Organismus
GVO:	Gentechnisch veränderter Organismus
Krebs-Maus:	Gentechnisch veränderte Maus, die besonders rasch an Krebs erkrankt und 1992 vom Europäischen Patentamt als erstes Säugetier patentiert wurde.
mRNA:	messenger ribonucleic acid – Boten RNA zur Proteinherstellung
Mutation:	Veränderung des Erbmaterials (DNA, Chromosomen, Chromosomenzahl)
Neue Gentechnik:	CRISPR/Cas und andere Sequenz-spezifische Nukleasen
NGT:	Neue Genomische Techniken
Nukleotid:	Baustein der DNA aus Base, Zucker, Phosphorsäure
ODM:	oligonucleotide directed mutagenesis – Genomeditierungstechnik unter Nutzung der Oligonukleotid-gelenkten Mutagenese
Oligonukleotid:	aus mehreren Nukleotiden bestehende Sequenz
Omics:	Verfahren zum Studium von Molekülgruppen, z. B. Genom (Genomics), mRNA (Transcriptomics), Proteinen (Proteomics) und Metaboliten (Metabolomics)
Plasmid:	ringförmiges DNA-Molekül
RNA:	ribonucleic acid – Ribonukleinsäure, Kopie eines DNA-Abschnitts (enthält anstelle von Thymin Uracil)
SDN:	site-directed nuclease, Genomeditierungstechniken unter Einsatz sequenzspezifischer Nukleasen
Stacked traits:	Verschiedene (gentechnisch erzeugte) Eigenschaften, die in einer Pflanze kombiniert werden, z. B. Herbizidresistenz und Insektenresistenz
Transgen:	in Organismus anderer Art übertragenes Fremdgen
Vektor:	Überträgersystem für DNA (z. B. Plasmid)

13. Quellen

- Agapito-Tenfen, S.Z., Okoli, A.S., Bernstein, M.J., Wikmark, O.G., Myhr, A.I. (2018) Revisiting risk governance of GM plants: The need to consider new and emerging gene-editing techniques. *Front Plant Sci* 9:1874, <https://www.frontiersin.org/journals/plant-science/articles/10.3389/fpls.2018.01874/full>
- Ahmar, S., Hensel, G., Gruszka, D. (2023) CRISPR/Cas9-mediated genome editing techniques and new breeding strategies in cereals – current status, improvements, and perspectives. *Biotech Adv* 69 <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0734975023001556?via%3Dihub>
- Altpeter, F., Springer, N.M., Bartley, L.E., Blechl, A.E., Brutnell, T.P. et al. (2016) Advancing Crop Transformation in the Era of Genome Editing. *Plant Cell Adv*, doi:10.1105/tpc.16.00196
- Andersson, M., Turesson, H., Olsson, N., Fält, A.S., Ohlsson, P., Gonzalez, M.N. et al. (2018) Genome editing in potato via CRISPR-Cas9 ribonucleoprotein delivery. *Physiol Plant* 164:378-384, <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1111/ppl.12731>
- Andrioli, A. (2020) Brasilien zwischen Hoffnung und Illusion. Kritische Blicke auf ein Land in der (Öko-) Krise, Oekom Verlag, München
- Arencibia, A.D., D'Afonseca, V., Charavarthi, M., Castiglione, S. (2019) Learning from transgenesis: Advanced gene editing technologies should also bridge the gap with traditional genetic selection. *J Biotech* 41:22-29, <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0717345819300302>
- Arien, Y., Dag, A., Zarchin, S., Masci, T., Shafir, S. (2015) Omega-3 deficiency impairs honey bee learning. *PNAS* 112:15761-15766 <https://www.pnas.org/doi/full/10.1073/pnas.1517375112>
- Bauer-Panskus, A., Miyazaki, J., Kawall, K., Then, C. (2020) Risk assessment of genetically engineered plants that can persist and propagate in the environment. *Environ Sci Eur* 32:32, <https://link.springer.com/content/pdf/10.1186/s12302-020-00301-0.pdf>
- Benbrook, C.M. (2016) Trends in glyphosate herbicide use in the United States and globally. *Environ Sci Eur* 28:3, doi: 10.1186/s12302-016-0070-0
- Benessia, A., Barbiero, G. (2015) The impact of genetically modified salmon: from risk assessment to quality evaluation. *Visions Sustain* 3:35-61 doi: 10.7401/visions.03.0
- Benevenuto, R.F., Venter, H.J., Zanatta, C.B., Nodari, R.O., Agapito-Tenfen, S.Z. (2023) Alterations in genetically modified crops assessed by omics studies: Systematic review and meta-analysis <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924224422000024?via%3Dihub>
- Bertheau, Y. (2019) New breeding techniques: detection and identification of the techniques and derived products. In: *Encyclopedia in food chemistry. Reference Module in Food Science*, doi: 10.1016/B978-0-08-100596-5.21834-9 <https://m2.mtmt.hu/api/publication/31268072?labelLang=eng>
- Beying, N., Schmidt, C., Pacher, M., Houben, A., Puchta, H. (2020) CRISPR-Cas9-mediated induction of heritable chromosomal translocations in Arabidopsis. *Nature Plants* 6:638-645, <https://www.nature.com/articles/s41477-020-0663-x>
- Bezner-Kerr, R., Madsen, S., Stüber, M., Liebert, J., Enloe, S. et al. (2021) Can agroecology improve food security and nutrition? A review. *Global Food Sec* 29:100540, <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S221191242100050X>
- BfN (2022) Gentechnik, Naturschutz und biologische Vielfalt – Grenzen der Gestaltung. <https://www.bfn.de/aktuelles/gentechnik-naturschutz-und-biologische-vielfalt-grenzen-der-gestaltung>
- Biswas, S., Tian, J., Li, R., Chen, X., Luo, Z., Chen, M. et al. (2020a) Investigation of CRISPR/Cas9-induced SD1 rice mutants highlights the importance of molecular characterization in plant molecular breeding. *J Genetics Genomics*, doi: 10.1016/j.jgg.2020.04.00
- Biswas, S., Li, R., Hong, J., Zhao, X., Yuan, Z., Zhang, D., Shi, J. (2020b) Effective identification of CRISPR/Cas9-induced and naturally occurred mutations in rice using a multiplex ligation-dependent probe amplification-based method. *Theor Appl Genetics*, <https://link.springer.com/article/10.1007/s00122-020-03600-5>
- Boersma, K., Bovenkerk, B., Ludwig, D. (2024) No Such Thing as Containment? Gene Drives for Conservation and the (Im)possibility of an Island. *Philos Technol* 37:75, <https://edepot.wur.nl/662307>
- Bohn, T., Millstone, E. (2019) The introduction of thousands of tonnes of glyphosate in the food chain—an evaluation. *Foods* 8:669, doi:10.3390/foods8120669s
- Bombardi, L. (2024) Chemischer Kolonialismus. *GID* 269:22-23, <https://www.gen-ethisches-netzwerk.de/anbau/internationaler-handel-und-handelspolitik/269/chemischer-kolonialismus>
- Bonny, S. (2017) Corporate concentration and technological change in the global seed industry. *Sustainability* 9:1632, <https://www.mdpi.com/2071-1050/9/9/1632>
- Borrelli, V.M.G., Brambilla, V., Rogowsky, P., Marocco, A., Lanubile, A. (2018) The enhancement of plant disease resistance using CRISPR/Cas9 technology. *Front Plant Sci*, doi: 10.3389/fpls.2018.01245
- Braatz, J., Harloff, H. J., 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 Physiol* 174: 935-942, doi:10.1104/pp.17.00426
- Brinkman, D.K., Chen, T., de Haas, M., Holland, H.A., Akhtar, W., van Steensel, B. (2018) Kinetics and fidelity of the repair of Cas9-induced double-strand DNA breaks. *Mol Cell* 70:801-813, [https://www.cell.com/molecular-cell/pdfExtended/S1097-2765\(18\)30312-5](https://www.cell.com/molecular-cell/pdfExtended/S1097-2765(18)30312-5)
- Broothaerts, W., Jacchia, S., Angers, A., Petrillo, M., Querci, M. et al. (2021) New Genomic Techniques: State-of-the-Art Review, EUR 30430 EN, doi: 10.2760/710056, JRC121847
- Burgio, G., Teboul, L. (2020) Anticipating and identifying collateral damage in genome editing. *Trends Genet* 36:905-914, <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S016895252030247X>
- Callaway, E. (2017) US defence agencies grapple with gene drives. *Nature* 547:388–389, <https://doi.org/10.1038/nature.2017.22345>
- Campbell, M.M., Sederoff, R.R. (1996) Variation in lignin content and composition. *Plant Physiol* 110:3-13, doi: 10.1104/pp.110.1.3
- Campbell, K.J., Saah, J.R., Brown, P.R., Godwin, J., Gould, F., Howald, G.R. et al. (2019) A potential new tool for the toolbox: Assessing gene drives for eradicating invasive rodent populations. In: Veitch, C.R. et al. (eds.) *Island invasives: scaling up to meet the challenge*, pp. 6–14 <https://www.semanticscholar.org/paper/A-potential-new-tool-for-the-toolbox%3A-assessing-Campbell-Saah/3c1601676332900ad8f0e71f44a46323a2c1a36e>
- Cardi, T., Murovec, J., Bakhsh, A., Boniecka, J., Bruegmann, T., Bull, S.E. et al. (2023) CRISPR/Cas-mediated plant genome editing: outstanding challenges a decade after implementation. *Trends Plant Sci* 28:1144-1165, <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1360138523001644>
- Chhalliyil P, Ilves H, Kazakov S.A, Howard S.J, Johnston B.H, Fagan J. (2020) A real-time quantitative PCR method specific for detection and quantification of the first commercialized genome-edited plant. *Foods* 9:1245, <https://www.mdpi.com/2304-8158/9/9/1245>
- Chu, P., Agapito-Tenfen, S.Z. (2022) Unintended genomic outcomes in current and novel generation GM techniques: a systematic review. *Plants* 11:2997, <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/36365450/>
- Colombo, S.M., Campbell, L.G., Murphy, E.J., Martin, S.L., Arts, M.T. (2018) Potential for novel production of omega-3 long-chain fatty acids by genetically engineered oilseed plants to alter terrestrial ecosystem dynamics. *Agri Syst* 164:31-37 <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0308521X17306650?via%3Dihub>
- Cieslak, M., Koller, F. (2024). First-time flowering in poplars: minor genetic changes using new genomic techniques can change species-specific characteristics. https://fachstelle-gentechnik-umwelt.de/wp-content/uploads/Backgrounder_polar_22_01_24.pdf (abgerufen 29.08.2024)

- Clapp, J. (2018) Mega-mergers on the menu: Corporate concentration and the politics of sustainability in the global food system. *Global Env Pol* 18:12-33 <https://direct.mit.edu/glep/article-abstract/18/2/12/14909/Mega-Mergers-on-the-Menu-Corporate-Concentration?redirectedFrom=fulltext>
- Compson, S. (2017) Failed Promises – the rise and fall of GM Cotton in India. *Soil Association* <https://www.soilassociation.org/media/13510/failed-promises-e-version.pdf> (abgerufen 07.08.2024)
- Cooper, C.A., Maga, E.A., Murray, J.D. (2015) Production of human lactoferrin and lysozyme in the milk of transgenic dairy animals: past, present, and future. *Transg Res* 24: 605–614, <https://link.springer.com/article/10.1007/s11248-015-9885-5>
- Correia, P.M.P., Najafi, J., Palmgren, M. (2024) De novo domestication: what about the weeds? *Trends Plant Sci* 29: 962-970, [https://www.cell.com/trends/plant-science/abstract/S1360-1385\(24\)00057-8](https://www.cell.com/trends/plant-science/abstract/S1360-1385(24)00057-8)
- CSS - ENSSER - VDW (2019) Gene Drives. A report on their science, applications, social aspects, ethics and regulations. <https://genedrives.ch/report/> (abgerufen 13.06.2024)
- Cuhra, M. (2015) Review of GMO safety assessment studies: glyphosate residues in Roundup Ready crops is an ignored issue. *Environ Sci Eur* 27:20, <https://munin.uit.no/handle/10037/8911>
- Dege, I. (2020) Kein Roulettespiel mit der Biologischen Vielfalt. *GID* 253:17-18, <https://www.gen-ethisches-netzwerk.de/publikationen/gid/253>
- Demorest, Z.L., Coffman, A., Baltes, N.J., Stoddard, T.J., Clasen, B.M. et al. (2016) Direct stacking of sequence-specific nuclease-induced mutations to produce high oleic and low linoleic soybean oil. *BMC Plant Biology* 16:225, doi: 10.1186/s12870-016-0906-1
- Devos, Y., Mumford, J.D., Bonsall, M.B., Camargo, A.M., Firbank, L.G. et al. (2021) Potential use of gene drive modified insects against disease vectors, agricultural pests and invasive species poses new challenges for risk assessment. *Critic Rev Biotech* 42:254–270, doi: 10.1080/07388551.2021.1933891
- DiFazio, S.P., Slavov, G.T., Burczyk, J., Leonardi, S., Strauss, S.H. (2004) Gene flow from tree plantations and implications for transgenic risk assessment. In: *Forest Biotechnology for the 21st Century* (eds. Walter, C. & Carson, M.) 405-422, <https://biotechlab.forestry.oregonstate.edu/sites/default/files/RS%20Walter%2023.pdf>
- Dolezel, M., Miklau, M., Heissenberger, A., Otto, M. (2024) Agronomic and phenotypic plant traits as indicators for environmental risks of genetically modified plants. *Env Sci Eur* 36:3, <https://doi.org/10.1186/s12302-023-00828-y>
- Dong, Q., Hu, B., Zhang, C. (2022). microRNAs and their roles in plant development. *Front Plant Sci* 13, <https://www.frontiersin.org/journals/plant-science/articles/10.3389/fpls.2022.824240/full>
- Doudna, J.A., Charpentier, E. (2014). Genome editing. The new frontier of genome engineering with CRISPR-Cas9. *Science* 346:1258096, doi: 10.1126/science.1258096
- Dudareva, N., Klempien, A., Muhlemann, J.K., Kaplan, I. (2013) Biosynthesis, function and metabolic engineering of plant volatile organic compounds. *New Phytologist* 198:16–32, doi: 10.1111/nph.12145
- Duesberg, J. (2020): Interessenkonflikte in der Weltnaturschutzorganisation? *GID* 253:8-9, <https://www.gen-ethisches-netzwerk.de/publikationen/gid/253>
- Dwivedi, S.L., Ceccarelli, S., Blair, M.W., Upadhyaya, H.D., Are, A.K., Ortiz, R. (2016) Landrace germplasm for improving yield and abiotic stress adaptation. *Trends Plant Sci* 21:31-42, <http://dx.doi.org/10.1016/j.tplants.2015.10.012>
- Eckerstorfer, M.F., Heissenberger, A., Reichenbecher, W., Steinbrecher, R.A., Waßmann, F. (2019). An EU perspective on biosafety considerations for plants developed by genome editing and other new genetic modification techniques (nGMs). *Front Bioeng Biotechnol* 7:31, doi: 10.3389/fbioe.2019.00031
- EFSA (2024) Assessment of the 2022 post-market environmental monitoring report on the cultivation of genetically modified maize MON 810 in the EU. *EFSA J* 2024.22 <https://www.efsa.europa.eu/en/efsajournal/pub/8986>
- Eisenstein, M. (2014) Against the grain. *Nature* 514:55-57, <https://www.nature.com/articles/514S55a>
- Ellstrand, N.C. (2003) Dangerous liaisons? When cultivated plants mate with their wild relatives. *The Johns Hopkins University Press*.
- ENSSER and CSS (2021) Scientific critique of Leopoldina and EASAC statements on genome edited plants in the EU, <https://ensser.org/wp-content/uploads/2021/04/Greens-EFA-GMO-Study-1.pdf>
- Erb, M., Kliebenstein, D.J. (2020) Plant secondary metabolites as defenses, regulators, and primary metabolites: The blurred functional trichotomy. *Plant Physiol* 184:32-52, <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/32636341/>
- Erpen-Dalla Corte, L., Mahmoud, L.M., Moraes, T.S., Mou, Z., Grosser, J.W., Dutt, M. (2019). Development of improved fruit, vegetable, and ornamental crops using the CRISPR/Cas9 genome editing technique. *Plants* 8:601, doi: 10.3390/plants8120601
- Evans, B.R., Kotsakiozi, P., Costa-da-Silva, A.L., Ioshino, R.S. et al. (2019) Transgenic *Aedes aegypti* mosquitoes transfer genes into a natural population. *Sci Rep* 9:13047, <https://doi.org/10.1038/s41598-019-49660-6>
- Fang, J., Peng, N., Gu, Z., Ge, X., Feng, Y.Q., Lu, B.R. (2018). Overexpressing exogenous 5-enolpyruvylshikimate-3-phosphate synthase (EPSPS) genes increases fecundity and auxin content of transgenic *Arabidopsis* plants. *Front Plant Sci* 9, doi: [10.3389/fpls.2018.00233](https://doi.org/10.3389/fpls.2018.00233)
- Farooq, M.A., Gao, S., Hassan, M.A. Prasanna, B., Huang, Z. et al. (2024) Artificial intelligence in plant breeding. *TiGS* 40:891-908, <https://doi.org/10.1016/j.tig.2024.07.001>
- Fernie, A.R., Yan, J. (2019) De novo domestication: an alternative route toward new crops for the future. *Mol Plant* 12:615–631, <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1674205219301297>
- Fischer, K., Ekener-Petersen, E., Rydhmer, L., Björnberg, K. 2015. Social Impacts of GM Crops in Agriculture: A Systematic Literature Review. *Sustainability* 7:8598–8620, <https://www.mdpi.com/2071-1050/7/7/8598>
- Fletcher, S.J., Reeves, P.T., Hoang, B.T., Mitter, N. (2020) A perspective on RNAi-based biopesticides. *Front Plant Sci* 11, <https://www.frontiersin.org/journals/plant-science/articles/10.3389/fpls.2020.00051/full>
- Fraser, P.D. Aharoni, A., Hall, R.D., Huang, S., Giovannoni, J.J., Sonnewald, U. Fernie, A.R. (2020) Metabolomics should be deployed in the identification and characterization of gene-edited crops. *Plant J*, <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/tpj.14679>
- Freeland, L.V., Phillips, D.W., Jones, H.D. (2024) Precision Breeding and Consumer Safety: A Review of Regulations for UK Markets. *Agri* 14:1306, <https://www.mdpi.com/2077-0472/14/8/1306>
- Friedman, M. (2006) Potato Glycoalkaloids and Metabolites: Roles in the Plant and in the Diet. *J Agri Food Chem* 54:8655-81, doi: 10.1021/jf061471t
- Gantz, V.M., Jasinskiene, N., Tatarenkova, O., Fazekas, A., Macias, V.M., Bier, E., James, A.A. (2015) Highly efficient Cas9-mediated gene drive for population modification of the malaria vector mosquito *Anopheles stephensi*. *Appl Biol Sci* 112:6736-6743, <https://www.pnas.org/content/112/49/E6736>
- Gelinsky, E. (2024) Neue gentechnische Verfahren: Kommerzialisierungspipeline im Bereich Pflanzenzüchtung und Lizenzvereinbarungen. https://www.semnr.ch/pdfs/enderbericht_semnr_gelinsky_2023.pdf (abgerufen 03.09. 2024)
- Gilbert, N. (2014) Cross-bred crops get fit faster. *Nature* 513:292, <https://www.nature.com/articles/513292a>
- Gilbert, N. (2016) Frugal farming – The race to create super-crops. *Nature* 533:308-310, <https://www.nature.com/news/the-race-to-create-super-crops-1.19943/>
- Glover, D., Kim, S.K., Stone, G.D. (2020) Golden Rice and technology adoption theory: A study of seed choice dynamics among rice growers in the Philippines. *Tech Soc* 60:101227, <https://doi.org/10.1016/j.techsoc.2019.101227>
- Gomez Roldan, M.V., Périlleux, C. Morin, H., Fernandez, S.H., David Latrasse et al. (2017) Natural and induced loss of function mutations in SIMBP21 MADS-box gene led to jointless-2 phenotype in tomato. *Scient Rep* 7:4402, doi: 10.1038/s41598-017-04556-1
- Gonalons, C.M., Farina, W. (2018) Impaired associative learning after chronic exposure to pesticides in young adult honey bees. *J Exp Biol* 11:221, doi: 10.1242/jeb.176644
- Greene, S.L., Kesoju, S.R., Martin, R.C., Kramer, M. (2015). Occurrence of transgenic feral alfalfa (*Medicago sativa* subsp. *sativa* L.) in alfalfa seed production areas in the United States. *Plos One*, doi: 10.1371/journal.pone.0143296

- Greiter, A., Heinze, B., Eckerstorfer, M., Reinisch, C., Mengl, M. et al. (2015) Transgene Bäume – Spezielle Anforderungen an die Umweltrisikobeschätzung sowie mögliche Auswirkungen auf den österreichischen Wald in seinen Wirkungen und Funktionen. <https://www.umweltbundesamt.at/fileadmin/site/publikationen/REP0506.pdf> (abgerufen 04.06.2024)
- Guo, C., Ma, X., Gao, F., Guo, Y. (2023) Off-target effects in CRISPR/Cas9 gene editing. *Front Bioeng Biotech* 11:1143157, doi: 10.3389/fbioe.2023.114315
- Haak, D.C., Fukao, T., Grene, R., Hua, Z., Ivanov, R., Perrella, G., Li, S. (2017) Multi-level Regulation of Abiotic Stress Responses in Plants. *Front Plant Sci* 8, <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.01564>
- Hacquard, S., Spaepen, S., Garrido-Oter, R., Schulze-Lefert, P. (2017) Interplay between innate immunity and the plant microbiota. *Ann Rev Phytopathol* 55:565–89, <https://www.annualreviews.org/doi/pdf/10.1146/annurev-phyto-080516-035623>
- Hahn, F., Nekrasov, V. (2019) CRISPR/Cas precision: do we need to worry about off-targeting in plants? *Plant Cell Rep* 38:437–441, <https://link.springer.com/article/10.1007/s00299-018-2355-9>
- Hammond, A., Karlsson, X., Morianou, I., Kyrou, K., Beaghton, A., Gribble, M., Kranjc, N. et al. (2021) Regulating the expression of gene drives is key to increasing their invasive potential and the mitigation of resistance. *PLOS Genetics* <https://doi.org/10.1371/journal.pgen.1009321>
- He, Y., Zhao, Y. (2019) Technological breakthroughs in generating transgene-free and genetically stable CRISPR-edited plants. *aBIOTECH* 1:88–96, doi: 10.1007/s42994-019-00013-x
- Heimes, C., Thiele, J., van Mølken, T., Hauser, T.P. (2015) Interactive impacts of a herbivore and a pathogen on two resistance types of *Barbarea vulgaris* (Brassicaceae). *Oecologia* 177:441–452, doi: 10.1007/s00442-014-3113-5
- Heinemann, J.A., Paull, D.J., Walker, S., Kurenbach, B. (2021) Differentiated impacts of human interventions on nature: Scaling the conversation on regulation of gene technologies. *Elem Sci Anth* 9:1, <https://doi.org/10.1525/elementa.2021.00086>
- Henn, V., Imken, M. (2021) Gene Drives: Die neue Dimension der Gentechnik, Save Our Seeds/ Zukunftsstiftung Landwirtschaft, <https://www.stop-genedrives.eu/> (abgerufen 13.06.2024)
- Hilbeck, A., Otto, M. (2015) Specificity and combinatorial effects of *Bacillus thuringiensis* Cry toxins in the context of GMO environmental risk assessment. *Frontiers in Env. Science* 3:71. Doi: 10.3389/fenvs.2015.00071
- Hilbeck, A., Binimelis, R., Defarge, N., Steinbrecher, R., Székács, A., Wickson, F., Antoniou, M. et al. (2015) No scientific consensus on GMO safety. *Env Sci Eur* 27:4, <https://enveurope.springeropen.com/counter/pdf/10.1186/s12302-014-0034-1.pdf>
- Hilbeck, A., Herren, H. (2016) Millions spent, no one served: who is to blame for the failure of GMO Golden rice. <https://www.independentsciencenews.org/health/millions-spent-who-is-to-blame-failure-gmo-golden-rice/> (abgerufen 07.06.2024)
- Hilbeck, A., Defarge, N., Lebrecht, L., Bøhn, T. (2020). Insecticidal Bt crops – EFSA's risk assessment approach for GM Bt plants fails by design. https://www.testbiotech.org/wp-content/uploads/2023/12/RAGES_report-Insecticidal-Bt-plants.pdf (abgerufen 05.06.2024)
- Hilscher, J., Bürstmayr, H., Stoger, E. (2016) Targeted modification of plant genomes for precision crop breeding. *Biotechnol J* 11, doi: 10.1002/biot.201600173
- Hindar, K., Bodin, J., Duale, N., Ganes Jevnaker, A.M., Garseth, Å.H. et al. (2023) Environmental risk assessment of genetically modified sterile VIRGIN® Atlantic salmon for use in research trials in aquaculture sea-cages. <https://vkm.no/english/riskassessments/allpublications/geneticallymodifiedsterilesalmon-riskassessmentoffieldtrials.4.49914e7a18a5261030860bee.html> (abgerufen 30.08.2024)
- Hixson, S.M., Shukla, K., Campbell, L.G., Hallett, R.H., Smith, S.M., Packer, L., Arts, M.T. (2016) Long-Chain Omega-3 Polyunsaturated Fatty Acids Have Developmental Effects on the Crop Pest, the Cabbage White Butterfly *Pieris rapae*. *PLOS ONE*, <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0197059>
- Hofmann, F., Otto, M., Wosniok, W. (2014) Maize pollen deposition in relation to distance from the nearest pollen source under common cultivation – results of 10 years of monitoring (2001 to 2010). *Environ Sci Eur* 26:24, <https://enveurope.springeropen.com/articles/10.1186/s12302-014-0024-3>
- Huang, Q., Lariviere, P.J., Powell, J.E., Moran, N.A. (2023) Engineered gut symbiont inhibits microsporidian parasite and improves honey bee survival. *PNAS* 120:25, <https://doi.org/10.1073/pnas.2220922120>
- Hüdig, M., Laibach, N., Hein, A.C. (2022) Genome editing in crop plant research – alignment of expectations and current developments. *Plants* 11:212, <https://doi.org/10.3390/plants11020212>
- Hussain, Ding, X., Alariqi, M., Manghwar, H., Hui, F., Li, Y. (2021) Herbicide Resistance: Another Hot Agronomic Trait for Plant Genome Editing. *Plants* 10: 621, <https://doi.org/10.3390/plants10040621>
- IPBES (2023) IPBES Invasive Alien Species Assessment. doi: 10.5281/zenodo.7430692 (abgerufen 27.08.2024)
- Joergensen, R.B., Hauser, T., D'Herfeldt, T., Andersen, N.S., Hooftman, D. (2009) The variability of processes involved in transgene dispersal – case studies from Brassica and related genera. *Environ Sci Pollut Res* 16:389–395
- Jouanin, L., Goujon, T., de Nadaï, V., Martin, M.T., Mila, I. et al. (2000) Lignification in transgenic poplars with extremely reduced caffeic acid O-methyltransferase activity. *Plant Physiol* 123:1363-1373, <https://www.mendeley.com/catalogue/859fe3f5-eccc-37f4-9afb-2dab66a0c3b7/>
- Jupe, F., Rivkin, A.C., Michael, T.P., Zander, M., Motley, T., Sandoval, J.P. et al. (2019) The complex architecture and epigenomic impact of plant T-DNA insertions. *PLOS Gen*, doi: 10.1371/journal.pgen.1007819
- Kaduskar, B. Kushwah, R.B.S., Auradkar, A., Guichard, A., Li, M. et al. (2022) Reversing insecticide resistance with allelic-drive in *Drosophila melanogaster*. *Nature Comm* 13:291, <https://www.nature.com/articles/s41467-021-27654-1>
- Kamm, U., Rotach, P., Gugerli, F., Siroky, M., Edwards, P., Holderegger, R. (2009) Frequent long-distance gene flow in a rare temperate forest tree (*Sorbus domestica*) at the landscape scale. *Heredity* 103:476–482
- Kapahnke, M., Banning, A., Tikkanen, R. (2016) Random splicing of several exons caused by a single base change in the target exon of CRISPR/Cas9 mediated gene knockout. *Cells* 5:45, doi: 10.3390/cells5040045
- Kawall, K. (2019) New possibilities on the horizon: Genome editing makes the whole genome accessible for changes. *Front Plant Sci*. 10:525, doi: 10.3389/fpls.2019.00525
- Kawall, K. (2021a) The Generic Risks and the Potential of SDN-1 Applications in Crop Plants. *Plants* 10:2259, <https://www.mdpi.com/2223-7747/10/11/2259>
- Kawall, K. (2021b) Genome-edited *Camelina sativa* with a unique fatty acid content and its potential impact on ecosystems. *Env Sci Eur* 33:38, <https://doi.org/10.1186/s12302-021-00482-2>
- Kawata, M., Murakami, K., Ishikawa, T. (2009) Dispersal and persistence of genetically modified oilseed rape around Japanese harbors. *Environ Sci Pollut Res* 16:120–126
- 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. *PIOSONE* <https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0197059>
- Khan, M.S. (2011) Future challenges in environmental risk assessment of transgenic plants with abiotic stress tolerance. *Biotech Mol Biol Rev* 6:199-213, <https://academicjournals.org/journal/BMBR/article-full-text-pdf/03E700211872>
- Klap, C., Yeshayahu, E., Bolger, A.M., Arazi, T., Gupta, S.K., et al. (2017) Tomato facultative parthenocarp results from SIAGAMOUS-LIKE 6 loss of function. *Plant Biotechnol J* 15:634–647,
- Klátyik, S., Simon, G., Olah, M., Takacs, E., Mesnage, R., Antoniou, M.N., Zaller, J.G., Szekacs, A. (2023) Terrestrial ecotoxicity of glyphosate, its formulations, and co-formulants: evidence from 2010–2023. *Env Sci Eur* 35:51, <https://doi.org/10.1186/s12302-023-00758-9>

- Klátyik, S., Simon, G., Olah, M., Takacs, E., Mesnage, R., Antoniou, M.N., Zaller, J.G., Szekacs, A. (2024) Aquatic ecotoxicity of glyphosate, its formulations, and co-formulants: evidence from 2010 to 2023. *Env Sci Eur* 36:22, <https://doi.org/10.1186/s12302-024-00849-1>
- Kleinschmit, J., Lilliston, B. (2015) Unknown benefits, hidden costs. https://www.iatp.org/sites/default/files/2015_08_06_Neonics_BL_JK.pdf (abgerufen 05.06.2024)
- Koller, F., Cieslak, M. (2023) A perspective from the EU: unintended genetic changes in plants caused by NGT – their relevance for a comprehensive molecular characterization and risk assessment. *Front Bioeng Biotechnol* 11 <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fbioe.2023.1276226/full>
- Koller, F., Schulz, M., Juhas, M., Bauer-Panskus, A., Then, C. (2023) The need for assessment of risks arising from interactions between NGT organisms from an EU perspective. *Env Sci Eur* 35:27, <https://enveurope.springeropen.com/articles/10.1186/s12302-023-00734-3>
- Kornfeldt, T. (2020): Ausgestorben und Wiederbelebt (interview mit Judith Düesberg). *GID* 253:12-14, <https://www.gen-ethisches-netzwerk.de/publikationen/gid/253>
- Kosicki, M., Tomberg, K., Bradley, A. (2018) Repair of double-strand breaks induced by CRISPR-Cas9 leads to large deletions and complex rearrangements. *Nat Biotech* 36:765–771, <https://www.nature.com/articles/nbt.4192>
- Kowarik, I. (2003). *Biologische Invasionen: Neophyten und Neozoen in Mitteleuropa*. Ulmer, Stuttgart
- Kranthi, K.R., Stone, G.D. (2020) Long-term impacts of Bt cotton in India. *Nature Plants* 6:188–196, <https://www.nature.com/articles/s41477-020-0615-5?referral=true>
- Kremer, R.J. (2020) Impacts of genetically engineered crops on the soil microbiome, biological processes, and ecosystem services. In: A. Chaurasia et al. (eds.), *GMOs, Topics in Biodiversity and Conservation* 19: 192-147, https://doi.org/10.1007/978-3-030-53183-6_6
- Kremer, A., Ronce, O., Robledo-Arnuncio, J.J., Guillaume, F., Bohrer, G., Nathan, R., Bridle, J.R. et al. (2012) Long-distance gene flow and adaptation of forest trees to rapid climate change. *Ecology Letters* 15:378–392, <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/j.1461-0248.2012.01746.x>
- Kumar, D., Yadav, A., Ahmad, R., Dwivedi, U.N., Yadav, K. (2022) CRISPR-Based Genome Editing for Nutrient Enrichment in Crops: A Promising Approach Toward Global Food Security. *Front Genet* 13, <https://doi.org/10.3389/fgene.2022.932859>
- Kusch, S., Panstruga, R. 2017, mlo-based resistance: An apparently universal "weapon" to defeat powdery mildew disease. *MPMI* 30:179-189, <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/28095124/>
- Lacroix, R., Kurrasch, D.M. (2023) Glyphosate toxicity: in vivo, in vitro, and epidemiological evidence. *Toxicol Sci* 1-10, <https://doi.org/10.1093/toxsci/kfad018>
- Lalonde, S., Stone, O.A., Lessard S., Lavertu, A., Desjardins, J. et al. (2017) Frameshift indels introduced by genome editing can lead to in-frame exon skipping. *PLoS One* 12:e0178700, <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC5453576/>
- Lang, A., Vojtech, E. (2006) The effects of pollen consumption of transgenic Bt maize on the common swallowtail, *Papilio machaon* L. (Lepidoptera, Papilionidae). *Basic Appl Ecol* 4:296-306, <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1439179105001246?via%3Dihub>
- Lang, A., Oehen, B., Ross, J.H., Bieri, K., Steinbrich, A. (2015) Potential exposure of butterflies in protected habitats by Bt maize cultivation: A case study in Switzerland. *Biol Cons* 192: 369-377, doi: 10.1016/j.biocon.2015.10.006
- Leonard, S.P., Powell, J.E., Perutka, J., Geng, P., Heckmann, L.C. et al. (2020). Engineered symbionts activate honey bee immunity and limit pathogens. *Science* 367:573-576, <https://www.science.org/doi/epdf/10.1126/science.aax9039>
- Li, X., Wang, Y., Chen, S., Tian, H., Fu, D., Zhu, B., Luo, Y., Zhu, H. (2018) Lycopene Is Enriched in Tomato Fruit by CRISPR/Cas9-Mediated Multiplex Genome Editing. *Front Plant Sci* 9:559. doi: 10.3389/fpls.2018.00559
- Li, D., Zhou, H., Zeng, X. (2019) Battling CRISPR-Cas9 off-target genome editing. *Cell Biol Toxicol* 35:403–406, doi: 10.1007/s10565-019-09485-5
- Li, Q., Sapkota, M., van der Knaap, E. (2020) Perspectives of CRISPR/Cas-mediated cis-engineering in horticulture: unlocking the neglected potential for crop improvement. *Horticult Res* 7:36, <https://doi.org/10.1038/s41438-020-0258-8>
- Li, P., Ye, S., Chen, J., Wang, L., Li, Y., Ge, L., Wu, G. et al. (2023) Combined meta-genomic and metabolomic analyses reveal that Bt rice planting alters soil C-N metabolism. *ISME Comm* 3:4, <https://doi.org/10.1038/s43705-023-00217-9>
- Liu, X., Wu, S., Xu, J., Suin, C., Wei, J. (2017) Application of CRISPR/Cas9 in plant biology. *Acta Pharma Sinica* 7:292–302, <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2211383516302982>
- Liu, J., Jiao, B., Qian, W. (2024) Synthetic Gene Drives in Plants: Development Strategies, Potential Applications, and Ethical Considerations. *Modern Agri* 2:2, <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/moda.30>
- Lütke Schwienhorst, j. (2020) Vom Schutzgut zum Zielobjekt. *GID* 253:15-16, <https://www.gen-ethisches-netzwerk.de/publikationen/gid/253>
- Ma, Z., Hu, L. (2023) MicroRNA: A dynamic player from signalling to abiotic tolerance in plants. *Int J Mol Sci* 24:11364, <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/37511124/>
- Maher, M.F., Nasti, R.A., Vollbrecht, M., Starker, C.G., Clark, MD., Voytas, D.F. (2020). Plant gene editing through de novo induction of meristems. *Nature Biotechnol* 38:84–89, <https://www.nature.com/articles/s41587-019-0337-2>
- Mallory-Smith, C., Zapiola, M. (2008) Gene flow from glyphosate-resistant crops. *Pest Manag Sci* 64:428–440, <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/ps.1517>
- Mertens, M. (2008) Assessment of environmental impacts of genetically modified plants. *BfN-Schriften* 2017, <https://www.bfn.de/en/publications/bfn-schriften/bfn-schriften-217-assessment-environmental-impacts-genetically-modified>
- Mertens, M., Höss, S., Neumann, G., Afzal, J., Reichenbecher, W. (2018) Glyphosate, a chelating agent—relevant for ecological risk assessment? *Environ Sci Poll Res* 25:5298–5317, <https://doi.org/10.1007/s11356-017-1080-1>
- Mesnage, R., Teixeira, M., Mandrioli, D., Falcioni, L., Ducarmon, Q.R. et al. (2021) Use of Shotgun Metagenomics and Metabolomics to Evaluate the Impact of Glyphosate or Roundup MON 52276 on the Gut Microbiota and Serum Metabolome of Sprague-Dawley Rats. *Env Health Perspect* 129:1, <https://ehp.niehs.nih.gov/doi/10.1289/EHP6990>
- Metje-Sprink, J., Sprink, T., Hartung, F. (2020) Genome edited plants in the field. *Curr Opin Biotechnol* 61:1–6, <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/31557656/>
- Michno, J.M., Virdi, K., Stec, A.O., Liu, J., Wang, X., Xiong, Y., Stupar, R.M. (2020) Integration, abundance, and transmission of mutations and transgenes in a series of CRISPR/Cas9 soybean lines. *BMC Biotechnol* 20:10, doi: org/10.1186/s12896-020-00604-3
- Miyazaki, j., Bauer-Panskus, A., Bøhn, T., Reichenbecher, W., Then, C. (2019) Insufficient risk assessment of herbicide-tolerant genetically engineered soybeans intended for import into the EU. *Environ Sci Eur* 31:92, <https://enveurope.springeropen.com/articles/10.1186/s12302-019-0274-1>
- 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* 8:27, <https://doi.org/10.1186/s13750-019-0171-5>
- Monroe, J.G., Srikant, T., Carbonell-Bejerano, P., Becker, C. Lensink, M., Exposito-Alonso, M. et al. (2022) Mutation bias reflects natural selection in *Arabidopsis thaliana*. *Nature* 602:101–105, <https://www.nature.com/articles/s41586-021-04269-6>
- Mortensen, D.A., Egan, J.F., Maxwell, B.D., Ryan, M.R., Smith, R.G. (2012) Navigating a critical juncture for sustainable weed management. *Biosci* 62:75–84, <https://academic.oup.com/bioscience/article/62/1/75/295845>
- Mortensen, D.A., Ryan, M.R., Smith, R.G. (2024) Another step on the transgene-facilitated herbicide treadmill. *Pest Manag Sci* 80: 4145-4149, <https://scijournals.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/ps.8105>
- Motta, E.V.S., Powell, J.E., Moran, N.A. (2022) Glyphosate induces immune dysregulation in honey bees. *Animal Microbiome* 4:16, <https://doi.org/10.1186/s42523-022-00165-0>

- Mou, H., Smith, J.L., Peng, L., Yin, H., Moore, J., Zhang, X.O. Song, C.Q., Sheel, A. et al. (2017) CRISPR/Cas9-mediated genome editing induces exon skipping by alternative splicing or exon deletion. *Genome Biol* 18:108, doi: 10.1186/s13059-017-1237-8
- Moutinho, S. (2022) Transgenic glowing fish invades Brazilian streams. *Science* 375: 6582, <https://www.science.org/content/article/transgenic-glowing-fish-invades-brazilian-streams>
- Murugan, K., Seetharam, A.S., Severin, A.J., Sashital, D.G. (2020) CRISPR-Cas12a has widespread off-target and dsDNA-nicking effects. *JBC* 295:5538-5553, doi: 10.1074/jbc.RA120.012933
- Musche, M., Settele J., Durka, W. (2009). Basisstudie zur Wechselwirkung von gentechnisch verändertem MON810-Mais mit spezifischen Schmetterlingsarten. Studie im Auftrag des Sächsischen Staatsministeriums für Umwelt und Landwirtschaft.
- Nadakuduti, S.S., Buell, R., Voytas, D.F., Starker, C.G., Douches, D.S. (2018) Genome editing for crop improvement – applications in clonally propagated polyploids with a focus on potato (*Solanum tuberosum* L.). *Front Plant Sci* 9:1607, doi: 10.3389/fpls.2018.01607
- Napier, J.A., Usher, S., Haslam, R.P., Ruiz-Lopez, N., Sayanova, O. (2015) Transgenic plants as a sustainable, terrestrial source of fish oils. *Eur J Lipid Sci Technol* 117:1317–1324, <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/ejlt.201400452>
- Neve, P. (2018) Gene drive systems: do they have a place in agricultural weed management? *Pest Manag Sci* 74:2671-2679, doi: 10.1002/ps.5137
- Nielsen, K.M., Bones, A.M., Smalla, k., van Elsas, J.D. (1998) Horizontal gene transfer from transgenic plants to terrestrial bacteria – a rare event? *FEMS Microbiol Rev* 22:79–103, <https://doi.org/10.1111/j.1574-6976.1998.tb00362.x>
- Nishimasu, H., Nureki, O. (2017) Structures and mechanisms of CRISPR RNA-guided effector nucleases. *Curr Opin Structural Biol* 43:68-78, <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959440X16301981?via%3DIihub>
- Nonaka, S., Arai, C., Takayama, M., Matsukura, C., Ezura, H. (2017) Efficient increase of γ -aminobutyric acid (GABA) content in tomato fruits by targeted mutagenesis. *Sci Rep* 7:7057, doi: 10.1038/s41598-017-06400-y
- Norris, A.L., Lee, S.S., Greenlees, K.J., Tadesse, D.A., Miller, M.F., Lombardi, H. (2019) Template plasmid integration in germline genome-edited cattle. *Biorxiv* <https://www.biorxiv.org/content/10.1101/715482v1> (republished 2020: *Nature Biotechnol* 38:163–164, <https://www.nature.com/articles/s41587-019-0394-6>)
- Ortega, M.A., Zhou, R., Chen, M.S., Bewg, W.P., Simon, B., Tsai, C.J. (2022) In vitro floral development in poplar: insights into seed trichome regulation and trimonoecy. *New Phytol*, 237:1078-1081, <https://doi.org/10.1111/nph.18624>
- Oseland, E., Bish, M., Lerch, R., Bradley, K. (2024) Atmospheric deposition of dicamba herbicide can cause injury to sensitive soybean. *Weed Sci* 1-27, <https://doi.org/10.1017/wsc.2024.9>
- Paine, J.A., Shipton, C.A. Chaggar, S., Howells, R.M., Kennedy, M.J. et al. (2005) Improving the nutritional value of Golden Rice through increased pro-vitamin A content. *Nature Biotechnol* 23:482–487, <https://www.nature.com/articles/nbt1082>
- Pak, S., Li, C. (2022) Progress and challenges in applying CRISPR/Cas techniques to the genome editing of trees. *For Res* 2:6, <https://doi.org/10.48130/FR-2022-0006>
- Parisi, C., Rodrigues-Cerezo, E. (2021) Current and future market applications of new genomic techniques. *Pub Office EU*, <https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC123830>
- Paula, D.P., Andow, D.A. (2016). Uptake and bioaccumulation of Cry toxins by an aphidophagous predator. *Environ Poll* 209:164-168, <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0269749115301962?via%3DIihub>
- Peng, T., Teotia, S., Tang, G., Zhao, Q. (2019) MicroRNAs meet with quantitative trait loci: small powerful players in regulating quantitative yield traits in rice. *Wiley Interdisciplin Rev: RNA* 10(6):e1556, <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/31207122/>
- Pickar-Oliver, A., Gersbach, C.A. (2019) The next generation of CRISPR–Cas technologies and applications. *Nature Rev Mol Cell Biol* 20:490–507. <https://www.nature.com/articles/s41580-019-0131-5>
- Pleasant, J.M., Oberhauser, K.S. (2012) Milkweed loss in agricultural fields because of herbicide use: effect on the monarch butterfly population. *Insect Conserv Divers* 6:135–144, <https://resjournals.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/j.1752-4598.2012.00196.x>
- Price, B., Cotter, H. (2014) The GM Contamination Register: a review of recorded contamination incidents associated with genetically modified organisms (GMOs), 1997–2013. *I J Food Contam* 1:5, doi: 10.1186/s40550-014-0005-8
- Rasmussen, L.V., Grass, I., Mehrabi, Z., Smith, O.M., Bezner-Kerr, R., Blesh, J. et al. (2024) Joint environmental and social benefits from diversified agriculture. *Science* 384:87-93, <https://www.science.org/doi/10.1126/science.adj1914>
- Redford, K.H., Brooks, T.M., Macfarlane, N.B.W., Adams, J.S. (2019): Genetic frontiers for conservation: An assessment of synthetic biology and biodiversity conservation <https://portals.iucn.org/library/efiles/documents/2019-012-En.pdf> (abgerufen 30.05.2024)
- Ribarits, A., Eckerstorfer, M., Simon, S., Stepanek, W. (2021) Genome-Edited Plants: Opportunities and Challenges for an Anticipatory Detection and Identification Framework. *Foods* 10:430. <https://doi.org/10.3390/foods10020430>
- Ribarits, A., Stepanek, W., Hohegger, R., Narendja, F. et al. (2022) Analyse von Nachweismethoden für genomeditierte und klassische GV-Pflanzen. *BfN-Skripten* 622, <https://www.bfn.de/publikationen/bfn-schriften/bfn-schriften-622-analyse-von-nachweismethoden-fuer-genomeditierte-und>
- Robinson, C., Portier, C.J., Čavoski, A., Mesnage, R., Roger, A., Clausen, P. et al. (2020) Achieving a high level of protection from pesticides in Europe: Problems with the current risk assessment procedure and solutions. *Eur J Risk Reg* 11:3, doi: 10.1017/err.2020.18
- Rodrigues Costa, M., Fischer, N., Gronewold, A., Gulich, B., Godehardt, A.W., Tönjes, R.R. (2023) Isolation of an ecotropic porcine endogenous retrovirus PERV-C from a Yucatan SLAD/D inbred miniature swine. *J Virol* 97:3, <https://europepmc.org/backend/ptpmrender.fcgi?accid=PMC10062142&blobtype=pdf>
- Rönspies, M., Schindele, P., Puchta, H. (2021) CRISPR/Cas-mediated chromosome engineering: opening up a new avenue for plant breeding. *J Exp Bot* 72:177-183, doi: 10.1093/jxb/era463
- Samsel, A., Seneff, S. (2013) Glyphosate, pathways to modern diseases II: Celiac sprue and gluten intolerance. *Interdiscip Toxicol* 6:159–184, <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3945755/>
- Sanchez-Leon, S., Gil-Humanes, J., Ozuna, C.V., Gimenez, M.J., Sousa, C., Voytas, D.F., Barro, F. (2018) Low-gluten, nontransgenic wheat engineered with CRISPR/Cas9. *Plant Biotechnol J* 16:902-910, <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1111/pbi.12837>
- Saxena, D., Flores, S., Stotzky, G. (2002) Bt toxin is released in root exudates from 12 transgenic corn hybrids representing three transformation events. *Soil Biol Biochem* 34: 133-137
- Schafer, M.G., Ross, A.A., Londo, J.P., Burdick, C.A., Lee, E.H., Travers, S.E. et al. (2011) The establishment of genetically engineered canola populations in the U.S. *PLoS ONE* 6:1–4 <https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0025736>
- Schell, C., Engelhard, M., Frohn, H.W., Berger, L. eds. (2019) Neue Gentechniken und Naturschutz – eine Verhältnisbestimmung. *BfN-Skripten* 546, <https://www.bfn.de/publikationen/bfn-schriften/bfn-schriften-546-neue-gentechniken-und-naturschutz-eine>
- Schütte, G., Eckerstorfer, M., Rastelli, V., Reichenbecher, W., Restrepo-Vassalli, S., Ruohonen-Lehto, M., Wuest Saucy, A.G., Mertens, M. (2017) Herbicide resistance and biodiversity: agronomic and environmental aspects of genetically modified herbicide-resistant plants. *Environ Sci Eur* 29:5, <https://enveurope.springeropen.com/articles/10.1186/s12302-016-0100-y>
- Schulte, C., Theilenberg, E., Müller-Borg, M., Gempe, T., Beye, M. (2014) Highly efficient integration and expression of piggyBac-derived cassettes in the honeybee (*Apis mellifera*). *PNAS* 111:9003-9008, <https://www.pnas.org/doi/10.1073/pnas.1402341111>
- Schulze, J., Frauenknecht, T., Brodmann, P., Bagutti, C. (2014) Unexpected diversity of feral genetically modified oilseed rape (*Brassica napus* L.). Despite a cultivation and import ban in Switzerland. *PLOS One* online 9:1–18, <https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0114477>

- Shakweer, W.M.E., Krivoruchko, A.Y., Dessouki, Sh.M., Khattab, A.A. (2023) A review of transgenic animal techniques and their applications. *J Gen Eng Biotechnol* 21:55, <https://doi.org/10.1186/s43141-023-00502-z>
- Shan, S., Soltis, P.S., Soltis, D.E., Yang, B. (2020) Considerations in adapting CRISPR/Cas9 in nongenetic model plant systems. *Appl Plant Sci* 8(1): e11314, doi: 10.1002/aps3.11314
- Sharpe, J.J., Cooper, T.A. (2017). Unexpected consequences: exon skipping caused by CRISPR-generated mutations. *Genome Biol* 18:109, doi: 10.1186/s13059-017-1240-0
- Shen, C., Yin, X.C., Jiao, B.J., Li, J., Jia, P., Zhang, X.W. et al. (2022) Evaluation of adverse effects/events of genetically modified food consumption: a systematic review of animal and human studies. *Env Sci Eur* 34:8, <https://enveurope.springeropen.com/articles/10.1186/s12302-021-00578-9>
- Shi, J., Gao, H., Wang, H., Lafitte, H.R., Archibald, R.L. et al. (2017) ARGOS8 variants generated by CRISPR-Cas9 improve maize grain yield under field drought stress conditions. *Plant Biotechnol J* 15:207–216, <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/pbi.12603>
- Shine, C., Williams, N., Gündling, L. (2000) A guide to designing legal and institutional frameworks on alien invasive species. IUCN Paper No 40, <https://iucn.org/resources/publication/guide-designing-legal-and-institutional-frameworks-alien-invasive-species> (abgerufen 30.05.2024)
- Simon, S., Otto, M., Engelhard, M. (2018) Synthetic gene drive: between continuity and novelty. *EMBO Rep* 19, doi: 10.15252/embr.201845760
- Sinclair, T.R., Rufty, T.W., Lewis, R.S. (2019) Increasing photosynthesis: Unlikely solution for world food problem. *T Plant Sci* 24:11, <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1360138519301888>
- Skirvin, R.M., McPheeters, K.D., Norton, M. (1994) Sources and frequency of somaclonal variation. *Hortsci* 29:1232-1233.
- Skryabin, B.V., Kummerfeld, D.M., Gubar, L., Seeger, B., Kaiser, H., Stegemann, A. et al. (2020) Pervasive head-to-tail insertions of DNA templates mask desired CRISPR-Cas9-mediated genome editing events. *Sci Adv* 6:7, doi: 10.1126/sciadv.aax2941
- Smith, J.L., Baute, T.S., Sebright, M.M., Schaafsma, A.W., DiFonzo, C.D. (2018) Establishment of *Striacosta albicosta* (Lepidoptera: Noctuidae) as a primary pest of corn in the Great Lakes region. *J Econ Entomol* 111(4): 1732-1744 <https://doi.org/10.1093/jee/toy138>
- Smits, A.H., Ziebell, F., Joberty, G., Zinn, N., Mueller, W.F., Clauder-Münster, S. et al. (2019) Biological plasticity rescues target activity in CRISPR knockouts. *Nature Methods* 16: 1087–1093, doi: 10.1038/s41592-019-0614-5
- Snow, A.A., Uthus, K.L., Culley, T.M. (2001). Fitness of hybrids between weedy and cultivated radish: implications for weed evolution. *Ecol Appl* 11:934-943.
- South, P.F., Cavanagh, A.P., Liu, H.W., Ort, D.R. (2019) Synthetic glycolate metabolism pathways stimulate crop growth and productivity in the field. *Science* 363:45, <https://www.science.org/doi/epdf/10.1126/science.aat9077>
- Spök, A., Sprink, T., Allan, A.C., Yamaguchi, T., Daye, C. (2022). Towards social acceptability of genome-edited plants in industrialised countries? Emerging evidence from Europe, United States, Canada, Australia, New Zealand, and Japan. *Front Genome edit* 4, <https://www.frontiersin.org/journals/genome-editing/articles/10.3389/fgeed.2022.899331/full>
- Sprink, T., Wilhem, R., Hartung, F. (2022). Genome editing around the globe: An update on policies and perceptions. *Plant Physiol* 190:1579–1587, <https://academic.oup.com/plphys/article/190/3/1579/6670630>
- Stokstad, E. (2024) First synthetic gene drive for plants could help eradicate weeds. *Science* 384:6703 <https://www.science.org/content/article/first-synthetic-gene-drive-plants-could-help-eradicate-weeds>
- Sturme, M.H.J., Van Der Berg, J.P., Bouwman, L.M.S., De Schrijver, A. et al. (2022) Occurrence and nature of off-target modifications by CRISPR-Cas genome editing in plants. *ACS Agric Sci Technol* 2:192–201, <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acscagitech.1c00270>
- Stuttman, J., Barthel, K., Martin, P., Ordon, J., Erickson, J.L. et al. (2021) Highly efficient multiplex editing: one-shot generation of 8x *Nicotiana benthamiana* and 12x *Arabidopsis* mutants. *Plant J* 106:8-2, doi: 10.1111/tj.15197
- Tabashnik, B.E., Fabrick, J.A., Carrière, Y. (2023) Global patterns of insect resistance to transgenic Bt crops: The First 25 Years. *J Econ Entomol* 116:297-309, <https://doi.org/10.1093/jee/toac183>
- Taylor, O.R., Pleasants, J.M., Grundel, R., Pecoraro, S.D., Lovett, J.R., Ryan, A. (2020) Evaluating the migration mortality hypothesis using monarch tagging data. *Front Ecol Evol* 08, <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fevo.2020.00264/full>
- Teufel, J., Lopez Hernandez, V., Greiter, A., Kampffmeyer, N., Hilbert, I. et al. (2024) Strategies for traceability to prevent unauthorised GMOs (including NGTs) in the EU: State of the art and possible alternative approaches. *Foods* 13:369, <https://www.mdpi.com/2304-8158/13/3/369>
- Then, C. (2020) Genetic engineering endangers the protection of species. <https://www.testbiotech.org/wp-content/uploads/2023/12/Genetic-engineering-endangers-protection-of-species.pdf> (abgerufen 04.06.2024)
- Thirunavukkarasu, N., Sharma, R., Singh, N., Shiriga, K., Mohan, S. et al. (2017) Genome-wide expression and functional interactions of genes under drought stress in maize. *Int J Genomics* doi: 10.1155/2017/2568706, <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/28326315/>
- Townsend, J.A., Wright, D.A., Winfrey, R.J., Fu, F., Maeder, M.L., Joung, J.K., Voytas, D.F. (2009) High-frequency modification of plant genes using engineered zinc-finger nucleases. *Nature* 459:442-445, <https://www.nature.com/articles/nature07845>
- Tsanova, T., Stefanova, L., Topalova, L., Atanasov, A., Pantchev, I. (2020) DNA-free gene editing in plants: a brief overview. *Biotech & Biotech Equipm* 35:131-138, <https://doi.org/10.1080/13102818.2020.1858159>
- Tuladhar, R., Yeu, Y., Piazza, J.T. et al. (2019) CRISPR-Cas9-based mutagenesis frequently provokes on-target mRNA misregulation. *Nat Commun* 10:1-10, doi: 10.1038/s41467-019-12028-5
- Van Bruggen, A.H.C., He, M.M., Shin, K., Mai, V., Jeong, K.C., Finckh, M.R., Morris J.G. Jr. (2018) Environmental and health effects of the herbicide glyphosate. *Sci Tot Environ* 616–617:255-268, <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0048969717330279>
- Van den Eede, G., Aarts, H., Buhk, H.J., Corthier, G., Flint, H.J., Hammes, W. et al. (2004) The relevance of gene transfer to the safety of food and feed derived from genetically modified (GM) plants. *Food Chem Toxicol* 42:1127-56, doi: 10.1016/j.fct.2004.02.001
- Vázquez-Barrios, V., Boege, K., Sosa-Fuentes, T.G., Rojas, P., Wegier, A. (2021) Ongoing ecological and evolutionary consequences by the presence of transgenes in a wild cotton population. *Sci Rep* 11:1959, <https://doi.org/10.1038/s41598-021-81567-z>
- Velander, W.H., Lubon, H., Drohan, W.N. (1997) Transgenic livestock as drug factories. *Sci Am* 276:70–74, <https://www.scientificamerican.com/article/transgenic-livestock-as-drug-factor/>
- Velásquez, A.C., Castroverde, C.D.M., He, S.Y. (2018) Plant and pathogen warfare under changing climate conditions. *Curr Biol* 28:R619–R634, doi: 10.1016/j.cub.2018.03.054.
- Venter, H.J., Bohn, T. (2016) Interactions between Bt crops and aquatic ecosystems. *Env Toxicol Chem* 35-12:2891–2902, https://food.ec.europa.eu/system/files/2017-10/gmo_rep-stud_mon-810_report-2016_ref-097.pdf
- Vogel, B. (2023) Rosa Sojabohnen und Mais mit Blutgeschmack. *GID Magazin* 266:24-25, <https://www.gen-ethisches-netzwerk.de/anbau/genome-editing/266/rosa-sojabohnen-und-mais-mit-blutgeschmack>
- Wada, N., Ueta, R., Osakabe, Y., Osakabe, K. (2020) Precision genome editing in plants: state-of-the-art in CRISPR/Cas9-based genome engineering. *BMC Plant Biology* 20:234, doi: 10.1186/s12870-020-02385-5
- Waltz, E. (2021) GABA-enriched tomato is first CRISPR-edited food to enter market. *Nature Biotechnol* 40:9-11, <https://www.nature.com/articles/d41587-021-00026-2>
- Wang, Y., Cheng, X., Shan, Q., Zhang, Y., Liu, J., Gao, C., Qiu, J.L. (2014a) Simultaneous editing of three homoeoalleles in hexaploid bread wheat confers heritable resistance to powdery mildew. *Nat Biotechnol* 32:947–951, <https://www.nature.com/articles/nbt.2969>

Wang, W., Xia, H., Yang, X., Xu, T., Si, H. J., Cai, X. X., et al. (2014b). A novel 5-enolpyruvylshikimate-3-phosphate (EPSP) synthase transgene for glyphosate tolerance stimulates growth and fecundity in weedy rice (*Oryza sativa*) without herbicide. *New Phytol* 202:679–688, doi: 10.1111/nph.12428

Wani, S.H., Choudhary, M., Barmuckh, R., Bagaria, P.K. et al. (2022) molecular mechanisms, genetic mapping, and genome editing for insect pest resistance in field crops. *Theor Appl Gen* 135:3875-3895, <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/35267056/>

Weisheit, I., Kroeger, J. Malik, R., Klimmt, J., Crusius, D. et al. (2020). Detection of deleterious on-target effects after HDR-mediated CRISPR editing. *Cell Reports* 31:107689, doi: org/10.1101/2020.03.27.012104

Wheeler, M.B. (2013) Transgenic Animals in Agriculture. *Nature Edu Knowl* 4(11):1 <https://www.nature.com/scitable/knowledge/library/transgenic-animals-in-agriculture-105646080/>

Wilson, A.K., Latham, J.R., Steinbrecher, R.A. (2006) Transformation-induced mutations in transgenic plants: Analysis and biosafety implications. *Biotech Gen Engineering Rev* 23:209-234, <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/22530509/>

Wilson, A.K. (2017) Goodbye to Golden Rice? https://www.researchgate.net/publication/323265764_Goodbye_to_Golden_Rice_GM_Trait_Leads_to_Drastic_Yield_Loss_and_Metabolic_Meltdown (abgerufen 02.08.2024)

Wilson, A.K. (2021) Will gene-edited and other GM crops fail sustainable food systems? In: *Rethinking food and agriculture: New ways forward*, 13, doi: 10.1016/B978-0-12-816410-5.00013-X

Wolfenbarger, L.L., Phifer, P. R. (2000) The ecological risks and benefits of genetically engineered plants. *Science* 290:2088-2093.

Yu, Q., Wang, B., Li, N., Tang, Y., Yang, S., Yang, T., Xu, J., et al. (2017) CRISPR/Cas9-induced Targeted Mutagenesis and Gene Replacement to Generate Long-shelf Life Tomato Lines. *Sci Reports* 7:11874, doi: 10.1038/s41598-017-12262-1

Zaller, J.G., Weber, M., Maderthaler, M., Gruber, E., Takács, E., Mörtl, M. et al. (2021) Effects of glyphosate-based herbicides and their active ingredients on earthworms, water infiltration and glyphosate leaching are influenced by soil properties. *Environ Sci Eur* 33:51, <https://doi.org/10.1186/s12302-021-00492-0>

Zeller, S.L., Kalinina, O., Brunner, S., Keller, B., Schmid, B. (2010) Transgene x environment interactions in genetically modified wheat. *PLoS ONE* 5(7):e11405, doi: 10.1371/journal.pone.0011405

Zhao, Y. (2012) Auxin Biosynthesis: A Simple Two-Step Pathway Converts Tryptophan to Indole-3-Acetic Acid in Plants. *Mol Plant* 5:334–338, <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/22155950/>

Zhao, Y., Xin Yang, X., Zhou, G., Zhang, T. (2020) Engineering plant virus resistance: from RNA silencing to genome editing strategies. *Plant Biotechnol J* 18:328–336, <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1111/pbi.13278>

Zhou, J., Zhang, R., Jia, X., Tang, X., Guo, Y. et al. (2022) CRISPR-Cas9 mediated OsMIR168a knockout reveals its pleiotropy in rice. *Plant Biotechnol J* 20(2):310–322, <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/pbi.13713>

Zimmer, C. (2013): *Geklont ins Leben zurück*. *Nat Geographic* 5:64-81, <https://www.nationalgeographic.de/geschichte-und-kultur/geklont-ins-leben-zurueck>

Zsögön, A., Čermák, T., Naves, E.R., Notini, M.M., Edel, K.H. et al. (2018) De novo domestication of wild tomato using genome editing. *Nat Biotechnol* 36:1211–1216, doi: 10.1038/nbt.4272

IMPRESSUM

Bund für Umwelt und Naturschutz Deutschland e.V. (BUND)

Bundesgeschäftsstelle | Kaiserin-Augusta-Allee 5 | 10553 Berlin

Tel. +49 30 27586-40 | Fax +49 30 27586-440 | bund@bund.net

www.bund.net

Redaktion:

Martha Mertens, Matthias Henneberger, Harald Ulmer, Daniela Wannemacher, Pia Voelker.

Verabschiedet durch den wissenschaftlichen Beirat am 22.09.2024, beschlossen vom BUND-Vorstand am 12.10.2024.

V. i. S. d. P.: Nicole Anton

April 2025