

Agro-Gentechnik: zwischen hohen Erwartungen und komplexen Risiken

Der Einsatz der Gentechnik in der Landwirtschaft
bedarf einer umfassenden Technikfolgenabschätzung

Agro-Gentechnik: zwischen hohen Erwartungen und komplexen Risiken

Der Einsatz der Gentechnik in der Landwirtschaft bedarf einer umfassenden Technikfolgenabschätzung

Autoren: Matthias Juhas, Andreas Bauer-Panskus, Christoph Then

Wir danken der Unterstützung durch die
Umweltstiftung Greenpeace



UMWELTSTIFTUNG | GREENPEACE

Impressum

Testbiotech e.V.

Institut für unabhängige Folgenabschätzung
in der Biotechnologie

Frohschammerstr. 14

D-80807 München

Tel.: +49 (0) 89 358 992 76

info@testbiotech.org

www.testbiotech.org

Geschäftsführer: Dr. Christoph Then

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	4
1. Einleitung	6
2. Bisherige Erfahrungen mit transgenen Pflanzen	8
2.1 Nachhaltigkeit und Wirtschaftlichkeit	9
2.1.1 Herbizidresistenzen und Pestizideinsatz	9
2.1.2 Kostenentwicklung und Gewinnerwartungen	10
2.1.3 Resistenzen und sekundärer Befall mit Fraßinsekten	12
2.2 Systemische Auswirkungen auf Lebensmittelproduktion und Pflanzenzüchtung	15
2.2.1 Unternehmenskonzentration	16
2.2.2 Kontaminationen	17
2.2.3 Lebensmittelsicherheit	17
2.3 Auswirkungen transgener Pflanzen auf die Ökosysteme	20
2.3.1 Schäden in Zentren der biologischen Vielfalt	20
2.3.2 Beschleunigte Verbreitung von Schädlingen	20
2.3.3 Unkontrollierte Ausbreitung	21
2.4 Vorteile für VerbraucherInnen?	23
2.5 Zusammenfassung der bisherigen Erfahrungen mit transgenen Pflanzen	24
3. Die Rolle der Technikfolgenabschätzung	25
3.1 Probleme bei der Bewertung der Vor- und Nachteile transgener Pflanzen	25
3.2 Merkmale der Technikfolgenabschätzung	26
3.3 Zukunftsszenarien als wichtiges Instrument der TA	27
3.4 TA als zusätzliche Kontrollebene	27
4. Technikfolgenabschätzung und Neue Gentechnik (NGT)	28
4.1 Unterschiede zwischen NGT und konventioneller Züchtung	29
4.2 Systemische Auswirkungen auf die Umwelt	31
5. Mögliche disruptive Effekte von NGTs auf Züchtung, Landwirtschaft und Lebensmittelmärkte	33
5.1.1 Zugang zur Technologie	34
5.1.2 Zugang zu biologischem Material	34
5.1.3 Einfluss auf Wissenschaft und Risikobewertung	35
5.2 Auswirkungen auf Ernährungssouveränität und Wahlfreiheit	36
6. Welche Erwartungen an die Neue Gentechnik sind realistisch?	37
7. Schlussfolgerungen und Empfehlungen	39
Literaturverzeichnis	40

Zusammenfassung

Die versprochenen Vorteile und hohen Erwartungen, die der Einsatz von transgenen Pflanzen in der Landwirtschaft vor rund 30 Jahren geweckt hatte, wurden bisher nicht oder nur teilweise erfüllt. Doch gibt es bisher kaum systematische und unabhängige Untersuchungen, um deren tatsächliche Auswirkungen auf die Landwirtschaft objektiv zu bewerten.

Bisher werden fast ausschließlich transgene Pflanzen mit zwei Eigenschaften angebaut, Herbizidtoleranz und Insektengiftigkeit. Deren langjähriger und großflächiger Anbau hat in vielen Gebieten eher zu einer Destabilisierung der Agro-Ökosysteme geführt. Der Einsatz von Pestiziden konnte in einigen Anbauregionen zwar kurzfristig verringert werden, stieg dann aber oft erneut an. Grund dafür sind Anpassungen der ‚Unkräuter‘ an die eingesetzten Herbizide und das Auftreten von Resistenzen bei den ‚Schädlingen‘, beziehungsweise das vermehrte Auftreten von Insektenarten, die zuvor nur eine geringere Rolle gespielt hatten. Dies führte zu einem regelrechten ‚Wettrüsten‘ auf dem Acker, wobei die transgenen Pflanzen gegen immer mehr Herbizide resistent gemacht werden und gleichzeitig immer mehr Insektengifte produzieren.

In Bezug auf die Risiken wurden zwar von verschiedenen Behörden Risikobewertungen einzelner gentechnisch veränderter Pflanzen („Events“) vorgenommen. Doch weder kombinatorische Wirkungen noch kumulative Effekte oder Wechselwirkungen der Gentechnik-Pflanzen untereinander wurden bisher eingehend geprüft. Damit werden systemische Effekte auf die Umwelt und die Sicherheit von Nahrungsmitteln nicht ausreichend erfasst. Vorliegende Publikationen zeigen aber, dass insbesondere Wechselwirkungen zwischen den gentechnisch veränderten Pflanzen, beziehungsweise deren Eigenschaften, dazu führen können, dass die Agro-Ökosysteme weiter destabilisiert werden, z.B. durch die beschleunigte Ausbreitung bestimmter ‚Schädlinge‘.

Zudem kommt es in mehreren Regionen bereits zu einer unkontrollierten Ausbreitung transgener Pflanzen u.a. in wilden Populationen. Davon betroffen sind auch Länder ohne Gentechnik-Anbau und in manchen Fällen auch Zentren der biologischen Vielfalt. Dabei kommt es bei den spontanen Kreuzungen mit transgenen Pflanzen auch zu ‚next generation effects‘, d.h. bei den Nachkommen transgener Pflanzen werden Eigenschaften beobachtet, die bei der ursprünglichen Risikobewertung unbekannt waren.

Es gibt weitere problematische Auswirkungen auf die Landwirtschaft, die zwar oft diskutiert werden, aber bisher auf der Ebene der Politik nicht gelöst wurden. Dazu gehören Patente auf gentechnisch verändertes Saatgut, die im Bereich der Pflanzenzüchtung zu einer starken Unternehmenskonzentration geführt haben. Dadurch konnte eine Handvoll global agierender Großkonzerne ihre dominante Marktposition ausbauen. Infolgedessen beeinflussen diese Konzerne in vielen Regionen der Welt die Anbaupraxis auf den Feldern. Dabei nehmen sie oft wenig Rücksicht auf die tatsächlichen Probleme in der Landwirtschaft, sondern lassen sich eher von ihren Gewinnerwartungen leiten. Ein anderes bisher ungelöstes Problem, insbesondere in Ländern mit großflächigem Anbau transgener Pflanzen, ist die Koexistenz mit den gentechnikfreien, traditionellen oder ökologischen Produktionssystemen.

Um solche negativen Auswirkungen bei einer möglichen Einführung von Pflanzen aus Neuer Gentechnik (NGT) zu vermeiden, sollten die bisherigen Zulassungsverfahren durch eine umfassende Technikfolgenabschätzung (TA) ergänzt werden. Ziel der TA soll es sein, potenzielle Vor- und Nachteile von NGT-Anwendungen – einschließlich der ökologischen und sozio-ökonomischen Gesamtauswirkungen – in ihrer Gesamtheit zu untersuchen. So sollen überhöhte Erwartungen kritisch überprüft, potenziell negativen Auswirkungen auf die Ökosysteme vorgebeugt und der Eingriff in den Naturhaushalt und die Umwelt möglichst in Grenzen gehalten werden.

Mit Hilfe der NGTs können wesentlich tiefgreifendere genetische Veränderungen hervorgerufen werden, als es mit den konventionellen Züchtungsverfahren (einschließlich der Zufallsmutagenese) bisher möglich war. Auch wenn dabei keine zusätzlichen Gene eingeführt werden, gehen die genetischen Veränderungen oft weit über das hinaus, was aus der bisherigen Züchtung bekannt ist. Im Ergebnis können extreme Ausprägungen bestimmter Eigenschaften erzielt werden, die mit erheblichen Nebenwirkungen und Risiken für die betroffenen Pflanzen und Tiere und deren Umwelt einhergehen können. Diese Nebenwirkungen („trade-offs“) können beispielsweise Wechselwirkungen mit der Umwelt stören, Tierschutzprobleme hervorrufen oder die Nahrungsmittelsicherheit gefährden. Ebenfalls können sie Nutzpflanzen anfälliger für Klimastress und Krankheiten machen. Ob auf diese Weise tatsächlich z.B. Pflanzen erzeugt werden können, die resistenter gegen negative Umwelteinflüsse wie Klimawandel und Pflanzenkrankheiten sind, muss erst noch gezeigt werden. Die Verfahren der Neuen Gentechnik haben zwar ein großes Potenzial für genetische Veränderungen, aber es ist nicht einfach, dieses Potenzial in tatsächliche Vorteile umzusetzen.

Mit der Neuen Gentechnik sollen auch natürliche Populationen verändert werden, wie z.B. Wildkräuter, Bäume, Bienen und andere Insekten sowie Bodenorganismen. Die entsprechenden gentechnisch veränderten Organismen sind nicht durch die Evolution angepasst und können sich auf mehreren Ebenen (negativ) auf die Ökosysteme wirken. Solche Freisetzungen hätten das Potenzial, den weiteren Verlauf der Evolution zu verändern und künftige Anpassungsprozesse zu stören. Es besteht das Risiko, dass diese Organismen in ihrer Gesamtheit einen negativen Einfluss auf die jeweiligen Arten, Populationen und Ökosysteme ausüben, der über die Risiken hinausgeht, die für die einzelnen NGT-Organismen im Rahmen der Zulassungsprüfung identifiziert wurden. Ähnlich wie bei der Verschmutzung der Umwelt mit Plastik und Chemikalien muss es nicht ein bestimmter Gentechnik-Organismus sein, der die Probleme verursacht. Vielmehr können die Gesamtheit der Auswirkungen unterschiedlicher Gentechnik-Organismen und deren Interaktionen entscheidend sein. Dabei können Umweltprobleme bzw. Organismen möglicherweise lange in der Umwelt überdauern und somit viele zukünftige Generationen belasten, weshalb die Einbringung von gentechnisch veränderten Organismen in die Umwelt möglichst begrenzt werden sollte.

Der Einsatz der Neuen Gentechnik wird oft damit begründet, dass angesichts des Klimawandels neue Lösungen benötigt werden, um die Welternährung zu sichern. Doch neue Lösungen können nicht als nachhaltig gelten, wenn ihr Einsatz dazu führen kann, dass die Ökosysteme durch massenhafte Freisetzungen nicht angepasster Organismen überlastet werden, Risiken unbemerkt in Lebensmitteln akkumulieren, Züchtung durch Patente behindert wird und die Interessen der VerbraucherInnen missachtet werden.

Die Konzepte von Natur- und Umweltschutz basieren zu großen Teilen auf dem Prinzip der Vermeidung von Eingriffen. Diese müssen auch im Bereich der Gentechnik zur Anwendung kommen. Die Einführung der Technikfolgenabschätzung in die Gentechnikregulierung kann dazu beitragen, die Art und die Anzahl von möglichen Freisetzungen gentechnisch veränderter Organismen wirksam zu kontrollieren und zu begrenzen.

Dazu bedarf es geeigneter Kriterien, um faktengestützte Entscheidungen über die Nachhaltigkeit und den potenziellen Nutzen der Neuen Gentechnik in der Landwirtschaft treffen zu können. Dadurch wäre es möglich, negative Auswirkungen auf die Züchtung, die Landwirtschaft und die Erzeugung von Lebensmitteln rechtzeitig zu erkennen, und zu verhindern, dass angebliche Lösungen durch die Neue Gentechnik vielmehr zu neuen Problemen für Umwelt, Ökosysteme und künftige Generationen werden.

1. Einleitung

Das ursprünglich aus der Forstwirtschaft stammende Konzept der Nachhaltigkeit wurde 1987 in einem Bericht der Brundtland-Kommission für Umwelt und Entwicklung der Vereinten Nationen in die heutige Umweltdebatte eingeführt (WCED, 1987). Darin wurde Nachhaltigkeit als eine „*Entwicklung, die die Bedürfnisse der Gegenwart befriedigt, ohne zu riskieren, dass künftige Generationen ihre eigenen Bedürfnisse nicht befriedigen können*“ definiert. Seitdem ist der v.a. auf wirtschaftlichen Überlegungen beruhende Begriff sehr erfolgreich und findet sich z.B. auch in den ‚Sustainable Development Goals‘ (SDGs) der Vereinten Nationen wieder.

Sein häufiger und inzwischen interdisziplinärer Gebrauch führt aufgrund der weit gefassten Definition mittlerweile jedoch oftmals auch zu fragwürdigen Verwendungen. Der Begriff der Nachhaltigkeit bezieht sich in vielen Fällen vor allem darauf, dass bestimmte Technologien oder einzelne Produkte in Bezug auf spezielle Kriterien (z.B. Reduktion von CO₂-Emissionen, Reduktion von Pestiziden oder effizienter Ressourceneinsatz) besser abschneiden sollen als bisherige Produkte oder Technologien. Infolgedessen beschränken sich die Nachhaltigkeitsziele immer mehr darauf, neue Produkte oder technologische Innovationen in bestehende Systeme einzuführen, ohne diese Systeme als Ganzes weiterzuentwickeln, sondern nur bestimmte Eigenschaften der Produkte zu ‚verbessern‘. Diese erwarteten ‚Benefits‘ werden dann mit Nachhaltigkeit gleichgesetzt. Die neuen, ‚besseren‘ Produkte werden anschließend durch ‚noch bessere‘ oder ‚noch effizientere‘ Produkte oder Verfahren ersetzt. Diese Vorgehensweise folgt dabei den systemimmanenten Innovations- und Marketingzyklen der kapitalistischen Wachstumslogik.

Vor diesem Hintergrund erscheint die Verwendung des Nachhaltigkeitsbegriffs im Zusammenhang mit der Gentechnik als zweischneidig. Eine grundsätzliche Frage, die hier zu stellen ist, lautet etwa: Inwieweit sind traditionelle Verfahren zur Zucht und Lebensmittelerzeugung tatsächlich durch gentechnisch veränderte Pflanzen und Tiere ersetzbar, ohne dabei die Ernährungssicherheit und die natürlichen Lebensgrundlagen zu gefährden? Eine weitere Frage betrifft die tatsächliche Eignung der Gentechnik zur Lösung von Problemen wie die Anpassung an den Klimawandel und der Reduktion von Pestiziden. Geht es in erster Linie um Profite oder tatsächlich um ‚echten Fortschritt‘? Und welche neuen Probleme und Gefahren können entstehen, wenn gentechnisch veränderte Organismen in die Ökosysteme gelangen?

Werden Fragen wie diese nicht im Voraus beantwortet, besteht die Gefahr, dass möglicherweise resultierende, negative ökologische und wirtschaftliche Folgen auf die kommenden Generationen verlagert werden. Das widerspricht jedoch sowohl der Idee einer zukunftsgerechten Landwirtschaft als auch dem ursprünglichen Gedanken der Nachhaltigkeit, wie sie von der Brundtland-Kommission definiert wurde.

In der EU ist die Nachhaltigkeit insbesondere ein wichtiges Argument bei der Diskussion über die künftige Regulierung der ‚Neuen Gentechnik‘ (NGT). In der Debatte um den Einsatz von Pflanzen aus Neuer Gentechnik werden potenzielle Vorteile wie der mögliche Verzicht auf chemisch-synthetische Pestizide, die drastische Absenkung der CO₂-Emissionen oder die höhere Effizienz oft einfach als ein bewiesenes Faktum dargestellt.

So wurde von der EU-Kommission im Rahmen einer öffentlichen Konsultation der Eindruck erweckt, die behaupteten Vorteile von Pflanzen aus Neuer Gentechnik seien bereits gegebene Tatsachen (EU-Kommission, 2022):

„...dass Pflanzen, die mit NGTs erzeugt wurden, das Potenzial haben, zu den Zielen des Europäischen Green Deal und insbesondere zu den Farm-To-Fork und Biodiversitäts-Strategien sowie zu den SDGs der Vereinten Nationen für ein widerstandsfähigeres und nachhaltigeres Agrar- und Ernährungssystem beizutragen. Beispiele für potenzielle Vorteile sind Pflanzen, die widerstandsfähiger gegen Schädlinge, Krankheiten

und die Auswirkungen des Klimawandels (z. B. die zunehmende Schwere und Häufigkeit von extremen Hitzewellen, Dürren und Regenfällen) oder gegen Umweltbedingungen im Allgemeinen sind oder weniger natürliche Ressourcen und Düngemittel benötigen. NGTs könnten auch den Nährstoffgehalt von Pflanzen für eine gesündere Ernährung verbessern oder den Gehalt an schädlichen Stoffen wie Toxinen und Allergenen reduzieren.“

Weiterhin wurde von der EU-Kommission im Rahmen der öffentlichen Konsultation auch vorgeschlagen, den VerbraucherInnen mit Hilfe eines Labels in Zukunft Informationen über den Nachhaltigkeitsbeitrag der jeweiligen NGT-Pflanzen bzw. -Produkte zugänglich zu machen. Aber für ein derartiges Label wären hinreichend klare und transparente Standards und Kriterien unabdingbar, um verlässliche Bewertungen über Nachhaltigkeit und potenzielle Vorteile zu treffen. Bisher gibt es jedoch – ebenso wenig wie bei der Einführung von transgenen Pflanzen – keinen etablierten Rahmen mit klaren und transparenten Standards und Kriterien, um evidenzbasierte Entscheidungen über die Nachhaltigkeit und die potenziellen Vorteile dieser Produkte treffen zu können. Daher besteht die Gefahr, dass es ohne solche Standards zu Fehlinformationen und Wettbewerbsverzerrung kommen könnte.

Um echte Nachhaltigkeit bzw. tatsächlichen Fortschritt zu erreichen, kommt es also darauf an, leere Versprechen und zu hohe Erwartungen von tatsächlich möglichen Vorteilen zu unterscheiden. Das technische Potenzial der NGTs und deren Reichweite machen es erforderlich, hier angemessene Kriterien festzulegen, um möglichst geeignete Lösungen zu erkennen und diese nach ihrer tatsächlichen Notwendigkeit zu bewerten.

Da es auch in Zukunft nicht machbar sein wird, alle möglichen Auswirkungen der verschiedenen Gentechnik-Organismen auf ihre Umwelt abzuschätzen, muss – für einen verantwortungsvollen Umgang – deren Eintrag in die Umwelt so weit wie möglich begrenzt bleiben. Ansonsten kann, ähnlich wie bei anderen Problemstoffen (z.B. Plastik, Pestiziden und anderen Chemikalien), die Anzahl der freigesetzten Gentechnik-Organismen die Stabilität der Ökosysteme aus dem Gleichgewicht bringen. Um derartige Kipp-Punkte zu vermeiden, muss ihr möglicher Eintrag dementsprechend auf das begrenzt werden, was tatsächlich notwendig ist – wobei risikoärmere Alternativen, z.B. aus der konventionellen Züchtung, der Agrarökologie oder anderen Sektoren innerhalb der Lebensmittelproduktionssysteme, stets in diese Abwägungen miteinbezogen werden müssen.

In der Vergangenheit haben Technologien, die eigentlich zur Lösung von Problemen eingesetzt wurden (u.a. in den Bereichen Energie, Landwirtschaft und Verkehr), sehr oft neue Probleme, wie z. B. Klimawandel, Atom-müll, Umweltverschmutzung oder Artensterben verursacht (EEA, 2001). Derartige negative Auswirkungen auf die Umwelt, aber auch potenziell negative sozio-ökonomische Folgen gilt es mit Hilfe einer vorausschauenden Technikfolgenabschätzung für die Anwendungen der Neuen Gentechnik möglichst zu verhindern.

2. Bisherige Erfahrungen mit transgenen Pflanzen

Die Einführung transgener Pflanzen vor etwa 30 Jahren wurde ursprünglich u.a. mit den möglichen Vorteilen für die Pflanzenzucht, die Landwirtschaft und die Ernährungssicherheit begründet.

Konkret ging es um Ziele wie die Einsparung von Pestiziden, Ertragsteigerungen, Resistenz gegen Umwelteinflüsse oder auch um Lebensmittel, die Vorteile für die VerbraucherInnen haben sollen. Die Entwicklung blieb aber weit hinter dem zurück, was beispielsweise 1992 als Prognose der Organisation für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung (OECD) veröffentlicht wurde, die auf Umfragen der Industrie beruhte (Tabelle 1).

Tabelle 1: „Voraussichtliche Entwicklung der Agrobiotechnologie“, OECD 1992

1990-1993	Herbizid- und Pestizidtoleranz
1993-1996	Verbesserung in der Verarbeitung
1996-1999	Industrielle Produktion pharmazeutischer Produkte
1999-2003	Umwelttoleranz
2003-2006	Direkte Ertragssteigerungen

Bisher wurden nur sehr wenige Gentechnik-Eigenschaften auf den Markt gebracht. Dabei handelt es sich fast ausschließlich um Herbizidresistenzen (v.a. gegen das Totalherbizid Glyphosat) und die Produktion von Insektengiften (v.a. Bt-Toxine aus dem Bodenbakterium *Bacillus thuringiensis*). Dies zeigt sich auch in den Eigenschaften der Pflanzen, die in der EU zum Import zugelassen sind (Abb. 1).

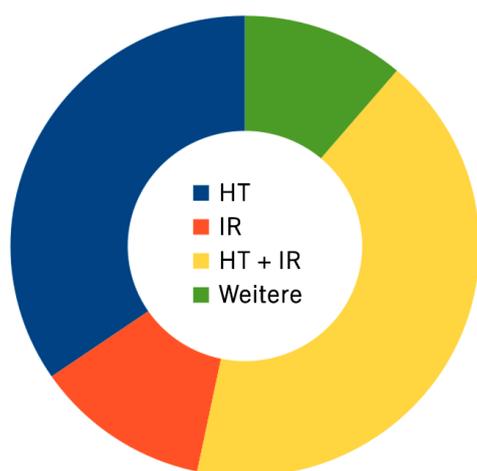


Abbildung 1: EU-Zulassungen gentechnisch veränderter Pflanzen (PlantGeneRisk-Datenbank, Stand Januar 2023).¹
 HT: Herbizidtolerante Pflanzen (37); IR: Insektengift produzierende Pflanzen (13); HT+IR: Kombinationen beider Merkmale (45);
 Weitere (12): 6x veränderter Ölgehalt (Soja), 2x Pollensterilität (Raps), 2x verbesserte Ethanolgewinnung (Mais), 1x erhöhter Biomasseanteil (Mais) und 1x Trockentoleranz (Mais).

Im Folgenden werden einige der bisherigen Erfahrungen im Anbau transgener Pflanzen im Hinblick auf Nachhaltigkeit und Wirtschaftlichkeit für die Landwirtschaft (2.1), die Auswirkungen auf Lebensmittelproduktion und Pflanzenzüchtung (2.2), die Auswirkungen auf Biodiversität und Stabilität der Ökosysteme (2.3) und den Vorteilen für die VerbraucherInnen (2.4) aus einer kritischen Perspektive beleuchtet. Dabei wird deutlich, dass sich viele Erwartungen an den Einsatz der Gentechnik in der Landwirtschaft nicht erfüllt haben.

¹ <https://www.testbiotech.org/gendatenbank>

Es zeigt sich, dass von der Industrie unabhängige Daten und Bewertungen der Auswirkungen der Gentechnik auf Landwirtschaft, Lebensmittelerzeugung und Saatgutproduktion oft fehlen. Zum Teil gibt es widersprüchliche Aussagen, die u.a. auf unterschiedliche Methoden bei der Datenauswahl und -analyse zurückgehen. Deutlich wird, dass die ursprünglich geweckten Erwartungen von der Realität zum Teil deutlich abweichen.

Vor diesem Hintergrund wird im Folgenden diskutiert, was eine vorausschauende Technikfolgenabschätzung (TA) in diesem Zusammenhang leisten sollte, um ähnliche Fehleinschätzungen bzw. Fehlentwicklungen in Zukunft zu verhindern und gleichzeitig die systemischen Auswirkungen in den Fokus zu nehmen. Es ist wichtig, diese Debatte jetzt zu führen, weil in der EU derzeit intensiv über die zukünftige Regulierung der Neuen Gentechnik diskutiert wird.

2.1 Nachhaltigkeit und Wirtschaftlichkeit

Es gibt zahlreiche Publikationen von ExpertInnen, die oft der Industrie nahe stehen und die besagen, dass der Anbau transgener Pflanzen mit teils erheblichen Vorteilen für die Umwelt (z.B. Brookes & Baarfoot, 2014; Brookes & Baarfoot, 2020; Brookes, 2022b/c), die Gesundheit (z.B. Smyth, 2019) und die Wirtschaftlichkeit (z.B. Gianessi & Carpenter, 2000; Kaphengst et al., 2010; Klümper & Qaim, 2014; Brookes, 2019; Brookes, 2022a) einhergehe oder einhergehen könne, wenn sie großflächig eingesetzt werden (z.B. Kovak et al., 2022). Als vorteilhafte Faktoren werden unter anderem höhere Erträge, geringere Treibhausgasemissionen, verbesserte Bodenqualität, weniger Pestizideinsatz und höhere Gewinne (v.a. in Entwicklungsländern) genannt.

In anderen Veröffentlichungen wurde dagegen gezeigt, dass sich beispielsweise die Menge der eingesetzten Herbizide auf den Gentechnik-Feldern entgegen den Erwartungen nicht verringert, sondern im Laufe der Zeit sogar erhöht hat (siehe 2.1.1). Es liegen Studien vor in denen soziale, wirtschaftliche und ökologische Nachhaltigkeitsaspekte untersucht werden und die die Nachhaltigkeit des Anbaus transgener Pflanzen grundsätzlich in Frage stellen (Fischer et al., 2015; Binimelis & Myhr, 2016; Phélinas et al., 2017; Catacora-Vargas et al., 2018). Diese Studien kommen demzufolge zu ganz anderen Ergebnissen als die zuvor genannten Publikationen.

Je nach Kontext, Perspektive, Fragestellung, Methodik und wirtschaftlichen Erwartungen werden die bisherigen Erfahrungen mit dem Anbau von Gentechnik-Pflanzen also sehr unterschiedlich bewertet. Nachfolgend werden einige Erfahrungen mit dem Anbau transgener Pflanzen zusammengefasst und aus einer kritischen Perspektive bewertet.

2.1.1 Herbizidresistenzen und Pestizideinsatz

Viele Studien kommen zu dem Ergebnis, dass nach der Einführung herbizidtoleranter Gentechnik-Pflanzen der Herbizideinsatz (insbesondere die Menge an Glyphosat, aber auch Glufosinat, 2,4-D oder Dicamba) auf Mais-, Soja- und Baumwollfeldern v.a. in den Hauptanbaugebieten in Nord- und Südamerika nicht gesunken, sondern deutlich angestiegen ist (Benbrook, 2012; Coupe & Capel, 2015; Schütte et al., 2017; Miyazaki et al., 2019; Schulz et al., 2021). Eine wesentliche Ursache für diesen Anstieg ist die Ausbreitung herbizidresistenter Unkräuter, insbesondere gegenüber Glyphosat. Als Monsanto im Jahr 2000 in den USA einen Antrag auf Anbau des gegen Glyphosat resistenten Gentechnik-Maises NK603 stellte, warnten bereits einige ExpertInnen davor, dass die Unkräuter gegen das Spritzmittel rasch resistent werden könnten. Doch Monsanto brachte Gegenargumente, die die Behörden überzeugten. Im Antrag auf Zulassung aus dem Jahr 2000 heißt es:²

2 https://www.aphis.usda.gov/brs/aphisdocs/00_01101p.pdf, zitiert nach Then (2015)

„Obwohl nicht behauptet werden kann, dass es nicht zur Entstehung von Resistenzen gegen Glyphosat kommen wird, ist zu erwarten, dass die Entstehung von Resistenzen nur ein sehr seltenes Ereignis sein wird, weil:

- 1. Unkräuter und Nutzpflanzen natürlicherweise nicht gegen Glyphosat resistent sind und der langjährige ausgiebige Gebrauch von Glyphosat nur in wenigen Fällen zur Entstehung von resistenten Unkräutern geführt hat;*
- 2. Glyphosat viele einzigartige Eigenschaften hat, wie seine Wirkungsweise, chemische Struktur, seine begrenzte Umsetzung im Stoffwechsel der Pflanzen und das Fehlen von aktiven Rückständen im Boden, die eine Entstehung von Resistenzen unwahrscheinlich machen;*
- 3. eine Selektion auf Resistenzen gegen Glyphosat unter Verwendung von Pflanzen und Zellkulturen nicht erfolgreich war und daher auch in der Natur unter normalen Feldbedingungen nur selten zu erwarten sein sollte.“*

Diese Prognose war offensichtlich falsch. In der Datenbank „Weedscience“ (www.weedscience.org) wird seit einigen Jahren das vermehrte Auftreten neuer, gegen Glyphosat resistente Unkräuter u.a. in verschiedenen US-Bundesstaaten registriert. Diese Unkräuter können mit Glyphosat entweder gar nicht mehr oder nur noch mit sehr hohen Dosierungen bekämpft werden. In den USA sind laut Datenbank aktuell 17 gegen Glyphosat resistente Unkrautarten in über 40 Bundesstaaten registriert³ und inzwischen ungefähr 60-80 Prozent der mit Mais, Soja oder Baumwolle bewirtschafteten Flächen von glyphosatresistenten Unkräutern betroffen (Brookes, 2022c). Die wirtschaftlichen Schäden sind erheblich.

2.1.2 Kostenentwicklung und Gewinnerwartungen

Laut Benbrook (2012) kann aus von Dow AgroSciences vorgelegten Zahlen abgeleitet werden, dass durch die Ausbreitung der glyphosatresistenten Unkräuter die Kosten der US-LandwirtInnen schon vor 2012 um 50-100 Prozent gestiegen sind. Den darin zitierten Studien zufolge erhöhten sich die Kosten im Sojaanbau in Arkansas von 16 auf 44 US-Dollar je Acre ($\approx 0,4$ ha), in Illinois (Sojaanbau) von 19 auf 31 und beim Maisanbau in Iowa von 19 auf 32 US-Dollar.

Der Fachzeitschrift Science zufolge, stiegen die Ausgaben beim Baumwollanbau im Süden der USA innerhalb weniger Jahren dramatisch – von 50-75 auf 370 US-Dollar pro Hektar; beim Anbau von Sojabohnen in Illinois von 25 auf 160 US-Dollar pro Hektar (Service, 2013). Aufgrund dieser Kostenentwicklung nahm der Anbau von Baumwolle in Arkansas um 70 Prozent und in Tennessee um 60 Prozent ab. Als die Preise für Saatgut und Düngemittel zwischenzeitlich sanken, konnte sich die Baumwollproduktion in den USA ab 2015 zwar leicht erholen, diese temporäre Entwicklung war aber nicht von Dauer, ab 2019 stiegen die Produktionskosten erneut (Abb. 2 und 3).⁴

³ <https://weedscience.org/Pages/filter.aspx>

⁴ <https://www.ers.usda.gov/webdocs/DataFiles/47913/CottonCostReturn.xlsx?v=6554.7>

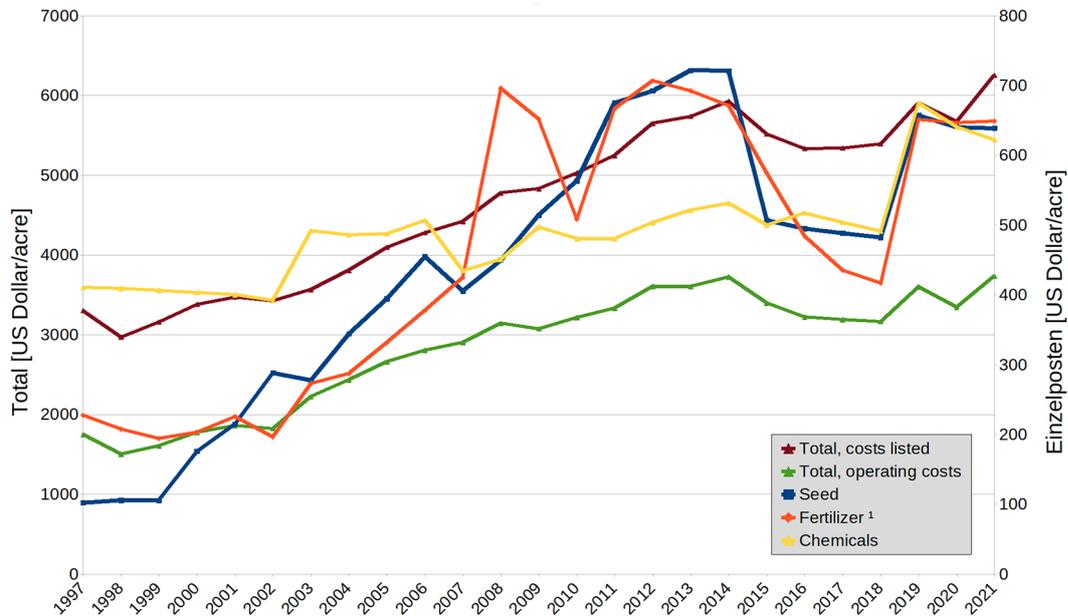


Abbildung 2: Betriebskostenentwicklung für den Baumwollanbau in den USA.⁵

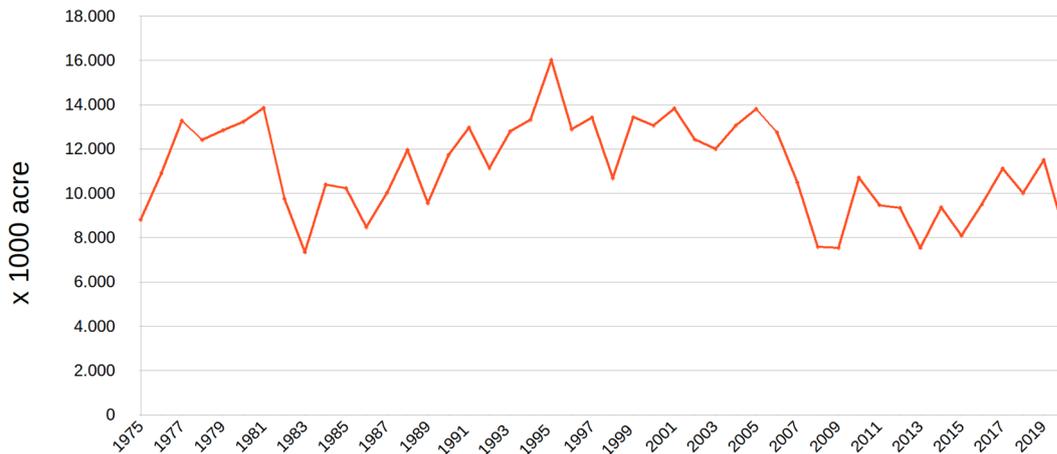


Abbildung 3: Baumwolle-Erntemengen in den USA zwischen 1975 und 2020.⁶

Ähnlich differenzierte Berichte über geringere Erträge, steigende Kosten und schlechtere Renditen liegen beispielsweise auch für den Anbau von Gentechnik-Baumwolle im sog. Cotton-Belt der USA (Jost et al., 2008), Bt-Baumwolle in China, Indien und Südafrika (Glover, 2010; Gutierrez et al., 2020; Kranthi & Stone, 2020; Najork et al., 2022) sowie auf globaler Ebene vor (Finger et al., 2011; Catacora-Vargas et al., 2018).

⁵ <https://www.ers.usda.gov/webdocs/DataFiles/47913/CottonCostReturn.xlsx?v=6554.7>

⁶ <https://www.ers.usda.gov/webdocs/DataFiles/48516/U.S.CottonSupplyandDemand.xlsx?v=5046.1>

Aktuell gibt es laut Datenbank weltweit 56 gegen Glyphosat resistente Unkrautarten,⁷ von denen die meisten in Verbindung mit dem Anbau gentechnisch veränderter Pflanzen stehen (Heap & Duke, 2018). Spitzenreiter sind in diesem Zusammenhang die USA und Argentinien mit jeweils 17 resistenten Arten, gefolgt von Brasilien (11) und Kanada (8). Weitere Resistenzen wurden seit knapp zehn Jahren inzwischen auch in Australien und Südafrika, aber auch in Europa und Asien dokumentiert, also in Ländern auf insgesamt sechs Kontinenten (Heap, 2014; Sammons & Gaines, 2014). In Bezug auf die Anzahl der gegen einzelne Herbizid-Wirkstoffe resistenten Arten belegt Glyphosat, nach dem in der EU inzwischen seit ca. 20 Jahren verbotenen Spitzenreiter Atrazin, bereits Platz zwei der Top-Ten.⁸

2.1.3 Resistenzen und sekundärer Befall mit Fraßinsekten

Gleichzeitig führte der Anbau von Pflanzen, die Insektengifte produzieren (hauptsächlich Bt-Toxine) einerseits zur Ausbildung von Resistenzen bei den ursprünglichen Fraßinsekten und andererseits zu sekundärem Schädlingsbefall, der durch den Austausch der Insekten in verschiedenen Regionen verursacht wurde (Zhao et al., 2011; Tabashnik et al., 2013; Cheke, 2018; Gassmann, 2021; Xiao et al., 2021).

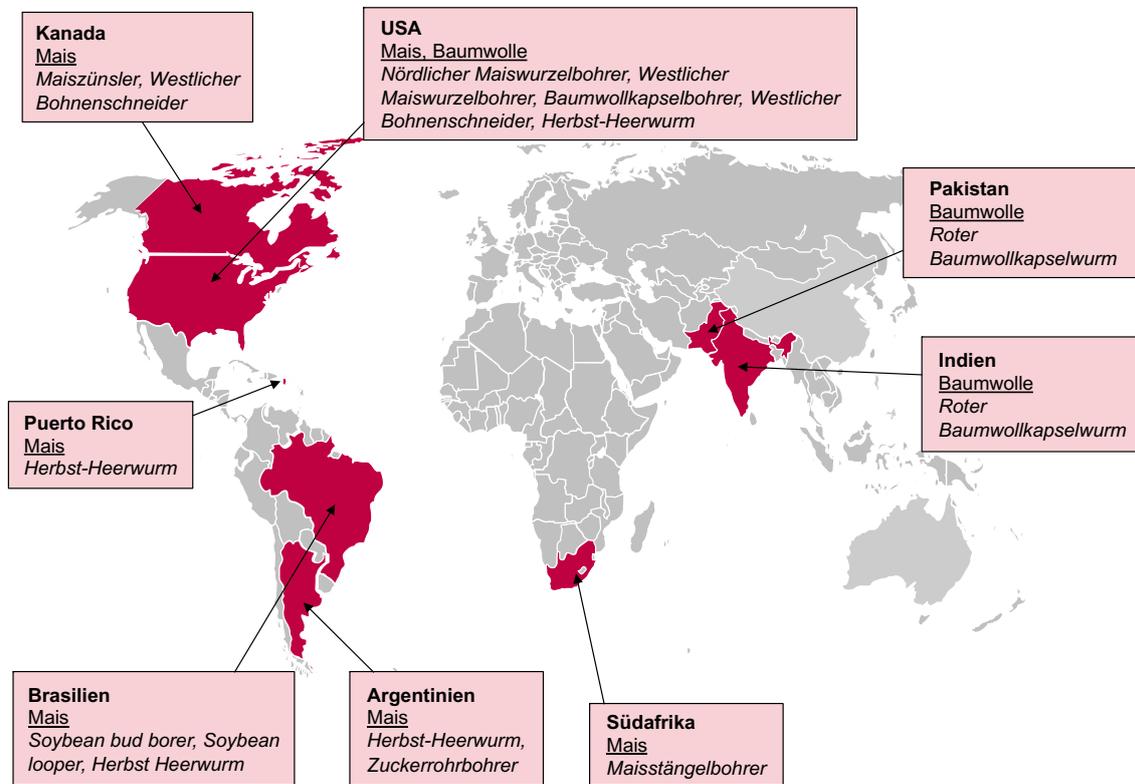
Seit dem Auftreten erster Resistenzen beim Anbau gentechnisch veränderter Bt-Pflanzen vor rund 20 Jahren hat die Resistenzbildung gegen diese Bt-Toxine – und in der Folge auch daraus resultierende Ernteschäden – deutlich zugenommen und sich weltweit ausgebreitet (Abb. 4). Zudem gibt es weltweit für weitere Fraßinsekten zunehmende Warnhinweise hinsichtlich einer verringerten Empfindlichkeit gegenüber Bt-Toxinen (Tabashnik et al., 2023). Auch der Zeitraum für die Ausbildung solcher Resistenzen der Fraßinsekten hat sich durchschnittlich von acht auf vier Jahre halbiert (Tabashnik & Carrière, 2017; Tabashnik et al., 2023). Ursachen für diese Beschleunigung sind u.a. die parallele Entwicklung von Resistenzen gegen mehrere Bt-Toxine mit ähnlichen Wirkmechanismen und der großflächige und wiederholte Anbau von Bt-Pflanzen (Bernardi et al., 2015; Zukoff et al., 2016; Jakka et al., 2016; Ludwick et al., 2017; Machado et al., 2020; Gassmann, 2021). In den USA haben diese Mehrfachresistenzen mittlerweile zu großen Problemen geführt. Die US-Umweltschutzbehörde empfiehlt deshalb, die Bt-Toxin produzierenden Pflanzen schrittweise aus dem Verkehr zu ziehen.^{9,10} Eine Ausnahme sind transgene Pflanzen, die das aktuell einzige noch wirksame Bt-Toxin Vip3Aa produzieren. Im Südosten der USA zeigte beispielsweise der Baumwollkapselbohrer (*Helicoverpa zea*) in über 80 Prozent der Feldpopulationen eine bis zu 150-fach höhere Resistenz gegenüber dem häufig verwendeten transgenen Bt-Toxin Cry1Ab, während er in dieser Region weiterhin anfällig für das Vip3Aa20-Toxin ist (Niu et al., 2021). Mittlerweile wurde dort aber auch schon von ersten Resistenzen gegenüber Vip3Aa berichtet (Yang et al., 2021). Ein weiteres Beispiel ist der westliche Maiswurzelbohrer (*Diabrotica virgifera virgifera*). Dieser hat, u.a. aufgrund der dominanten Vererbung der Bt-Resistenzen und möglicherweise sogar positiven Effekten der Bt-Toxine auf die Fitness der überlebenden Larven, Resistenzen gegen die entsprechenden Bt-Toxine ausgebildet (Oswald et al., 2012; Gassmann, 2021). Als Antwort auf die zunehmenden Bt-Resistenzen wurde Gentechnik-Mais mit zusätzlichen Transgenen ausgestattet, die den Mechanismus der RNA-Interferenz (RNAi) aktivieren. Mithilfe des RNAi-Mechanismus werden Stoffwechsel-Gene der Larven ausgeschaltet, was schließlich zum Tod der Insekten führt (Darlington et al., 2022). Doch gegen die RNAi-Methode können sich ebenfalls verschiedene Resistenzmechanismen etablieren, sodass ein dauerhafter und ausreichender Schutz gegen den Wurzelbohrer auch mit dieser Strategie fraglich ist (Khajuria et al., 2018).

7 <https://www.weedscience.org/Pages/filter.aspx>

8 <https://www.weedscience.org/Pages/Graphs/activebyspecies.aspx>

9 <https://www.dtnpf.com/agriculture/web/ag/crops/article/2020/09/29/epa-proposes-phasing-dozens-bt-corn>

10 <https://www.regulations.gov/document/EPA-HQ-OPP-2019-0682-0052>



Januar 2023

Abbildung 4: Weltweit haben wichtige Schädlinge inzwischen Resistenzen gegen Bt-Toxine entwickelt (nach Tabashnik et al., 2023).

Ein weiteres Problem ist der sekundäre Schädlingsbefall. Da die Bt-Toxine der Gentechnik-Pflanzen nur gegen eine begrenzte Anzahl von Schädlingen wirken, sind die Pflanzen nach wie vor für viele andere Schädlinge anfällig. Daher hat (als indirekter Effekt des Anbaus von Bt-Pflanzen) die Bekämpfung primärer Pflanzenschädlinge inzwischen die Bildung von sekundärem Schädlingsbefall hervorgerufen (Abb. 5). Das vermehrte Auftreten von Sekundärschädlingen wird u.a. auf die anfängliche Reduktion von Breitband-Pestiziden, den Rückgang natürlicher Feinde und eine Abnahme der Konkurrenz zwischen den verschiedenen Fraßinsekten zurückgeführt. Neben der Zunahme von Resistenzen sind diese sekundären Schädlinge heute zu einem weiteren Kernproblem im Zusammenhang mit dem Anbau von Bt-Pflanzen geworden, die erneut den Einsatz von synthetischen Pestiziden erfordern und somit die Kosten für die LandwirtInnen wieder erhöhen (Men et al., 2005; Zhao et al., 2011). In Nord- und Südamerika sowie in China und Indien wird (v.a. beim Anbau von Bt-Mais und -Baumwolle) seit über zehn Jahren vom zunehmenden Auftreten solcher Sekundärschädlinge berichtet (Naranjo, 2011; Zhao et al., 2011; Smith et al., 2018). Dazu kommen neue Arten, die in diesen Regionen bisher nicht beobachtet wurden (Nagrare et al., 2009; Tay et al., 2013; Horikoshi et al., 2021).

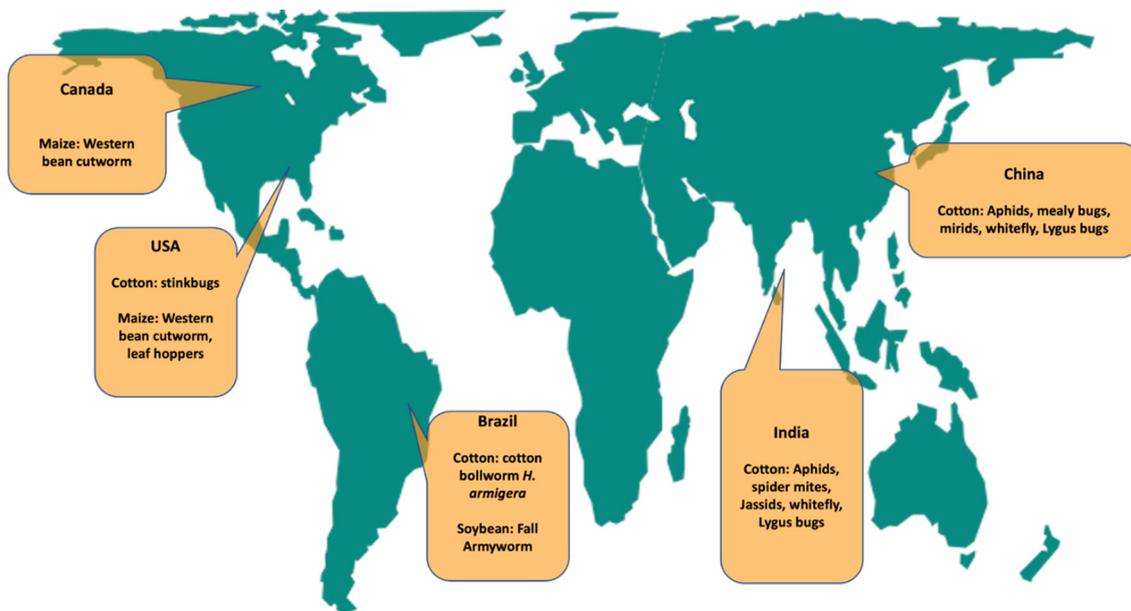


Abbildung 5: Beim Anbau von Bt-Pflanzen kommt es durch den Austausch der Schädlinge zu sekundärem Schädlingsbefall (Third World Network, 2022). Einige weitere Sekundärschädlinge, die mittlerweile in Sojafeldern in Brasilien auftreten (Soybean Looper) sind inzwischen ebenfalls gegen Bt-Toxine resistent (Horikoshi et al., 2021).

Seitens der Gentechnikindustrie besteht die Antwort auf diese Probleme darin, Pflanzen auf den Acker zu bringen, die gleich mehrere Insektengifte produzieren, sogenannte ‚Stacked Events‘. Diese ‚Stacked Events‘ werden durch die Kreuzung gentechnisch veränderter Pflanzen erzeugt, um so mehrere Eigenschaften zu kombinieren. Die daraus resultierenden Gentechnik-Pflanzen besitzen oft mehrere Resistenzen gegen Herbizide und produzieren aktuell bis zu einem halben Dutzend Insektizide (wobei die Insektengifte meist auf der Grundlage von synthetischer DNA gebildet werden und zum Teil stark von Varianten abweichen, die in der Natur vorkommen) (Abb. 6). Durch das Stacking werden so auch die Risiken und Unwägbarkeiten der Ausgangspflanzen kombiniert.

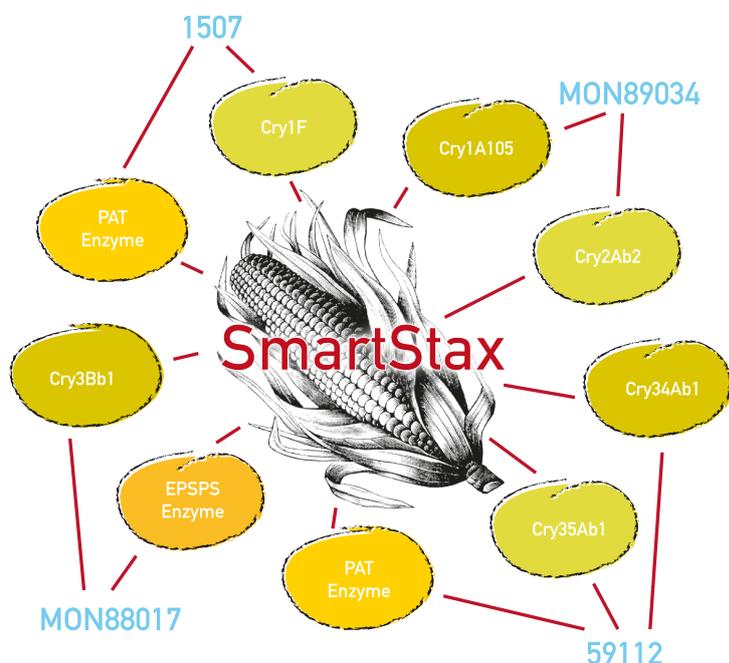


Abbildung 6: ‚SmartStax‘-Mais (ursprünglich Monsanto und Dow AgroSciences). Der Mais ist eine Kombination aus vier gentechnisch veränderten Events (MON88017, MON89034, DP59122, DP1507): er produziert sechs Bt-Insektengifte (Cry-Toxine aus verschiedenen *Bacillus thuringiensis* Stämmen, eines davon, Cry1A105, ist synthetisch hergestellt) und ist tolerant gegen zwei Herbizide (Glufosinat durch das PAT-Enzym und Glyphosat durch das EPSPS-Enzym)

Damit aber steigt die Belastung für die Umwelt, die Wahrscheinlichkeit für ungewollte Wechselwirkungen auf dem Acker und in der Ernte und nicht zuletzt auch die Kosten für das Saatgut. Eine zufriedenstellende Wirksamkeit wurde trotzdem in vielen Fällen nicht erreicht (siehe z.B. Schulz et al., 2021).

In der Folge sind die Kosten des Anbaus von transgener Baumwolle in einigen Regionen der USA so angestiegen, dass dieser dort eingestellt wurde (Benbrook, 2012; Service, 2013). Dabei spielen mehrere Faktoren eine Rolle, darunter auch die Aufwendungen für chemischen Pflanzenschutz (siehe Abb. 2). Bei Kleinbauern in Südafrika wurde ebenfalls gezeigt, dass diese mit steigenden Produktionskosten beim Anbau von Bt-Baumwolle konfrontiert waren (Pschorn-Strauss, 2005; Fok et al., 2007; Schnurr, 2012).

Auch für Soja und Mais sind starke Anstiege bei den Betriebskosten dokumentiert,^{11,12} allerdings profitierten diese Märkte von einer weltweit wachsenden Nachfrage: Die Ernte hat in den letzten Jahren oft nicht nur eine hohe Nachfrage als Lebens- und Futtermittel erfahren, sondern auch als Ausgangsstoff für Agro-Kraftstoffe. Es ist anzunehmen, dass die in der Tendenz steigenden Erzeugerpreise ein Grund dafür sind, warum der Anbau dieser Pflanzen profitabler ist als der von transgener Baumwolle.

2.2 Systemische Auswirkungen auf Lebensmittelproduktion und Pflanzenzüchtung

Nach der Einführung der Gentechnik in die Landwirtschaft kam es im Agrarsektor insbesondere bei großen Konzernen zu Veränderungen der Marktstrategien und Unternehmensstrukturen, was insbesondere zu einer Konzentration im Saatgutbereich führte. Aber auch für Landwirte und VerbraucherInnen hat der Anbau transgener Pflanzen zum Teil unerwünschte Folgen.

11 <https://www.ers.usda.gov/webdocs/DataFiles/47913/SoybeansCostReturn.xlsx?v=9414.4>

12 <https://www.ers.usda.gov/webdocs/DataFiles/47913/CornCostReturn.xlsx?v=9414.4>

2.2.1 Unternehmenskonzentration

Mögliche Märkte und Absatzwege für Gentechnik-Produkte wurden schon sehr früh systematisch analysiert, um die Gewinnstrategien der Konzerne abzusichern. 1992 veröffentlichte die OECD eine Umfrage bei den Firmen, die im Bereich Agrogentechnik tätig waren (OECD, 1992). Das Ergebnis:

„Von den Unternehmen, die auf dem Gebiet der Biotechnologie der Pflanzen tätig sind, wurden drei verschiedene Strategien genannt: die erste besteht darin, als Lieferant spezieller Technologien (Genpakete) aufzutreten; die zweite basiert darauf, mit Hilfe der Biotechnologie Kontrolle über strategische Saatgutmärkte zu gewinnen; die dritte Strategie besteht darin, auf den nachgelagerten Märkten Fuß zu fassen, um so die industrielle Wertschöpfung für sich zu nutzen, die über die Einnahmen aus dem Verkauf von Saatgut allein nicht hereingeht.“

Im Rückblick zeigt sich, dass diese Strategie der Konzerne weit erfolgreicher war als ihre Ankündigungen in Bezug auf Produkte, die einen echten Nutzen für die VerbraucherInnen bringen sollten. Die Agrochemiekonzerne begannen parallel zur Entwicklung der ersten gentechnisch veränderten Pflanzen schon in den 1980er und 1990er Jahren systematisch, Unternehmen der Saatgutbranche aufzukaufen und Patente anzumelden (siehe auch Then, 2015).

Insbesondere Patente auf transgene Pflanzen haben im Bereich der Pflanzenzüchtung im Laufe der letzten Jahre zu einer starken Unternehmenskonzentration im Saatgutsektor geführt (Howard, 2009; Howard, 2015; Bonny, 2017; Clapp, 2021). Durch die Patentierung des Saatguts und den Kauf von Züchtungsfirmen erlangten Unternehmen, die eigentlich vorwiegend im Agrochemikaliengeschäft tätig sind, eine dominante Marktposition. Dazu zählen vier Firmen: Bayer (ehem. Monsanto), Corteva (ehem. DowDuPont), SinoChem (ChemChina/Syngenta) und BASF, die zirka 50 Prozent des kommerziell gehandelten Saatgutmarktes – und über 60 Prozent des Agrochemikalienmarktes – kontrollieren (Abb. 7; Clapp, 2021; ETC Group, 2022).

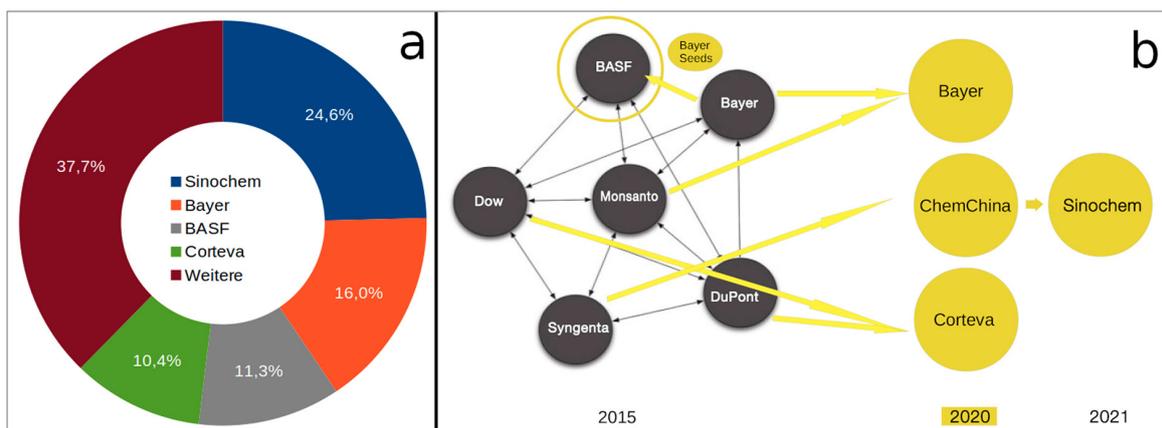


Abbildung 7: (a) Prozentualer Anteil der weltweit führenden Top-4 Unternehmen am globalen Agrochemikaliengeschäft bezogen auf deren Umsatz im Jahr 2020. Sinochem (China): 30,6 Mrd. US-Dollar; Bayer (Deutschland): 9,9 Mrd. US-Dollar; BASF (Deutschland): 7 Mrd. US-Dollar; Corteva (USA): 6,4 Mrd. US-Dollar; Weitere: 23,5 Mrd. US-Dollar (verändert nach ETC Group, 2022). (b) Unternehmenskonzentration im Saatgutmarkt: Zwischen 2015 und 2020 wurde Monsanto von Bayer übernommen (die im Gegenzug ihren Saatgutsektor an BASF verkaufen mussten), ChemChina übernahm Syngenta, Dow und DuPont schlossen sich zusammen und gründeten für deren Saatgutgeschäft Corteva. 2021 erfolgte schließlich die Megafusion der beiden chinesischen Staatsbetriebe Sinochem und ChemChina das aktuell nicht nur das weltweit größte Chemiekonglomerat, sondern auch das führende Unternehmen für industrielle landwirtschaftliche Betriebsmittel darstellt (verändert nach Testbiotech, 2021b)

Durch die Etablierung herbizidtoleranter Gentechnik-Pflanzen haben diese Großunternehmen in den letzten 20 Jahren einen sogenannten ‚technologischen Lock-In‘ geschaffen, der die Abhängigkeit von ihren Pestiziden (die inzwischen z.B. durch das Auslaufen des Patentschutzes von Glyphosat im Jahr 2000 relativ billig sind) absichert und dadurch ihre Marktmacht nicht nur gefestigt, sondern weiter ausgebaut hat. Eines der neuen Geschäftsmodelle dieser Unternehmen beruht inzwischen nicht mehr auf dem Verkauf von effizienten, auf die (Einfach-)Resistenzen der Gentechnik-Pflanzen abgestimmten (teuren) Herbiziden, sondern auf der Vermarktung von transgenen Pflanzen mit Mehrfachresistenzen (‚Stacked Events‘, die v.a. durch den Anstieg von herbizidresistenten Unkräutern nötig wurden) gegen drei oder mehr unterschiedliche Herbizide.¹³

2.2.2 Kontaminationen

Saatgut wird häufig beim Transport, bei der Aufarbeitung oder direkt auf den Feldern mit transgenem Material verunreinigt, was für die Lebensmittelproduktion sehr problematisch ist. Bezüglich der Wahlfreiheit innerhalb der verschiedenen Anbausysteme entstehen dadurch insbesondere für LandwirtInnen in Nord- und Südamerika große Probleme. In Kanada ist es heute z.B. nahezu unmöglich, gentechnikfreien Raps anzubauen, da es regelmäßig zu Kontaminationen der umliegenden Felder durch Pollenflug kommt. Zudem kann Gentechnik-Saatgut in den Böden überdauern und dabei über zehn Jahre lang keimfähig bleiben. Das führt zum unbeabsichtigten Wachstum transgener Pflanzen, die dann erneut Samen bilden, die im Boden überdauern können (siehe u.a. Bauer-Pankus et al., 2013). Auch die über die Jahre kontinuierliche Einkreuzung von transgenen Merkmalen in die neuen, eigentlich konventionell gezüchteten Rapsorten zwingt die Landwirte zum Kauf von Gentechnik-Saatgut um Zugang zu modernen, ertragreichen Sorten zu erhalten, da gleichzeitig die meisten gentechnikfreien Sorten vom Markt genommen wurden (CBAN, 2019).

In Brasilien kam es, offensichtlich in großem Umfang, zu Verunreinigungen von Mais-Saatgut, die auch regionale Landsorten betreffen (Fernandes et al., 2022). Ähnliche Berichte liegen auch aus Südafrika (Iversen et al., 2014) und Mexiko vor (Quist & Chapela, 2001; Dyer et al., 2009; Agapito-Tenfen et al., 2017; Agapito-Tenfen & Wickson, 2018). Diese Kontaminationen sind besonders schwerwiegend, weil sie auch Sorten betreffen, die von den Landwirten selbst vermehrt werden und sich so ungewollt weiter ausbreiten können.

Kontaminationen mit Gentechnik-Reis, -Leinsamen und -Weizen führten in den letzten Jahrzehnten ebenfalls immer wieder zu erheblichen Kosten für SaatgutproduzentInnen und LebensmittelherstellerInnen (Price & Cotter, 2014).

2.2.3 Lebensmittelsicherheit

In der EU gab es bisher nur eine einzige Zulassung für den Anbau einer Gentechnik-Pflanze (Mais MON810), während für den Import inzwischen jedoch schon mehr als 90 verschiedene gentechnisch veränderte Pflanzen (Events), bzw. deren Ernte, zugelassen wurden, die hauptsächlich als Futtermittel verwendet werden. Grundlage für die Zulassungsentscheidung über das Inverkehrbringen von Importen transgener Pflanzen zur Verwendung in Lebens- und Futtermittel ist die EU-Verordnung (EG) 1829/2003 und die Durchführungsverordnung 503/2013. Auf ihrer Grundlage führt die Europäische Lebensmittelbehörde (EFSA) eine Risikobewertung durch. Diese umfasst die potenziellen Auswirkungen von gentechnisch veränderten Organismen auf die Gesundheit von Mensch und Tier sowie auf die Umwelt. Bei der molekularen Charakterisierung und der Vergleichsanalyse der neuen Eigenschaften sollen beabsichtigte und unbeabsichtigte genetische Veränderungen,

13 Gil Gullickson, New tech coming in seed traits, Successful Farming, 30 November 2020: <https://www.agriculture.com/crops/corn/new-tech-coming-in-seed-traits>

die Genexpression (der neu eingefügten Gene) sowie Veränderungen im Phänotyp (wie z.B. die Zusammensetzung der Inhaltsstoffe) im Vergleich zu konventionell gezüchteten Pflanzen bewertet werden. Außerdem werden in diesem Rahmen die Toxizität und Allergenität sowie die potenziellen Auswirkungen auf die Umwelt abgeschätzt. Die Entscheidung über Zulassungen treffen die 27 Mitgliedstaaten und die EU-Kommission. Nach dem Inverkehrbringen ist außerdem eine Umweltüberwachung (Post-Market Environmental Monitoring - PMEM) vorgeschrieben, die ebenfalls von der EFSA bewertet wird. Die derzeitigen PMEM-Standards erlauben es jedoch nicht, ausreichend zuverlässige Informationen über die Auswirkungen von gentechnisch veränderten Lebens- oder Futtermitteln zu sammeln, weshalb es sich bisher zum großen Teil um einen Vorgang ohne substanziellen wissenschaftlichen Inhalt handelt (Testbiotech, 2021a).

Die bisherige Zulassungspraxis reicht nicht aus, um der tatsächlichen Komplexität der Risiken gerecht zu werden. Gründe sind u.a. die Zunahme von herbizidresistenten Unkräutern und die Anpassung von Schädlingen (siehe 2.1.2 und 2.1.3), durch die es in verschiedenen Anbaugebieten zu einem regelrechten Wettrennen auf dem Acker kommt: In einzelnen Sorten der oben genannten ‚Stacked Events‘ (Mais, Soja, Baumwolle) sind aktuell bis zu sechs Insektengifte mit mehreren Resistenzen gegen Herbizide kombiniert (siehe PlantGeneRisk Datenbank¹⁴ und Abb. 6). Die durch (Mehrfach-)Kreuzungen transgener Pflanzen erzielten ‚Stacked Events‘ machen inzwischen die deutliche Mehrheit der Zulassungen aus (auch in der EU: 26 ‚Single Events‘ vs. 70 ‚Stacked Events‘, siehe Abb. 8).

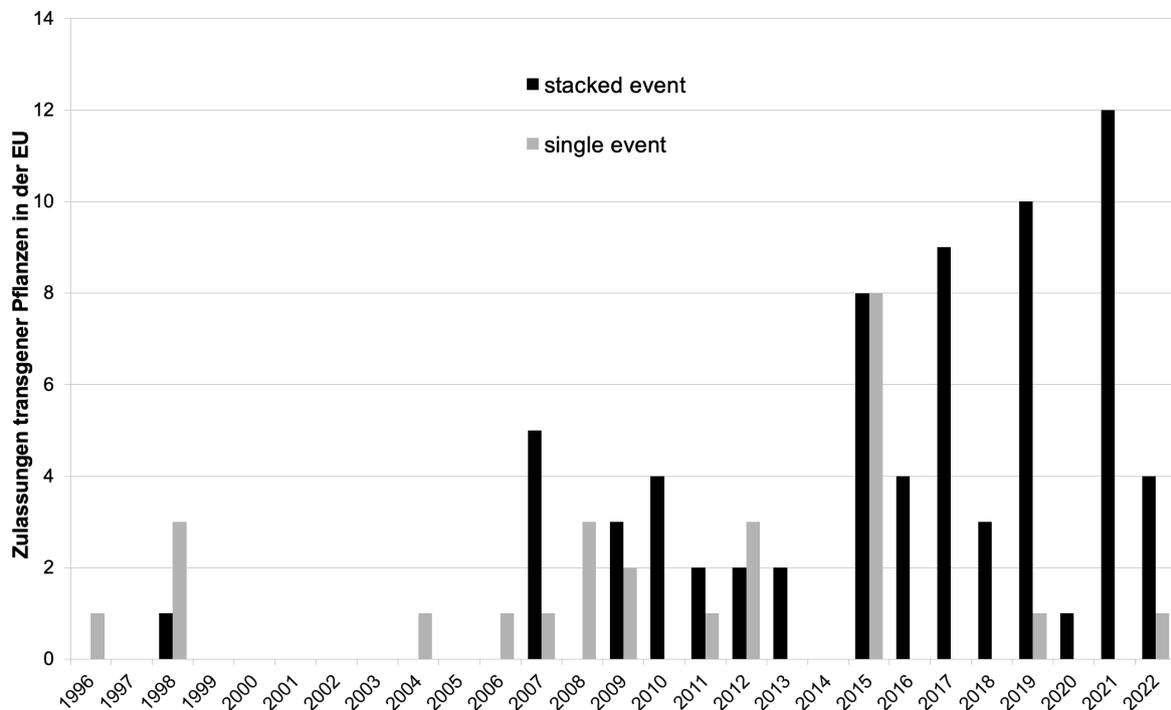


Abbildung 8: In der EU (nahezu ausschließlich für den Import) zugelassene Gentechnik-Pflanzen, die nur ein Transgen („single event“) oder mehreren Transgene („stacked event“) enthalten.¹⁵

¹⁴ <https://www.testbiotech.org/gendatenbank>

¹⁵ <https://www.testbiotech.org/gendatenbank>

Da die Gesamtmenge der in den ‚Stacked Events‘ produzierten Insektizide diejenige der Pflanzen mit einzelnen Insektengiften weit übersteigen kann, steigt auch die Belastung der Umwelt und der Ernte mit diesen Giften. Gleichzeitig wird die Liste der Herbizide, gegen die die Pflanzen resistent gemacht werden, immer länger, wodurch die Ernte regelmäßig mit einem Cocktail aus Rückständen der komplementären Herbizide belastet ist. Das stellt auch die Risikoabschätzung vor neue Herausforderungen, da Wechselwirkungen wesentlich schwerer abzuschätzen sind als die Risiken einzelner Wirkstoffe (Übersicht und weitere Quellen: Testbiotech, 2021a). Die kombinatorische Wirkung der einzelnen Insektizide und Herbizide kann unter Umständen synergistisch sein, wodurch in der Folge die möglichen gesundheitlichen Effekte die Summe der einzelnen Stoffe übersteigen können. Ähnliche Fragen tauchen auf, wenn die Ernte verschiedener Pflanzen in Lebens- oder Futtermitteln gemischt werden. Die Effekte können auch indirekt ausgelöst werden, wenn sich beispielsweise durch den Verzehr der Produkte die Zusammensetzung der Mikroorganismen im Darm (Mikrobiom) verändert, was insbesondere für das Herbizid Glyphosat in mehreren Publikationen beschrieben wurde (Übersicht und weitere Quellen: Testbiotech, 2021a). Unter anderem könnten dadurch chronische entzündliche Prozesse z.B. im Magen-Darm-Trakt befördert werden (zu den möglichen Mechanismen siehe Übersicht bei Parenti et al., 2019). Derartige Effekte werden in der Risikoprüfung bislang kaum berücksichtigt.

Diese Probleme betreffen alle Bt-Pflanzen, die derzeit angebaut oder importiert werden, ebenso wie Mischungen dieser Pflanzen in Lebens- und Futtermitteln. Aber weder die EFSA noch die Industrie haben diese bisher genauer untersucht. So verlangt die EU keine empirischen Untersuchungen zur Gesamtoxizität von ‚Stacked Events‘ in denen sich regelmäßig die Rückstände der komplementären Herbizide (gegen die die transgenen Pflanzen resistent gemacht sind) mit den von den Pflanzen produzierten Insektengiften mischen (Übersicht und weitere Quellen: Testbiotech, 2021a). Auch moderne Methoden, mit denen die Veränderungen im Stoffwechsel und der Genexpression der Pflanzen genauer untersucht werden könnten, finden bisher keine Anwendung. Beispielsweise könnten mit diesen Methoden (sogenannte ‚Omics‘) Veränderungen auf Ebene der Gene (z.B. durch die Überprüfung des gesamten Genoms mittels ‚Whole Genome Sequencing‘), der Zellen (Gesamtheit der gebildeten RNA bzw. Proteine) oder der Organismen (Charakterisierung aller Stoffwechsel-Eigenschaften) untersucht werden. Erst ab dem Jahr 2030 will die EFSA Daten zu ‚Omics‘ in ihren Prüfverfahren verlangen.¹⁶

Durch die lückenhafte Prüfung der Risiken sind in den letzten Jahren die Unsicherheiten im Hinblick auf die Sicherheit der importierten Pflanzen angestiegen, weil mit der steigenden Anzahl von Zulassungen auch immer neue Mischungen von Herbizidrückständen und insektengiftigen Proteinen importiert werden.

Im Ergebnis werden die Importe gentechnisch veränderter Pflanzen in die EU im Hinblick auf die systemischen, kombinatorischen und chronischen Auswirkungen des Verzehrs von Lebens- und Futtermitteln nur unzureichend untersucht. Die Zulassungsprüfung und Risikobewertung der Gentechnikimporte in der EU erfassen weder die spezifischen Rückstände der komplementären Herbizide noch deren Mischungen oder mögliche Wechselwirkungen mit den Insektengiften (Durchführungsverordnung (EU) der Kommission Nr. 503/2013; Testbiotech, 2021a). Ein Grund: Die Risikobewertung von Herbiziden und Gentechnik-Pflanzen erfolgt in der EU voneinander getrennt. Zudem ist die bisherige Methodik, um kombinierte, akkumulierte und chronische gesundheitliche Auswirkungen verlässlich bewerten zu können, nicht ausreichend. In der Folge können Risiken in der Nahrungskette unbemerkt akkumulieren.

¹⁶ <https://www.efsa.europa.eu/en/supporting/pub/e200506>

2.3 Auswirkungen transgener Pflanzen auf die Ökosysteme

Bei der Bewertung der Auswirkungen auf die Umwelt und die biologische Vielfalt fehlt in vielen Fällen ein systematisches Vorgehen. Dies betrifft auch den Import von transgenen Pflanzen in die EU: Hier werden Umweltauswirkungen des Anbaus in den Herkunftsländern oft ausgeblendet (wie z.B. Kombinationseffekte der verschiedenen Herbizide und Insektengifte, der Einsatz von in der EU inzwischen verbotenen Wirkstoffen und nicht zuletzt der Verlust von Regenwald). In der Folge zeigt sich auch hier der Bedarf für eine umfassende und unabhängige Technikfolgenabschätzung, die über die Risikobewertung einzelner Gentechnik-Events hinausgeht. Ein Teil dieser Umweltauswirkungen geht zwar mit dem Anbau transgener Pflanzen einher, ist aber nicht unbedingt durch den Einsatz gentechnischer Verfahren bedingt. Zudem werden aber auch Schäden und/oder Wechselwirkungen in den Ökosystemen und der biologischen Vielfalt beobachtet, die durch die gentechnischen Veränderungen bedingt sind, wie die nachfolgenden Beispiele zeigen.

2.3.1 Schäden in Zentren der biologischen Vielfalt

In Mexiko breiten sich gentechnisch veränderte Baumwoll-Pflanzen unkontrolliert in einem der Zentren der biologischen Vielfalt für Baumwolle aus. Dabei wurden Transgene von herbizidresistenter und insektengiftiger Gentechnik-Baumwolle in natürliche Baumwollpopulationen (*Gossypium hirsutum*) übertragen (Wegier et al., 2011). Nach Befall mit Schadinsekten wurde beobachtet, dass sich sowohl die transgenen Baumwollpflanzen als auch deren Nachkommen hinsichtlich der Produktion von Pflanzennektar von den wilden Baumwollpflanzen unterscheiden. Infolgedessen unterscheiden sie sich auch in der Anzahl und der Zusammensetzung der assoziierten Ameisenpopulationen, die durch den Nektar angelockt werden (Vázquez-Barrios et al., 2021). Generell waren in den natürlichen Baumwollpflanzen mehr Ameisen vorhanden. Spezielle Ameisenarten, die nützlich für die Abwehr von Schadinsekten sind, waren bei Baumwolle mit eingekreuzter Herbizidresistenz seltener zu finden, während sie bei Bt-Baumwolle häufiger auftraten. Da Ameisen für die Kontrolle der Schädlinge und auch für die Verbreitung der Baumwollsamens wichtig sind, können diese gestörten Interaktionen zwischen den transgenen Pflanzen und ihrer Umwelt erhebliche Langzeitfolgen haben. Eine höhere Nektarproduktion kann u.a. dazu führen, dass die Nachkommen der Bt-Baumwolle invasive Eigenschaften erlangen. Tatsächlich breiten sich die transgenen Baumwollpflanzen in den wilden Populationen schneller aus, als ursprünglich erwartet wurde (Wegier et al., 2011; Vázquez-Barrios et al., 2021). Diese Ergebnisse, die durch weitere Forschung noch genauer untersucht werden sollten, zeigen, wie unbeabsichtigte genetische und stoffwechselspezifische Interaktionen, die durch die gentechnische Veränderung bedingt sind, die Ausbreitung transgener Pflanzen fördern können. In diesem Fall ist der Schaden erheblich, weil dadurch eines der Zentren der biologischen Vielfalt von wilder Baumwolle bedroht ist.

2.3.2 Beschleunigte Verbreitung von Schädlingen

Der Anbau von Bt-Baumwolle führte auch in China zu veränderten Wechselwirkungen mit der Umwelt. Es wurde beobachtet, dass sich mit bestimmten Viren infizierte Nachfalterraupen (s) verstärkt in den Feldern mit transgener Baumwolle ausbreiten (Xiao et al., 2021). Die infizierten Raupen werden schneller gegen das Insektengift resistent und haben daher in den Gentechnik-Feldern einen Selektionsvorteil gegenüber ihren gesunden Artgenossen – wohingegen die mit den Viren infizierten Raupen auf konventionellen Baumwollfeldern kaum beobachtet werden.

In Brasilien breitet sich die Weiße Fliege (*Bemisia tabaci*) auf Feldern aus, auf denen Bt-Soja angebaut wird (Almeida et al., 2021). Die Schildläuse scheinen von bestimmten biologischen Eigenschaften der transgenen

Sojapflanzen zu profitieren, und zwar insbesondere dann, wenn die Gentechnik-Soja zusätzlich auch Transgene gegen Herbizide enthält. Schildläuse, die sich von herbizidresistenten Bt-Sojapflanzen ernähren, sind fruchtbarer und die Zahl ihrer Nachkommen ist deutlich erhöht. Durch den Befall mit der Weißen Fliege wird zudem die Verbreitung von Pflanzenkrankheiten begünstigt, da es einerseits beim Saugen des Pflanzensafts zur Übertragung von Viren kommt, andererseits deren Ausscheidungen die Wahrscheinlichkeit eines Pilzbefalls erhöhen. Ursachen für die Verbreitung könnten für die Weiße Fliege nicht giftige Insektizide sein, die möglicherweise eine stimulierende Wirkung auf die Pflanzenläuse haben. Es werden aber auch unerwartete Wechselwirkungen im Genom der Sojapflanzen in Betracht gezogen, die auf die gentechnischen Veränderungen zurückzuführen sind. In einem früheren Fall hatten MitarbeiterInnen von Monsanto vor derartigen Effekten bei transgenen Sojapflanzen mit beiden Eigenschaften gewarnt, da auf diesen Feldern eine starke Verbreitung eines Schädling (Raupen des Nachtfalters *Spodoptera eridania*) zu beobachten war (Bortolotto et al., 2014).

Ebenfalls in Brasilien breiten sich infolge des Anbaus transgener Soja Unkräuter in den Feldern aus, die gegen mehrere Herbizide resistent sind. Darunter finden sich auch mehrere Arten von Fuchsschwanzgewächsen. Diese Pflanzenarten dienen u.a. bestimmten Falterraupen (*Spodoptera cosmioides*) als Nahrungsgrundlage. Ernähren sich die Raupen sowohl von einer bestimmten Art der herbizidresistenten Unkräuter (*Amaranthus palmeri*) als auch von insektengiftigen Bt-Sojapflanzen, haben sie der Studie zufolge eine höhere Anzahl von Nachkommen und dadurch eine höhere Gesamtfitness (Páez Jerez et al., 2022). Diese Schädlinge profitieren also von der Kombination der beiden Eigenschaften der transgenen Pflanzen: Der verstärkten Ausbreitung von bestimmten herbizidresistenten Unkrautarten und den unbeabsichtigten Effekten der gentechnischen Veränderungen von Bt-Sojapflanzen, und können sich somit schneller in diesen Feldern verbreiten.

2.3.3 Unkontrollierte Ausbreitung

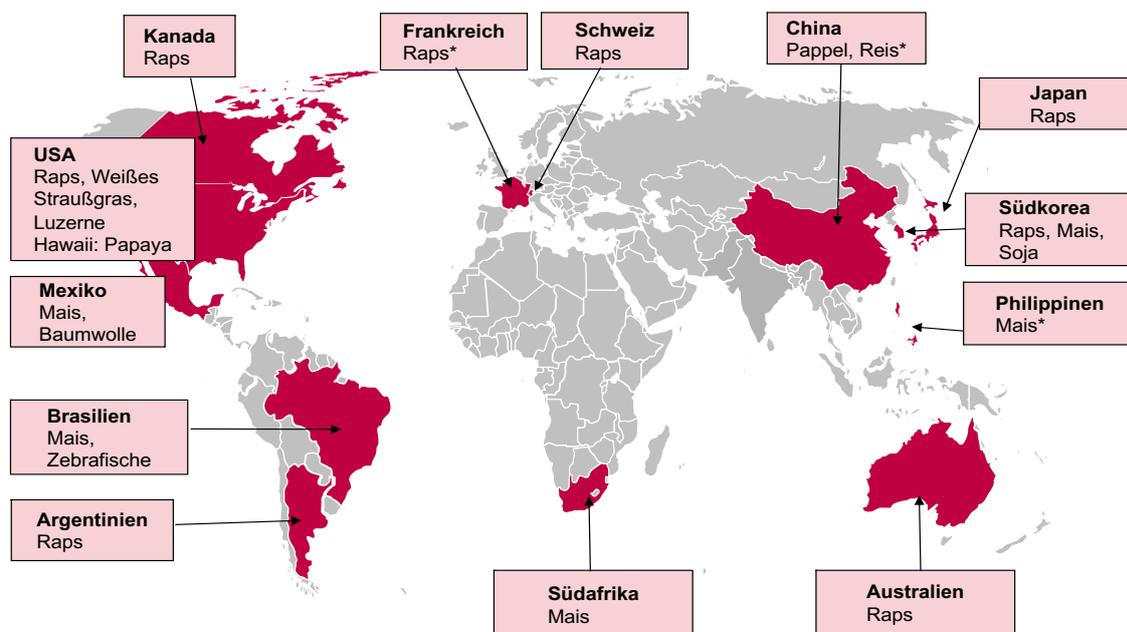
Neben dem fortschreitenden Aufkommen von weltweit inzwischen mehreren Dutzend Unkräutern, die insbesondere gegenüber Glyphosat resistent geworden sind, können auch die gentechnisch veränderten Pflanzen selbst zum ‚Unkraut‘ werden (Abb. 9). Gentechnik-Pflanzen, die gegen Herbizide resistent sind und sich ausbreiten, können sich außerdem auch untereinander kreuzen und so gegen mehrere Herbizide gleichzeitig resistent werden. In wilden Baumwollpopulationen in Mexiko wurden beispielsweise Gen-Konstrukte von bis zu vier Transgenen gefunden, die in dieser Kombination weltweit in keiner kommerziell angebauten gv-Baumwollsorte vorhanden sind (Wegier et al., 2011). Solche Mehrfachresistenzen sind vermutlich durch Hybridisierung mehrerer ‚Single Events‘ entstanden und haben sich weiter in wilde Baumwollpopulationen ausgebreitet. Weitere solche Ereignisse sind neben gv-Baumwolle (Vázquez-Barrios et al., 2021) u.a. auch bei gv-Raps in Japan (Aono et al., 2006) oder den USA (Schafer et al., 2011) bekannt.

Überraschenderweise können glyphosatresistente Gentechnik-Pflanzen auch unabhängig vom Herbizideinsatz eine höhere Fitness und in der Folge eine stärkere Ausbreitungstendenz zeigen (Bauer-Panskus et al., 2020). Die erhöhte Fitness wird vermutlich indirekt durch das transgene Enzym EPSPS verursacht, da es die Pflanzen nicht nur resistent gegenüber Glyphosat macht, sondern auch in verschiedene Stoffwechselwege eingreift, indem es u.a. die Produktion des Pflanzenhormons Auxin erhöht. Da Auxin eine Schlüsselrolle beim Wachstum, der Fortpflanzungsfähigkeit und der Anpassung an Hitze- und Trockenstress spielt, können die gv-Pflanzen einen stärkeren Wuchs oder eine erhöhte Samenproduktion, und dadurch einen Selektionsvorteil, aufweisen (Wang et al., 2014; Yang et al., 2017; Beres et al., 2018; Fang et al., 2018). Diese unerwarteten Eigenschaften transgener Pflanzen, die erheblich zur ihrer unkontrollierten Ausbreitung beitragen können (s.u.), wurden jahrzehntelang übersehen. Neben Raps, Baumwolle und Mais kam es auch bei transgenen glyphosatresistenten

Gräsern zu einer raschen und unkontrollierten Ausbreitung in den USA (Zapiola et al., 2007). In welchem Ausmaß dabei die erhöhte Fitness der transgenen Pflanzen aufgrund ihrer zusätzlichen EPSPS-Enzyme eine Rolle spielt, wurde bisher nicht untersucht.

Insbesondere wurde am Beispiel von transgenem Raps deutlich, dass diese gv-Pflanzen tatsächlich in mehreren Regionen sich selbst erhaltende Populationen bilden, die in der Umwelt überdauern und sich ausbreiten können. Dies betrifft auch Länder, die diese (ggf. auch ungewollt) nur importieren bzw. früher importiert haben (Sohn et al., 2021).

In Kanada kam es beispielsweise auch in Regionen, in denen keine transgenen Pflanzen angebaut werden, zur Hybridisierung zwischen glyphosatresistentem Raps und der nah verwandten Wildart *Brassica rapa* (Rübsen), die in vielen Regionen als Ackerunkraut vorkommt (Laforest et al., 2022). Derartige transgene Hybridpflanzen waren zwar schon aus anderen Ländern entlang von Transportrouten bekannt, lange Zeit wurde allerdings angenommen, dass diese sich aufgrund einer verringerten Fruchtbarkeit nicht dauerhaft durchsetzen können. Diese These wurde durch die Entdeckung der transgenen Rübsen in Kanada jedoch widerlegt. Die Glyphosatresistenz ist in diesen Wildpflanzen – vermutlich durch mehrfache Rückkreuzung der Hybriden – inzwischen reinerbig nachweisbar, was nur möglich ist, wenn die Pflanzen über längere Zeiträume in der Umwelt persistieren. In diesen Gebieten konnten zudem weitere Auskreuzungen der transgenen Glyphosatresistenz in Ackerrettich (*Raphanus raphanistrum*), einem ebenfalls wilden Verwandten des Rapses, nachgewiesen werden. Die Persistenz und Ausbreitung dieser Pflanzen kann durch die Anwendung von Glyphosat begünstigt werden, scheint davon aber nicht abhängig zu sein.



Januar 2023

* keine wissenschaftliche Veröffentlichung verfügbar

Abbildung 9: Ausbreitung von zugelassenen Gentechnik-Organismen: Dokumentierte Fälle von verwilderten Populationen und Auskreuzungen in Kultur- oder Wildarten. Es wurden auch einige Fälle in Ländern dokumentiert, in denen gar keine gv-Pflanzen angebaut werden (aktualisiert nach Testbiotech, 2015).

Die unbeabsichtigten und unerwarteten Langzeitfolgen, die sich aus spontaner Verbreitung und Genübertragung von in der Umwelt überdauernden und vermehrungsfähigen Gentechnik-Pflanzen ergeben, werden bei der aktuellen Risikobewertung nicht ausreichend berücksichtigt (Bauer-Panskus et al., 2020). Das besondere Problem dabei ist: Die Nachkommen der transgenen Pflanzen können neue, unerwartete Eigenschaften aufweisen, sogenannte ‚next generation effects‘. Dazu zählen auch Hybridisierungseffekte, die bei Kreuzungen von Gentechnik-Pflanzen mit wilden Populationen beobachtet werden und u.a. zu einer vermehrten Samenbildung beitragen. Vor diesem Hintergrund fordern einige ExpertInnen sogenannte ‚cut-off‘-Kriterien, die zu einem Abbruch der Zulassungsprüfung führen, wenn zu viele Unsicherheiten keine schlüssige Risikobewertung zulassen (Bauer-Panskus et al., 2020; Then et al., 2020).

2.4 Vorteile für VerbraucherInnen?

Die bereits erwähnte OECD-Studie (1992) weist auch darauf hin, dass die Marktstrategie zur Einführung transgener Pflanzen nur dann funktioniere, wenn die Produkte für VerbraucherInnen einen entsprechenden Mehrwert haben. Pflanzen, deren Anbau mit Herbiziden oder Insektiziden verbunden sei, hätten ein zu negatives Image. Um den Markt zu öffnen, müsse der Nutzen für die VerbraucherInnen gezeigt werden, um ein positives Image zu schaffen. Dabei sollten u.a. „Produktverbesserungen“ wie „höherer Nährwert, bessere Qualität und Lagerfähigkeit“ betont werden.

Diese strategischen Bemühungen erlitten allerdings schon sehr früh einen ernsthaften Dämpfer: Die 1994 in den USA eingeführte „Anti-Matsch-Tomate“ war ein Flop. Die Tomate, die länger frisch bleiben sollte, ließ sich nur mit erhöhtem Aufwand ernten und fand bei den VerbraucherInnen in den USA wenig Zustimmung. Schon 1997 war die Tomate wieder vom Markt verschwunden. Seitdem wurde immer wieder angekündigt, dass Produkte von gentechnisch veränderten Pflanzen mit speziellem Nutzen für VerbraucherInnen hergestellt werden sollten. Bisher sind aber nur wenig Produkte auf den Markt gekommen, die eine tatsächliche Bedeutung in dieser Hinsicht hätten (siehe auch Then, 2015).

Das bekannteste Beispiel für transgene Pflanzen, deren Verzehr mit gesundheitlichen Vorteilen verbunden sein soll, ist der sogenannte ‚Golden Rice‘. Golden Rice soll einen erhöhten Gehalt einer Vorstufe von Vitamin A, sogenanntes β -Carotin, in den Reiskörnern bilden und so zur Bekämpfung von Vitamin-A-Mangelerscheinungen eingesetzt werden, die in vielen Entwicklungsländern ein ernsthaftes Problem darstellen. Doch wesentliche Daten zur Nahrungsmittelqualität und Nahrungsmittelsicherheit fehlen nach wie vor, obwohl der Gentechnik-Reis schon seit mehr als 20 Jahren in der Entwicklung ist. Der Reis wurde 2022 zum ersten Mal auf den Philippinen geerntet. Mit dieser Ernte sollen jetzt weitere Untersuchungen bezüglich seines tatsächlichen Nutzens durchgeführt werden.¹⁷ Tatsächlich gibt es hier viele Fragezeichen: Die vorliegenden Daten aus Zulassungsanträgen zeigen niedrige Gehalte an β -Carotin (Testbiotech, 2018), zudem sind hohe Verluste durch Lagerung und Kochen zu erwarten (Bollinedi et al., 2019). Veröffentlichung bestätigen zudem sehr unterschiedliche Carotingehalte, die u.a. von den jeweiligen Sorten (bzw. deren genetischem Hintergrund) abhängen (Mallikarjuna-Swami et al., 2021). Ob diese Pflanzen tatsächlich einen wesentlichen Nutzen für die VerbraucherInnen haben können, scheint vor diesem Hintergrund fraglich.

Eine Kontamination anderer Felder mit dem Gentechnik-Reis wäre auf den Philippinen ein ganz besonderes Problem, da hier eines der wichtigsten Zentren der biologischen Reis-Vielfalt liegt. Unter diesen Bedingungen bedeutet der Anbau eine erhebliche Gefahr für den Erhalt der Biodiversität und der regionalen Sorten.

¹⁷ <https://ethz.ch/en/news-and-events/eth-news/news/2022/11/the-seeds-have-germinated.html>

Die Gentechnik-Pflanzen könnten ihre Gene u.a. an wilden Reis weitergeben. Über den Wildreis, der entlang der Felder weit verbreitet ist, können die Transgene dann auch zurück auf die Felder und in den gentechnik-freien Reis gelangen. Große Probleme mit Kontamination durch Gentechnik-Reis gab es in der Vergangenheit bereits in den USA und China, obwohl dieser dort nur in Feldversuchen getestet, aber nicht auf großen Flächen angebaut wurde (Price & Cotter, 2014).

2.5 Zusammenfassung der bisherigen Erfahrungen mit transgenen Pflanzen

Zusammengefasst zeigt sich, dass die versprochenen Vorteile und hohen Erwartungen, die der Einsatz von transgenen Pflanzen geweckt hat, bisher oft nicht oder nur teilweise bzw. vorübergehend eingetreten sind oder erfüllt wurden. Diese Erwartungen wurden vor der Einführung gentechnisch veränderter Pflanzen immer wieder behauptet und dienten als Rechtfertigung für deren Einführung. Doch nach ihrer Zulassung gab es oft keine ausreichenden systematischen Untersuchungen, um diese Versprechungen objektiv zu bewerten.

Zudem werden kombinatorische Wirkungen, kumulative Effekte und Wechselwirkungen der Gentechnik-Pflanzen mit ihrer Umwelt, oder auch zwischen den Gentechnik-Pflanzen (und ihren Mischungen in Lebens- und Futtermitteln) nicht ausreichend geprüft. Infolgedessen haben die Unsicherheiten, sowohl bezüglich der Gesundheitsrisiken von Futterpflanzen für Nutztiere und Nahrungsmitteln für Menschen als auch hinsichtlich der Stabilität der Ökosysteme, durch die Einführung von gentechnisch veränderten Pflanzen insgesamt zugenommen.

Die Nachhaltigkeit des Anbaus dieser Pflanzen muss bezweifelt werden: Herausforderungen wie der Klimawandel können beispielsweise am ehesten durch Vielfalt auf dem Acker aufgefangen werden (FAO, 2017), wohingegen eine zu einseitige Fokussierung auf bestimmte Pflanzenmerkmale die Gefahr einer Destabilisierung birgt. Es hat sich tatsächlich gezeigt, dass der Anbau transgener Pflanzen mit überwiegend nur zwei Eigenschaften in vielen Anbauregionen eher zu einer Destabilisierung der Agro-Ökosysteme geführt hat. Der Einsatz von Spritzmitteln konnte in einigen Anbauregionen zwar kurzfristig verringert werden, stieg dann aber oft – ähnlich einem Jo-Jo-Effekt – wieder erheblich an. So kam und kommt es zum beschriebenen ‚Wettrüsten‘ auf dem Acker, die Pflanzen werden gegen immer mehr Herbizide resistent gemacht und produzieren gleichzeitig immer mehr Insektengifte.

Die negativen Auswirkungen zeigen sich nicht nur in einer zunehmenden Belastung der Umwelt mit bestimmten Giftstoffen, sondern u.a. auch in der unkontrollierten Ausbreitung von gv-Pflanzen in Zentren der biologischen Vielfalt, wodurch deren Erhalt gefährdet wird. Zudem gibt es negative Auswirkungen, die durch gentechnische Veränderungen bedingt sind und dazu führen können, dass gentechnisch veränderte Nutzpflanzen beispielsweise noch anfälliger für Fraßinsekten werden. Diese Entwicklungen können zu erheblichen Schäden in der Landwirtschaft führen, wobei deren genaue Ursachen längst nicht ausreichend verstanden werden.

Ein Treiber beim Anbau transgener Pflanzen sind Patente auf Saatgut. Die Konzerne entscheiden durch ihre Marktmacht in vielen Regionen der Welt bereits jetzt darüber, was angebaut und geerntet wird. Dabei werben sie oft für Scheinlösungen, also für Produkte, die vor allem aus Sicht der Konzerne und ggf. deren Profite besonders geeignet sind, die aber die tatsächlichen Probleme in der Landwirtschaft kaum lösen können.

Damit sich diese negativen Ereignisse mit der Einführung von Pflanzen aus Neuer Gentechnik nicht wiederholen, sollten die Verfahren für deren mögliche Zulassung ergänzt werden. Dazu gehört u.a. die Einführung einer vorausschauenden Technikfolgenabschätzung. Diese könnte im Hinblick auf die mögliche Einführung der Neuen Gentechnik in der Landwirtschaft ein entscheidendes Instrument für die EntscheidungsträgerInnen werden, um deren tatsächliche Nachhaltigkeit zu prüfen und die Art und die Anzahl der freigesetzten Gentechnik-Organismen wirksam zu kontrollieren bzw. zu begrenzen.

3. Die Rolle der Technikfolgenabschätzung

Mit der Einführung transgener Pflanzen wurden große Erwartungen hinsichtlich möglicher Vorteile für die Pflanzenzucht, die Umwelt und die Ernährungssicherheit geweckt (siehe Kapitel 2). Da sich diese Erwartungen in der Folge jedoch nicht bzw. nur teilweise erfüllt haben und zumindest in vielen Bereichen strittig sind, sollte auch im Hinblick auf zukünftige Anwendungen der Gentechnik eine umfassende Technikfolgenabschätzung eingeführt werden. Diese sollte es ermöglichen die bisherigen Folgen korrekt einschätzen zu können und ggf. weitere Entwicklungen zu steuern. Damit könnte das Problem überwunden werden, dass bei der Bewertung der Erfahrungen mit transgenen Pflanzen bisher häufig nur auf Daten der Industrie zurückgegriffen werden kann oder auf Auswertungen, die in ihrer Gesamtperspektive oft fraglich erscheinen. In Zukunft sollten Daten möglichst unabhängig und nach transparenten und verlässlichen Kriterien erhoben werden.

3.1 Probleme bei der Bewertung der Vor- und Nachteile transgener Pflanzen

Die bisherigen Probleme mit der Bewertung der Vor- und Nachteile transgener Pflanzen können an einer häufig zitierten ‚Metastudie‘ von Klümper und Qaim (2014) veranschaulicht werden. Diese zeigt nach einer Auswertung von fast 150 wissenschaftlichen Studien angeblich, dass durch den Anbau von Gentechnik-Pflanzen der Einsatz von Pestiziden weltweit um 37 Prozent reduziert wurde, die Erntemenge um 22 Prozent gesteigert und die Gewinne der LandwirtInnen um 68 Prozent gesteigert wurde. Nach Klümper & Qaim (2014) sind diese Effekte in allen Anbauländern, besonders aber in den Entwicklungsländern zu beobachten.

Die Studie ist methodisch jedoch unbefriedigend. Da der Anbau von insektengiftigen oder herbizidresistenten Pflanzen nicht per se zu höheren Erträgen führt (siehe 2.1), müsste jeweils genau untersucht werden, ob und unter welchen Bedingungen diese höheren Ernteerträge tatsächlich aufgetreten sind. Um nicht Äpfel mit Birnen zu vergleichen, müsste streng darauf geachtet werden, dass die Bedingungen, unter denen die jeweiligen Studien durchgeführt wurden, vergleichbar sind. Zu berücksichtigende Faktoren sind hierbei unter anderem:

- › Wie lange werden die Pflanzen bereits angebaut? Bei manchen Gentechnik-Pflanzen sind die Ergebnisse des Anbaus in den ersten Jahren oft besser, weil sich noch keine Resistenzen bei Unkräutern oder Schädlingen entwickelt haben.
- › Welches Saatgut wurde verwendet? Möglicherweise zeigt sich auf den Feldern ein Zuchtfortschritt, der nicht direkt mit Gentechnik zu tun hat.
- › Welche Management-Systeme standen zur Verfügung? Eventuell wurden die Gentechnik-LandwirtInnen intensiver beraten, haben mehr gedüngt und/oder stärker bewässert.
- › Auf welchen Märkten wurden ggf. höhere Verkaufserträge erzielt? Möglicherweise stieg die Gesamtnachfrage nach bestimmten Produkten und damit auch die erzielten Erlöse.

Werden diese Bedingungen, unter denen höhere Erträge und/oder Einsparungen bei den Betriebsmitteln erzielt werden, nicht genau erfasst, sind die Aussagen derartiger Metastudien wenig belastbar. Je größer die Anzahl der einbezogenen Studien ist, die in Bezug auf Methodik und Ausgangsbedingungen wesentliche Unterschiede aufzeigen, desto fragwürdiger ist das Ergebnis. In der Studie von Klümper & Qaim wird aber der Anspruch erhoben, dass alle ‚geeigneten‘ Studien einbezogen wurden, die sich weltweit mit dem Anbau von Gentechnik-Pflanzen befassen:

„Es wurden Studien berücksichtigt, die auf Primärdaten aus Erhebungen in landwirtschaftlichen Betrieben oder Feldversuchen in der ganzen Welt beruhen und über die Auswirkungen von gentechnisch veränderten Sojabohnen, Mais oder Baumwolle auf die Ernteerträge, den Pestizideinsatz und/oder die Gewinne der Landwirte berichten.“
(Klümper & Qaim, 2014).

Die Autoren nennen als Auswahlkriterium der ‚geeigneten‘ Studien insbesondere Anforderungen an deren statistische Methodik, was grundsätzlich ein richtiger Ansatz ist. Jedoch ist es lediglich ein notwendiges, aber kein hinreichendes Kriterium, da es die genannten Faktoren, die ausschlaggebend dafür sind, ob die jeweiligen Studien überhaupt miteinander vergleichbar sind, nicht berücksichtigt. Generelle Schlussfolgerungen auf Grundlage von potentiell nicht vergleichbaren Daten sind daher unpräzise und infolgedessen zumindest fragwürdig. Insofern sind Studien wie die von Klümper & Qaim (2014) oft ebenso wenig belastbar wie Berichte, die vorwiegend auf den Daten der Industrie beruhen und zum Teil sogar von dieser finanziert wurden, wie Publikationen von PG Economics¹⁸ oder dem International Service for the Acquisition of Agri-biotech Applications (ISAAA).¹⁹ Aber auch von der Industrie unabhängige Studien können im Hinblick auf Methodik und Datenverfügbarkeit nicht immer überzeugen. Insgesamt ist es nicht von der Hand zu weisen, dass ausreichend definierte Kriterien und Methoden zur Bewertung der systemischen Auswirkungen transgener Pflanzen bisher weitgehend fehlen. Dies verdeutlicht die Notwendigkeit der Entwicklung entsprechender Instrumente für eine zusätzliche und umfassende Technikfolgenabschätzung, auch im Hinblick auf den möglichen Einsatz der ‚Neuen Gentechnik‘ (siehe unten).

3.2 Merkmale der Technikfolgenabschätzung

Um die systemischen Auswirkungen des Einsatzes der Gentechnik in der Landwirtschaft und anderen Freisetzungen von gentechnisch veränderten Organismen schon in einem möglichst frühen Entwicklungsstadium erkennen zu können, kann die vorausschauende Technikfolgenabschätzung ein wichtiges Hilfsmittel sein. Wichtige Merkmale der TA werden z.B. im „Technology Assessment Design Handbook“ des U.S. Government Accountability Office (GAO) wie folgt zusammengefasst (GAO, 2021):

„Neue Technologien können eine Reihe von sowohl positiven als auch disruptiven Auswirkungen haben, die mit Hilfe der TA untersucht werden können. Das GAO hat TA allgemein definiert als die gründliche und ausgewogene Analyse der relevanten primären, sekundären, indirekten und verzögerten Wechselwirkungen einer technologischen Innovation mit der Gesellschaft, der Umwelt und der Wirtschaft sowie der gegenwärtigen und zu erwartenden Folgen und Auswirkungen dieser Wechselwirkungen.“

Im Rahmen der TA könnten zusätzlich zu der für die Zulassung einzelner Produkte erforderlichen Risikoprüfung, auch Fragen zu den möglichen Nutzen und wirtschaftlichen Auswirkungen des Einsatzes von NGTs untersucht werden. So könnten beispielsweise falsche Versprechen von tatsächlichem potenziellen Nutzen unterschieden werden.

Zudem kann sich TA, im Gegensatz zur fallspezifischen Risikoprüfung einzelner Organismen, systemischer mit (Gruppen von) Produkten und deren Gesamtwirkung(en) auf die Ökosysteme befassen und dabei auch Risiken wie Tipping Points (Kipp-Punkte) berücksichtigen, an denen die Gesamtbelastung der Ökosysteme (oder von Teilen davon) überschritten werden könnte.

Mögliche negative Effekte schon frühzeitig abschätzen zu können, um diese im Idealfall zu verhindern oder einen verantwortungsvollen Umgang damit zu ermöglichen, ist die primäre Motivation der TA. Laut Jonas (1979), einem der Begründer der TA, ist

„für die Entwicklung und den Einsatz vieler moderner Technologien das Prinzip von Versuch und Irrtum mit einer nachträglichen Kompensation nicht intendierter und unerwarteter Folgen weder politisch oder ökonomisch praktikabel, noch ethisch verantwortbar.“

18 <https://www.pgeconomics.co.uk/>

19 <https://www.isaaa.org/>

3.3 Zukunftsszenarien als wichtiges Instrument der TA

Als eines der wichtigsten Instrumente in der Methodik der TA hat sich die Entwicklung von möglichen Zukunftsszenarien etabliert, um die denkbaren Folgen einer Technologie in ihrer (Zukunfts-)Offenheit zu strukturieren (Bösch et al. 2021). Dazu gehören neben den angestrebten Vorteilen insbesondere auch Worst-Case-Szenarien wie z.B. Unfälle, unkontrollierte Ausbreitung oder extreme Wetterereignisse. Mit Hilfe dieser Szenarien können die Auswirkungen auf bestimmte Bereiche wie Gesundheit, Umweltschutz, Tierschutz oder Risikoforschung bis hin zu Ernährungssicherheit oder Patente betrachtet werden.

Wichtige Kriterien, um den Einsatz der Neuen Gentechnik anhand von Zukunftsszenarien bewerten und lenken zu können, könnten beispielsweise ihre Kontrollierbarkeit, Vorhersagbarkeit und Fehlerfreundlichkeit sein. Die Kriterien sollten auch verfügbare Alternativen berücksichtigen, die auf konventioneller Züchtung, den Erkenntnissen der Agrarökologie oder traditioneller Methoden zur Erzeugung von Lebensmitteln beruhen. Zudem müssen die Kriterien klar, transparent, zuverlässig und in der Praxis anwendbar sein, um faktengestützte Entscheidungen über die Nachhaltigkeit und den potenziellen Nutzen des Einsatzes der Gentechnik in der Landwirtschaft treffen zu können.

3.4 TA als zusätzliche Kontrollebene

Die bisherigen Erfahrungen mit transgenen Pflanzen zeigen, dass die systemischen Auswirkungen ihres Einsatzes auf die Ökosysteme und die Erzeugung von Lebensmitteln nur unzureichend berücksichtigt wurden. Die damit zusammenhängenden Fragen sind aus guten Gründen von denen der Risikobewertung einzelner Organismen zu trennen: Diese wird vom ‚Risk Assessor‘ (insbesondere der Europäischen Lebensmittelbehörde EFSA) durchgeführt und muss unabhängig von möglichen Vorteilen oder wirtschaftlichen Auswirkungen erfolgen. Die Entscheidung über mögliche Zulassungen wird aber vom ‚Risk Manager‘ (insbesondere der EU-Kommission) vorgenommen, der neben den Risiken für Mensch und Umwelt auch weitere Gesichtspunkte miteinbeziehen kann: Die EU Freisetzungsrichtlinie 2001/18 ermöglicht beispielsweise auch die Berücksichtigung sozio-ökonomischer Kriterien (siehe EU-Richtlinie 2001/18/EC). Doch fehlt bisher die geeignete Methodik und ein transparenter und wissenschaftlich begründeter Kriterienkatalog um diese Gesichtspunkte in der Entscheidungsfindung miteinzubeziehen.

Ein geeigneter Rechtsrahmen für eine umfassende und vorausschauende TA (als ergänzende Kontrollebene zusätzlich zur Risikoprüfung) könnte in diesem Zusammenhang eine wesentliche Hilfestellung darstellen. Ein derartiger Rechtsrahmen sollte es ermöglichen, sowohl die möglichen Vor- und Nachteile als auch weitere systemische Auswirkungen der Neuen Gentechnik zu berücksichtigen, die über die Zulassungsprüfung bestimmter Organismen hinausgehen. Diese Bewertungen sollten zu einem möglichst frühen Stadium und deutlich vor einer möglichen Marktzulassung erfolgen.

Insbesondere im Hinblick auf die mögliche Einführung von Organismen aus Neuer Gentechnik (s.u.) scheint eine TA als zweite Kontrollebene geboten: Hier macht es die Fülle von möglichen Anwendungen, die viele unterschiedliche Arten und ganz unterschiedliche Eigenschaften betreffen können, notwendig, die systemischen Auswirkungen stärker in den Vordergrund zu rücken. Die Politik muss hier in die Lage versetzt werden, die Art und die Anzahl von möglichen Freisetzungen gentechnisch veränderter Organismen wirksam zu kontrollieren und zu begrenzen.

In den nachfolgenden Kapiteln sollen daher einige Merkmale der Neuen Gentechnik und ihrer potenziellen Auswirkungen aus dem Blickwinkel einer vorausschauenden Technikfolgenabschätzung betrachtet werden.

4. Technikfolgenabschätzung und Neue Gentechnik (NGT)

Auf dem Gebiet der Gentechnik werden aktuell viele neue Optionen für die Freisetzung von NGT- Organismen z.B. in der Landwirtschaft und sogar im Naturschutz diskutiert (JRC, 2021; BfN, 2022). Die möglicherweise daraus resultierenden Auswirkungen verlangen eine vorausschauende Gesamtanalyse.

Dabei müssen im Hinblick auf mögliche Auswirkungen auf die Umwelt und zur Bewertung der Nachhaltigkeit deren technischen Potenziale ausreichend berücksichtigt werden: Die Neue Gentechnik und ihr wichtigstes Werkzeug, die ‚Genschere‘ CRISPR/Cas, ist genauer und schneller als bisherige gentechnische Verfahren, aber keineswegs fehlerfrei. Sie ermöglicht wesentlich tiefgreifendere Veränderungen der Genetik und der Biologie von Pflanzen und Tieren (s.u.). Auch wenn keine zusätzlichen Gene eingeführt werden, gehen die erzielten genetischen Veränderungen und Genkombinationen oft weit über das hinaus, was in der bisherigen Züchtung bekannt ist. Mit der neuen Gentechnik könnten auch natürliche Populationen jenseits von Acker und Labor verändert werden, wie Wildkräuter, Bäume, Bienen und andere Insekten und Bodenorganismen (Testbiotech, 2021c). Die entsprechenden Organismen sind nicht durch die Evolution angepasst und können sich auf mehreren Ebenen (negativ) auf die Ökosysteme auswirken.

In Zukunft könnten beispielsweise innerhalb eines Ökosystems gleichzeitig NGT-Pflanzen angebaut, gentechnisch veränderte Bodenmikroorganismen freigesetzt und auch NGT-Insekten in die Umwelt entlassen werden. Diese Freisetzungen hätten das Potenzial, den weiteren Verlauf der Evolution zu verändern und gegenseitige Anpassungsprozesse zu stören. Um die tatsächlichen Folgen abschätzen zu können, müssen nicht nur die Risiken für jeden individuellen Organismus (‚Event‘), sondern auch die Interaktionen zwischen den verschiedenen gentechnisch veränderten Organismen (unter Einbeziehung der Wechselwirkungen mit ihrer Umwelt) geprüft werden. Es besteht das Risiko, dass diese NGT-Organismen in ihrer Gesamtheit einen negativen Einfluss auf die jeweiligen Arten, Populationen und Ökosysteme haben, der über die Effekte hinausgeht, die für die einzelnen NGT-Organismen im Rahmen der Zulassungsprüfung identifiziert wurden. Die Entwicklung von Szenarien, mit denen diese Wechselwirkungen erforscht und konkrete Hypothesen über Risiken und Risikovermeidung abgeleitet werden können, wäre eine Aufgabe für die vorausschauende Technikfolgenabschätzung, ohne die keine Aussagen über die Nachhaltigkeit der NGT-Organismen getroffen werden können. Eine weitere Aufgabe für die TA ergibt sich in der Überprüfung der erwarteten Vorteile der NGT-Organismen. Ähnlich wie bei der Einführung von transgenen Pflanzen werden mit der Neuen Gentechnik große Hoffnungen verbunden. Von manchen Akteuren aus Wissenschaft, Wirtschaft und Politik wird aktuell sogar der Eindruck erweckt, dass die hypothetischen Vorteile eines Einsatzes der NGT in der Landwirtschaft schon jetzt Realität wären (siehe u.a. Leopoldina, 2019; ALLEA 2020; EU-Kommission 2022).

Zu berücksichtigen ist beispielsweise, dass der Einsatz von NGT-Verfahren bei Pflanzen und Tieren oft zu extremen Ausformung von Eigenschaften führt, die mit erheblichen Nebenwirkungen und Risiken für die betroffenen Pflanzen und Tiere und deren Umwelt einhergehen können (siehe Kapitel 6). Ob auf diese Weise z.B. tatsächlich Pflanzen erzielt werden können, die resistenter gegen negative Umwelteinflüsse wie Klimawandel und Pflanzenkrankheiten sind, muss erst noch gezeigt werden.

In jedem Fall müssen also leere Versprechungen und zu große Erwartungen von den tatsächlich möglichen Vorteilen unterschieden werden. Ohne ausreichende Überprüfbarkeit der möglichen Vorteile werden möglicherweise völlig ungeeignete Risikotechnologien als ‚Lösungen‘ für Probleme wie Welthunger, Klimawandel und die negativen Auswirkungen der (industriellen) Landwirtschaft angepriesen. Ähnlich wie in der Vergangenheit (EEA, 2001) besteht somit die Gefahr, dass angebliche Lösungen vielmehr zu neuen Problemen führen.

4.1 Unterschiede zwischen NGT und konventioneller Züchtung

BefürworterInnen der Neuen Gentechnik behaupten häufig, dass der Einsatz von NGTs wie z.B. CRISPR/Cas, bzw. bestimmte Anwendungen dieser Techniken, vor allem in der Pflanzenzüchtung weitestgehend natürlich vorkommenden Prozessen entsprechen würde und die Produkte somit als ‚naturidentisch‘ anzusehen seien (z.B. Gao, 2018; Leopoldina, 2019; Eriksson et al., 2020).

Zahlreiche Forschungsarbeiten haben in den letzten Jahren jedoch grundlegende Unterschiede zwischen Züchtung und Gentechnik gezeigt (u.a. Agapito-Tenfen & Wickson, 2018; Eckerstorfer et al., 2019; Kawall, 2019; Kawall, 2021b).

Ein Grund für diese Unterschiede sind beispielsweise natürliche Mechanismen in den Zellen, die wichtige DNA-Regionen und genetische Informationen besonders effizient schützen können (z.B. durch Reparaturprozesse, mit denen Mutationen korrigiert und dadurch ursprüngliche Funktionen wiederhergestellt werden), so dass bestimmte Genfunktionen wesentlich seltener verloren gehen oder verändert werden als andere (Frigo-la et al., 2017; Belfield et al., 2018; Kawall, 2019; Halstead et al., 2020; Monroe et al., 2022). Neben dem Schutz ‚essentieller‘ Gene können mit der Neuen Gentechnik auch andere evolutionäre Mechanismen und Faktoren der Genomorganisation, wie z.B. Genduplikationen, gekoppelte Gene oder epigenetische Mechanismen, umgangen werden. Dadurch werden Veränderungen im Erbgut möglich, die ansonsten sehr unwahrscheinlich sind (Lin et al., 2014; Wendel et al., 2016; Filler Hayut et al., 2017; Jones et al., 2018; Huang & Li, 2018; Kawall, 2019; Kawall et al., 2020).

Weil das Genom durch die NGTs in größerem Umfang für genetische Veränderungen verfügbar gemacht wird, unterscheiden sich die Ergebnisse der Anwendungen von NGTs ganz wesentlich von denen bisheriger Züchtungsmethoden (Abb. 10). So sind beim Einsatz der ‚Zufalls-Mutagenese‘, bei der chemische Substanzen oder physikalische Strahlung zur Beschleunigung der Mutationsgeschwindigkeit eingesetzt werden, keine genetischen Veränderungen zu erwarten, die nicht auch spontan im Rahmen längerer Zeiträume auf natürliche Weise auftreten können. Dagegen können mit Hilfe der NGTs auch Genfunktionen verändert werden, die sonst durch natürliche Schutzmechanismen wie z.B. oben genannte Reparaturprozesse geschützt sind. Insbesondere durch den Einsatz der Gen-Schere CRISPR/Cas kann verhindert werden, dass gentechnisch erzeugte Veränderungen von den Zellen wieder repariert, gekoppelte Gene zusammen vererbt oder Genduplikationen als Sicherheitskopien wirksam werden (Kawall, 2019; Kawall et al., 2020). Zudem können durch das sog. Multiplexing auch mehrere verschiedene Genorte gleichzeitig verändert werden (Raitskin & Patron, 2016; Wang et al., 2016; Zetsche et al., 2017; Kawall et al., 2020). Im Ergebnis können so (auch unbeabsichtigt) neue Genotypen und Phänotypen erzielt werden, die weit über das hinausgehen, was aus der konventionellen Zucht zu erwarten ist (Überblick und weitere Quellen: Testbiotech, 2022). Das trifft auch dann zu, wenn keine zusätzlichen Gene eingefügt werden.

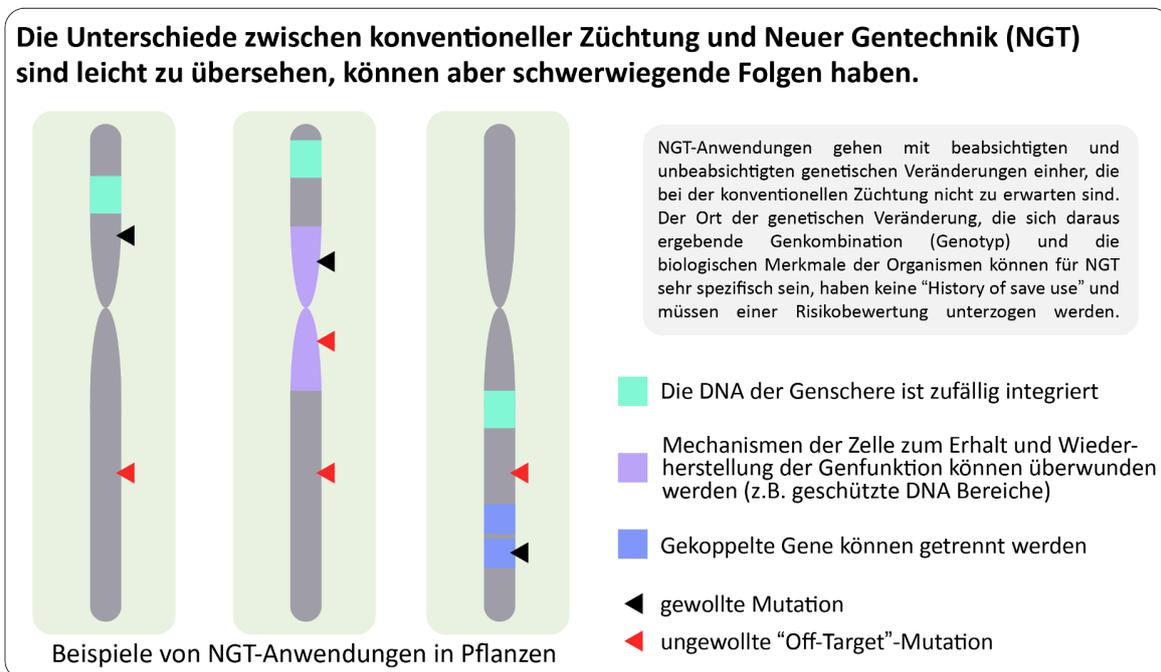


Abbildung 10: Zwar kann es auch bei der bisherigen Züchtung zu nicht beabsichtigten genetischen Veränderungen (Mutationen) kommen. Doch gehen die Verfahren der Neuen Gentechnik mit Veränderungen einher, die bei der konventionellen Zucht und zufälligen Mutationen nicht zu erwarten sind: Sowohl der Ort der Mutation als auch die resultierende Genkombination können sich deutlich von den Ergebnissen der konventionellen Zucht unterscheiden. Dies gilt nicht nur für beabsichtigte, sondern auch für unbeabsichtigte genetische Veränderungen. Einige Gründe dafür sind: NGTs können Beschränkungen der natürlichen Genomorganisation überwinden, die von den Zellen zur Aufrechterhaltung der Genfunktionen genutzt werden (wie z.B. Reparaturmechanismen, Genduplikationen oder epigenetische Mechanismen). Außerdem können mehrere verschiedene Genorte gleichzeitig verändert werden (Multiplexing). Und auch durch die Einbringung der NGT-Werkzeuge mit den ungezielten Verfahren der alten Gentechnik können unbeabsichtigte Veränderungen im Genom der Pflanzen verursacht werden.

Zusammengefasst macht es die höhere Verfügbarkeit des Genoms möglich, dass

- grundlegende Veränderungen der biologischen Eigenschaften von Organismen herbeigeführt werden können, auch wenn keine zusätzlichen Gene eingefügt werden;
- die Beschränkungen der natürlichen Genomorganisation, wie zum Beispiel Reparaturmechanismen (oder andere Schutzfaktoren wie Gen-Duplikationen) überwunden werden und so neue Genotypen generiert werden, die über das hinausgehen, was mit konventioneller Zucht erreicht wird;
- extremere Versionen bekannter Phänotypen oder auch neue Phänotypen erzielt werden, die oft mit Nebenwirkungen („trade offs“) verbunden sind (siehe Testbiotech, 2022).

Dabei ist die Gen-Schere nicht fehlerfrei: Die technischen Potenziale von Werkzeugen wie CRISPR/Cas bedingen auch die Möglichkeit für unbeabsichtigte genetische Veränderungen, die unter den Gegebenheiten der konventionellen Zucht kaum zu erwarten sind.

Sowohl die mit den NGT-Verfahren einhergehenden beabsichtigten, als auch die unbeabsichtigten Veränderungen (und die dadurch ausgelösten beabsichtigten und unbeabsichtigten Effekte, die unmittelbar, verzögert oder auch kumulativ auftreten) bedingen spezifische Risiken für Mensch und Umwelt (Kawall et al., 2020; Kawall, 2021a; Kawall, 2021b; Eckerstorfer et al., 2021; Yang et al. 2022; Testbiotech, 2022) und müssen vor einer Zulassung eingehend geprüft werden.

Dabei gibt es mehrere Faktoren, die die Ergebnisse der NGT-Verfahren in Bezug auf beabsichtigte und unbeabsichtigte Eigenschaften beeinflussen. Dazu gehören die jeweilige Art, die intendierten Züchtungsmerkmale, die Zielgene (ihre Position im Erbgut, Funktion, Anzahl, Ähnlichkeit mit anderen Genen), der Typ der ‚Gen-Schere‘ (oder anderer gentechnischer Hilfsmittel) und das Verfahren der Einschleusung der Gen-Schere in die Zellen (bzw. das von anderen gentechnischen Hilfsmitteln). Unter anderem muss beachtet werden, dass die Veränderungen bei den Verfahren der Neuen Gentechnik immer in mehreren Stufen durchgeführt werden. Beispielsweise wird beim Einsatz der Gen-Schere CRISPR/Cas in Pflanzen regelmäßig auf die ungezielten Verfahren der alten Gentechnik zurückgegriffen: Um die DNA, die für die Bildung der Gen-Schere notwendig ist, in die Zellen einzubringen, wird auch bei den NGTs vorwiegend die Gen-Kanone oder die mit *Agrobacterium tumefaciens* vermittelte Transformation eingesetzt. Daher entstehen in den meisten Fällen zunächst transgene Pflanzen, die eine Vielzahl von unbeabsichtigten, durch diesen ersten Schritt bedingte, genetische Veränderungen aufweisen können (Forsbach et al., 2003; Makarevitch et al., 2003; Windels et al., 2003; Rang et al., 2005; Gelvin et al., 2017; Jupe et al., 2019; Liu et al., 2019; Yue et al., 2022). Diese unbeabsichtigten Effekte wurden auch schon bei NGT-Pflanzen beobachtet (Braatz et al., 2017; Biswas et al., 2020). Fehlen ausreichende Standards für die Risikobewertung, können solche unbeabsichtigten Effekte unbemerkt im Erbgut überdauern, sich rasch in den Populationen ausbreiten und ggf. auch akkumulieren.

Im Ergebnis können auf jeder Stufe des Prozesses – (I) der Insertion der DNA für die Gen-Schere, (II) der Erkennung und der Veränderung der Zielregion und (III) der Reparaturprozesse in den Zellen – spezifische unbeabsichtigte Veränderungen auftreten, die jeweils mit eigenen Risiken einhergehen. Dies macht eine Risikoprüfung für jeden ‚Event‘ notwendig und wirft auch Fragen für die Technikfolgenabschätzung auf.

4.2 Systemische Auswirkungen auf die Umwelt

Wie dargelegt könnten in naher Zukunft – bedingt durch das technische Potenzial der Genschere CRISPR/Cas – viele verschiedene NGT-Organismen mit einer großen Bandbreite unterschiedlichster Eigenschaften innerhalb kurzer Zeit und parallel zueinander in gemeinsame Ökosysteme freigesetzt werden könnten.

Dabei ist die Geschwindigkeit der Veränderung der Zusammensetzung der Ökosysteme ein wichtiger Faktor: Neue Eigenschaften, wie sie die Evolution hervorbringt, breiten sich meist nur allmählich in den natürlichen Populationen aus. Demgegenüber könnten, infolge der Einführung der Neuen Gentechnik, die Ökosysteme massenhaften Freisetzungen von nicht an die Evolution angepassten NGT-Organismen innerhalb kurzer Zeiträume ausgesetzt werden. Gleichzeitig versprechen die BefürworterInnen der neuen Gentechnikverfahren immer kürzere Entwicklungs- und Produktionszyklen, wodurch in der Folge in immer engeren Zeitabständen immer wieder neue gentechnisch veränderte Organismen mit neuen Eigenschaften in die Umwelt entlassen werden könnten. In der Folge können die betroffenen Ökosysteme erhöhten Stressbedingungen ausgesetzt werden, die deren Belastbarkeit überschreiten.

Auch kleine Veränderungen können eine große Wirkung haben: Schon durch die Veränderung einzelner Gene, die z.B. eine besondere Schlüsselfunktion innerhalb eines Nahrungsnetzes ausüben, können Ökosysteme gefährdet werden. Wenn beispielsweise alle Genvarianten (Allele) eines solchen (Schlüssel-)Gens durch NGTs vereinheitlicht werden und somit die genetische Vielfalt innerhalb einer Pflanzenpopulation reduziert wird, kann das Auswirkungen auf die Zusammensetzung assoziierter Arten wie Nützlinge oder Schädlinge haben. Werden diese Arten infolge einer derartigen ‚Gen-Uniformierung‘ stark dezimiert oder sterben sogar ganz aus, kann schon dieser vermeintlich simple Eingriff zu einer Destabilisierung ganzer Nahrungsnetze führen (Barbour et al., 2022).

Es gibt Anwendungen von NGTs, die sehr viel tiefgreifender und mit großer Breitenwirkung in natürliche, nicht-domestizierte Wildpopulationen eingreifen könnten als dies in den Experimenten von Barbour et al. (2022) der Fall ist. Dazu gehören sog. ‚Gene Drives‘, die ein neues genetisches Merkmal mit größerer Häufigkeit in den Populationen verbreiten können, als dies nach den Vererbungsregeln nach Mendel zu erwarten wäre (Simon et al., 2018; Frieß et al., 2019). Oder auch die absichtliche Freisetzung von gentechnisch veränderten Viren, die in der Landwirtschaft zum Pflanzenschutz, als Vektoren zur gentechnischen Veränderung von Nutzpflanzen oder auch bei Wildtieren als sich selbst ausbreitende Impfstoffe eingesetzt werden sollen (Lentzos et al., 2022; Pfeifer et al., 2022).

Insgesamt können Freisetzungen von NGT-Organismen nicht generell als ‚neutral‘ für die Funktionsweise der betroffenen Ökosysteme angesehen werden. In diesem Zusammenhang spielen sowohl deren ‚Natürlichkeitsgrad‘ (hinsichtlich der beabsichtigten und unbeabsichtigten Effekte) als auch die Größenordnung der Freisetzungen in die Umwelt, die die Wahrscheinlichkeit unerwünschter Wechselwirkungen bestimmen, eine entscheidende Rolle. Demzufolge muss auch dann, wenn einzelne Events als sicher gelten, das Gesamtausmaß der Freisetzungen (die Anzahl der NGT-Organismen, die verschiedenen Merkmale und die beteiligten Arten) berücksichtigt werden (siehe auch Heinemann et al., 2021).

Vergleichbar mit der Verschmutzung der Umwelt mit Plastik und Chemikalien muss es auch hier nicht immer ein bestimmter gentechnisch veränderter Organismus sein, der die tatsächlichen Probleme verursacht, vielmehr kann die Gesamtheit unterschiedlicher Auswirkungen mehrerer dieser Organismen auf die Umwelt entscheidend sein. Dabei mag zwar die Freisetzung einer geringen Anzahl von NGT-Organismen über einen kurzen Zeitraum möglicherweise keine negativen Auswirkungen auf die Ökosysteme haben, wohingegen Freisetzungen einer großen Anzahl verschiedener NGT-Organismen über längere Zeiträume zu einer Überlastung bzw. einem Kippen der Ökosysteme führen können.

Diese Beobachtungen unterstreichen, dass es notwendig ist, die Gesamtbelastung der Ökosysteme vorausschauend in den Blick zu nehmen, um die Nachhaltigkeit der Organismen aus Neuer Gentechnik beurteilen zu können. Dabei sollte der Fokus bei Freisetzungen von NGT-Organismen nicht nur auf deren Interaktionen mit den Ökosystemen liegen, sondern auch die Wechselwirkungen zwischen den verschiedenen NGT-Organismen erfasst werden. Im Rahmen einer TA sollten deswegen verschiedene Risikoszenarien berücksichtigt werden, die verschiedene NGT-Organismen miteinbeziehen und beispielsweise folgende Auswirkungen untersuchen: (1) Störungen der ökologischen Wechselwirkungen zwischen Pflanzen und deren assoziierten Mikrobiomen und/oder Bestäubern, (2) Schwächung der Widerstandsfähigkeit (Resilienz) gegenüber biotischen oder abiotischen Stressfaktoren, (3) evolutionäre Fehlanpassungen, die eine weitere gemeinsame Entwicklung der Arten verhindern und (4) Gefährdung der biologischen Vielfalt durch eine unkontrollierte oder invasive Verbreitung von NGT-Organismen. Aus derartigen Szenarien können dann Hypothesen abgeleitet werden, die zeigen, welche Daten und Untersuchungen für die konkrete Risikoprüfung und die Entscheidung über Zulassungen notwendig wären.

Da anzunehmen ist, dass in vielen Fällen, aufgrund von fehlenden Daten und erheblichen Unsicherheiten (bzw. Unbekannten), keine endgültigen Schlussfolgerungen über die Sicherheit von NGT-Organismen abgeleitet werden können, empfiehlt sich die Einführung entsprechender Abbruchkriterien (‚cut-off‘-Kriterien). Diese sollen es ermöglichen, Entscheidungen auch dann treffen zu können und ggf. Anträge auf Freisetzungen zurückzuweisen, wenn die Unsicherheiten bezüglich der tatsächlichen Gefahren, die mit den Gentechnikorganismen einhergehen, sehr groß, bzw. zu groß sind (Bauer-Panskus et al., 2020; Then et al., 2020).

In jedem Fall ist es wichtig, die Anzahl der Freisetzungen, deren Dauer, die verschiedenen Eigenschaften und die Interaktionen zwischen den NGT-Organismen in ihrer Gesamtheit bei der gesetzlichen Regulierung von gentechnisch veränderten Organismen zu berücksichtigen. Insbesondere die TA kann dafür die notwendigen Grundlagen liefern, um die Art und Menge der Organismen, die ggf. in die Umwelt freigesetzt werden könnten, zu kontrollieren und deren etwaige Zulassung bei Bedarf auch strikt zu begrenzen.

5. Mögliche disruptive Effekte von NGTs auf Züchtung, Landwirtschaft und Lebensmittelmärkte

Sollten NGT-Organismen in großem Maßstab in die Landwirtschaft eingeführt werden, ist zu erwarten, dass dadurch nicht nur die Eigenschaften von Nutztieren und Kulturpflanzen verändert, sondern auch die Lebensmittelproduktionssysteme in ihrer Gesamtheit beeinflusst werden. NGTs können in diesem Zusammenhang auch als disruptive Technologien betrachtet werden. Das wichtigste Instrument der NGTs, die ‚Gen-Schere‘ CRISPR/Cas wurde in der Fachzeitschrift Nature (Ledford, 2015) beispielsweise als ‚Disruptor‘ in verschiedener Hinsicht bezeichnet: *„Eine leistungsstarke Technologie und eine bahnbrechende Neuerung, die aber auch mit drängenden Problemen einhergeht.“* Während Goold et al. (2018) und Menchaca et al. (2020) das disruptive Potential der Gen-Schere in der Pflanzen- und Tierzucht als positiv hervorheben, gibt es auch Bedenken bezüglich möglicher negativer disruptiver sozio-ökonomischer Auswirkungen auf Saatgutmärkte, Lebensmittelproduktion und Wahlfreiheit (Clapp, 2021, Testbiotech, 2021b).

Disruptive Technologien sind nicht per se gut oder schlecht. Im Falle der NGTs können sich potenziell negative Auswirkungen aber auf viele besonders sensible bzw. schützenswerte Bereiche erstrecken. In diesem Zusammenhang müssen insbesondere die Ökosysteme und die Biodiversität, die Lebensmittelerzeugung, die Produktion von Saatgut und die Wahlfreiheit der VerbraucherInnen besondere Beachtung finden. Die TA steht hier vor der Frage ob und wie die Folgen, die durch neue, disruptive Technologien insbesondere im Bereich der Landwirtschaft und Lebensmittelerzeugung entstehen können, schon vor deren Einführung bewertet werden können.

Eine umfassende und vorausschauende TA könnte unter anderem dazu dienen, leere Versprechungen oder nicht belegbare Vorteile von tatsächlichen Potenzialen zu unterscheiden. Dabei müssen auch sozio-ökonomische Faktoren berücksichtigt werden, wie z.B. die Umverteilung der Kosten und Gewinne. Insbesondere die Auswirkungen auf die traditionelle Züchtung und Lebensmittelproduktion, den konventionellen sowie ökologischen Landbau und die Wahlfreiheit der VerbraucherInnen sollten in diese Bewertungen miteinbezogen werden.

Auch die EU-Kommission stellt fest, dass es zusätzlich zur Risikobewertung weiterer Instrumente bedarf, um den möglichen Nutzen der NGT-Pflanzen zu bewerten (EU-Kommission, 2021):

„Eine rein sicherheitsbezogene Risikobewertung reicht möglicherweise nicht aus, um die Nachhaltigkeit zu fördern und zu den Zielen des Europäischen „Green Deal“, und darin insbesondere der „Farm-To-Fork“- und der Biodiversitäts-Strategie, beizutragen; auch die Vorteile, die zur Nachhaltigkeit beitragen, müssten bewertet werden, weshalb möglicherweise ein geeigneter Mechanismus zur Begleitung der Risikobewertung erforderlich ist.“

Im Folgenden werden mögliche disruptive Effekte diskutiert, die insbesondere durch Patente ausgelöst werden und sich auf Landwirtschaft, Züchtung und Wissenschaft erstrecken. Zudem werden auch die Interessen der LebensmittelproduzentInnen und VerbraucherInnen dargestellt.

5.1 Disruptive Wirkung von Patenten

In Zusammenhang mit der Einführung von NGTs können verschiedene Bereiche identifiziert werden, die von Patenten besonders betroffen sind: Der Zugang zur Technologie, die Verfügbarkeit von biologischer Vielfalt und die Unabhängigkeit von Wissenschaft und Risikobewertung.

5.1.1 Zugang zur Technologie

Das Feld der Patentanträge und Patenterteilungen auf Pflanzen im Bereich der Neuen Gentechnik wird v.a. durch Corteva (der ehemaligen Agrarsparte von DowDuPont) dominiert (Jefferson et al., 2021; Testbiotech, 2021b; Global 2000, 2022). Zur Absicherung seiner dominanten Position ist es dem Unternehmen schon 2018 gelungen, zusätzlich zu seinen eigenen Patentanträgen, insgesamt rund 50 Grundlagenpatente der CRISPR/Cas-Technologie in einem Patente-Pool zu vereinen (Then, 2019). Dieser Pool ist in den letzten Jahren beständig ausgeweitet worden (IHS Markit, 2020; Jefferson et al., 2021). Um CRISPR/Cas vollumfänglich in der Pflanzenzucht einsetzen zu können, müssen andere Züchterbetriebe dementsprechend Zugang zu diesem Patente-Pool haben. Sie sind dazu verpflichtet, Lizenzen zu zahlen, Verträge über die Einhaltung von entsprechenden Leitlinien und zur Verschwiegenheit zu unterschreiben und ihre Züchtungsziele offenzulegen. Diese in diesem Ausmaß bisher in der Pflanzenzucht nie dagewesene Marktmacht eines einzelnen Unternehmens ermöglicht die Kontrolle potenzieller WettbewerberInnen und sichert dessen marktbeherrschende Stellung ab.

Für Großkonzerne wie Bayer oder BASF wird es zwar weiterhin möglich sein, eigene Verträge mit den ErfinderInnen der CRISPR/Cas-Technologie abzuschließen, für kleinere Zuchtunternehmen kommt das jedoch weit weniger in Frage, auch wenn u.a. Unternehmen wie die KWS und Rijk Zwaan verstärkt versuchen, eigene Patente anzumelden. Durch hunderte von bereits eingereichten Patentanträgen wird der Zugang zur CRISPR/Cas-Technologie kontrolliert bzw. deutlich eingeschränkt oder blockiert, was für kleine und mittelständische Züchterbetriebe, die mit NGTs arbeiten wollen, ein großes Problem darstellen und ihre Eigenständigkeit gefährden kann. Infolgedessen scheint die Einführung der NGTs unausweichlich zu einer weiteren Marktkonzentration im Bereich der Pflanzenzucht zu führen, die auch mit schwerwiegenden Folgen für die Landwirtschaft und die Lebensmittelmärkte einhergehen kann.

5.1.2 Zugang zu biologischem Material

In der konventionellen Züchtung sowie bei der Anwendung der Neuen Gentechnikverfahren ist der freie Zugang zu biologischen Ressourcen unverzichtbar: ZüchterInnen selektieren Pflanzen sowohl anhand von züchterischen (phänotypischen) Eigenschaften als auch nach Auswahl von Genotypen (markergestützte Selektion). Dafür müssen der Zugang und die Verwendung der jeweiligen genetischen Grundlagen frei verfügbar sein. Doch auch die AnwenderInnen der Neuen Gentechnik sind auf den Zugang zur natürlichen genetischen Vielfalt angewiesen, die sie für die Programmierung der Gen-Scheren benötigen: Das betrifft sowohl die Zielorte im Genom als auch das Einfügen erwünschter DNA-Bausteine.

In diesem Zusammenhang ist es äußerst bedenklich, dass beispielsweise in Patentanträgen von Syngenta die Nutzung tausender Genvarianten (auch ‚single nucleotid polymorphisms‘ (SNPs) genannt), u.a. von Ackerpflanzen wie Soja und Mais beansprucht werden, die natürlicherweise vorkommen und die zum Beispiel die Widerstandskraft der Pflanzen gegenüber Krankheiten stärken können (WO2021000878, WO202103391, WO2021154632, WO2021198186, WO2021260673). In den meisten Fällen wurden die jeweiligen Genvarianten in wilden Verwandten der gezüchteten Sorten entdeckt (Tippe et al., 2022). Die Reichweite der Patente ist dabei keineswegs auf die Neue Gentechnik beschränkt, sondern erstreckt sich auch auf die Verwendung der Genvarianten im Rahmen der konventionellen Zucht.

Derartige Patentanträge bedeuten für ZüchterInnen erhebliche rechtliche Unsicherheiten. Es dürfte nahezu unmöglich sein, herauszufinden, ob beispielsweise eine bestimmte Sojapflanze mit erhöhter Resistenz gegenüber dem asiatischen Soja-Rost, einige der rund 5.000 Genvarianten in ihrem Erbgut trägt, die in der Patentanmeldung WO2021154632 von Syngenta aufgelistet sind. Werden diese Patente erteilt, können ZüchterInnen nicht mehr alle konventionell gezüchteten Sorten für die weitere Züchtung verwenden. Sie können für ihre Züchtung nicht einmal auf wilde verwandte Arten der Soja ausweichen, weil jegliche züchterische Verwendung der betroffenen Gene durch Patente beansprucht wird. Im Ergebnis entsteht durch diese Praxis ein undurchdringliches Patente-Dickicht für ZüchterInnen.

Generell wird durch Patente eine Monopolstellung für die wirtschaftliche Verwertung der beanspruchten ‚Erfindungen‘ gewährt. Werden Patente auf spezielle genetische Varianten erteilt, können alle anderen ZüchterInnen von deren Nutzung für die Produktion und Vermarktung neuer Sorten ausgeschlossen oder durch Lizenzverträge abhängig gemacht werden. Ohne Patente hatten ZüchterInnen unter dem Regelwerk des Sortenschutzes bisher die Möglichkeit, alle Pflanzensorten zu verwenden, um neue, noch bessere Sorten zu züchten und als eigene Züchtungen auch zu vermarkten. Dieser Motor der Innovation in der Pflanzenzucht droht jetzt durch ein undurchdringliches Dickicht von Patentanträgen auf das Genom von Kulturpflanzen blockiert zu werden. Die Neue Gentechnik ist ein wesentlicher Treiber dieser Entwicklung. Werden Patente auf spezielle Genvarianten und deren Verwendung erteilt, kann das auch die konventionellen ZüchterInnen behindern oder blockieren.

Das kann zu einem Stillstand, Insolvenzen und Umbrüchen im Bereich der konventionellen Züchtung führen, da die Unsicherheiten in Bezug auf den Geltungsbereich der Patente und ihre rechtlichen Auswirkungen für viele traditionelle Zuchtunternehmen kaum zu überblicken sind. Schon die bloße Anmeldung von Patenten, die dann ggf. erst nach Jahren erteilt werden, kann eine abschreckende Wirkung auf andere ZüchterInnen haben, die an ähnlichen Züchtungsmerkmalen arbeiten, wie sie in Patenten beansprucht werden. Diese Rechtsunsicherheiten, die mit einer Ausweitung des Patentschutzes aus dem Bereich der Gentechnik auf die konventionelle Züchtung einhergehen, erhöhen das Risiko, dass die Pflanzenzucht (auch im Hinblick auf den „Green Deal“ und die „Farm to Fork“-Strategie der EU) weit hinter ihren Möglichkeiten zurückbleiben wird, wichtige Innovationen für Landwirtschaft und Lebensmittelproduktion bereitzustellen.

5.1.3 Einfluss auf Wissenschaft und Risikobewertung

Über Patente wird zu einem bestimmten Maß auch die Wissenschaft vereinnahmt. Viele im Bereich der Neuen Gentechnik forschende WissenschaftlerInnen empfangen nicht nur Drittmittel aus der Industrie, sondern melden auch selber Patente auf ihre Forschungsergebnisse an. Äußern sich diese ExpertInnen zur Risikobewertung ihrer Produkte im Zusammenhang mit der gesetzlichen Regulierung, führt dies zwangsläufig zu Interessenkonflikten. Diese Beeinträchtigung der gebotenen Unabhängigkeit wird auch von der Europäischen Lebensmittelbehörde EFSA in ihren Unabhängigkeitsrichtlinien benannt.²⁰ Darüber hinaus sind auch disruptive Effekte auf die wissenschaftliche Forschung denkbar: Anwendungen, die mit Profiten einhergehen werden, können gegenüber anderen (unprofitableren und ggf. risikoärmeren) Lösungen von Forschungseinrichtungen mit Vorrang verfolgt werden.

Diese speziellen Interessen haben auch Einfluss auf die Debatte über eine mögliche Deregulierung der Neuen Gentechnik. Denn durch die gegenwärtige Beschränkung der Geltungsdauer von Patenten auf 20 Jahre liegt

20 https://www.efsa.europa.eu/sites/default/files/corporate_publications/files/policy_independence.pdf

es im Interesse von PatentinhaberInnen und den beteiligten Investorengruppen und Firmen, innerhalb dieses engen Zeitfensters möglichst viel Profit aus ihrer patentierten Technologie (inklusive daraus entstandener Produkte wie z.B. Saatgut) zu erzielen. Diese Gruppen haben daher ein großes Eigeninteresse an einer möglichen Markteinführung ihrer patentierten Pflanzen. Aus ihrer Perspektive erscheint eine weitgehende Deregulierung von Produkten aus Neuer Gentechnik vorteilhaft, um einen möglichst raschen Zugang zu den europäischen Märkten zu gewährleisten. Um den Gesetzgeber dazu zu bringen, die verpflichtenden Zulassungsprozesse abzuschaffen, wird daher versucht, den Eindruck zu erwecken, dass es einen Konsens unter WissenschaftlerInnen gäbe, dass beispielsweise der Anbau von Gentechnik-Pflanzen grundsätzlich nicht mit Risiken verbunden sei (siehe z.B. Leopoldina, 2019; ALLEA, 2020; weitere Informationen und Quellen in Testbiotech, 2021b).

5.2 Auswirkungen auf Ernährungssouveränität und Wahlfreiheit

Wie dargelegt, bleibt der Einsatz der Neuen Gentechnik für die Lebensmittelproduktion (v.a. für kleine und mittelständische Zuchtunternehmen, traditionelle und ökologische Landwirtschaft und regionale Märkte), die auf der Vielfalt von Saatgut beruht und eng mit der Biodiversität und den Ökosystemen verbunden ist, höchstwahrscheinlich nicht ohne Konsequenzen.

In der Folge kann der Einsatz von NGTs auch disruptive Auswirkungen auf die Interessen der VerbraucherInnen haben, die beispielsweise in ihren Auswahlmöglichkeiten deutlich eingeschränkt werden können. Wären NGT-Organismen und daraus hergestellte Lebensmittel von den obligatorischen Zulassungsverfahren ausgenommen, hätte dies auch negative Auswirkungen auf die Verfügbarkeit von Nachweismethoden, die Rückverfolgbarkeit, die Koexistenz und die Überwachung nach dem Inverkehrbringen: Im Rahmen der aktuell geltenden gesetzlich vorgeschriebenen Zulassungsverfahren müssen genaue Angaben darüber gemacht werden, welche genetischen Veränderungen vorgenommen wurden. Diese Angaben sind notwendig, um entsprechende Nachweisverfahren festzulegen. Ohne diese Nachweisverfahren kann weder die Wahlfreiheit der VerbraucherInnen noch die Gentechnikfreiheit in der ökologischen Landwirtschaft und der traditionellen Lebensmittelerzeugung aufrechterhalten werden. Von einer Abschwächung oder Fragmentierung der bestehenden Regulierungen und Kontrollmechanismen wären also auch die (wirtschaftlichen) Interessen vieler LebensmittelproduzentInnen und VerbraucherInnen betroffen.

Eine vorausschauende Technikfolgenabschätzung sollte deswegen die Ernährungssicherheit, die Ernährungssouveränität und die Wahlfreiheit für die Landwirtschaft und die VerbraucherInnen berücksichtigen. Dabei müsste auch im Sinne der VerbraucherInnen berücksichtigt werden, dass es in Zukunft auf der Seite der ProduzentInnen (in der Züchtung, der Landwirtschaft und der Lebensmittelherstellung) weiterhin möglich bleiben muss, zwischen gentechnisch veränderten und gentechnikfreien Rohwaren zu unterscheiden und konsequent zu trennen.

6. Welche Erwartungen an die Neue Gentechnik sind realistisch?

Von verschiedenen AkteurInnen wird betont, dass der Einsatz der Neuen Gentechnik zu einer erheblichen Beschleunigung der Pflanzenzucht führen würde (z.B. STOA, 2022). Dabei wird oft übersehen, dass auch die konventionelle Zucht viele Vorteile hat, etwa bei der Herausbildung komplexer Eigenschaften. Häufig beruhen diese Merkmale auf sogenannten Quantitative Trait Loci (QTLs), also verschiedener Erbinformationen innerhalb eines bestimmten Genomabschnitts, die an der Ausprägung von bestimmten Eigenschaften wie z.B. Ertrag oder Stressresistenz beteiligt sind. Die exakten genetischen Grundlagen dieser Eigenschaften sind auf DNA-Ebene oft nicht genau definiert und können erheblich durch den genetischen Hintergrund der jeweiligen Sorte beeinflusst werden. Notwendige Voraussetzung für die konventionelle Züchtung ist eine große biologische Vielfalt, wie sie u.a. in den vorhandenen Sorten existent ist und ggf. durch ‚Zufalls‘-Mutagenese weiter erhöht werden kann. Im Gegensatz dazu können Züchtungsmerkmale mit Hilfe der Neuen Gentechnik nur dann erzeugt werden, wenn die entsprechenden DNA-Bereiche genau bekannt sind. In vielen Fällen ist es daher viel einfacher, komplexe Eigenschaften, die auf QTLs basieren, mit konventioneller Züchtung zu erreichen.

Es gibt weitere Einflussfaktoren, die dazu führen können, dass die Erwartungen an die NGTs zu hoch gegriffen sind: Die mithilfe der NGTs herbeigeführten Veränderungen resultieren in vielen Fällen in extremen Ausformungen von Züchtungsmerkmalen, die oft mit ungewollten Nebenwirkungen („trade-offs“) einhergehen.

Dies zeigt sich auch am Beispiel der Pflanzen, die bereits auf dem Markt verfügbar sind: Beispielsweise erbrachten NGT-Sojabohnen mit verändertem Ölgehalt der Firma Calyxt (in den USA zugelassen) nur reduzierte Erträge und setzten sich wohl deswegen auf dem Markt nicht durch.²¹ Weiterhin können NGT-Tomaten mit erhöhtem Gehalt des Neurotransmitters γ -Aminobuttersäure (GABA) (in Japan zugelassen) in ihrer Widerstandskraft gegenüber Stressfaktoren wie Pflanzenkrankheiten oder auch dem Klimawandel beeinträchtigt sein. Bedingt werden diese ungewollten Effekte durch die multifunktionelle Rolle der betroffenen Gene und Stoffwechselwege (Nonaka et al., 2016; Santamaría-Hernando et al., 2022).

Weitere Beispiele betreffen verschiedene NGT-Anwendungen, die sich noch im Versuchsstadium befinden: In einer Studie mit (hexaploidem) Weizen wurden mit Neuer Gentechnik mehrere Genkopien ausgeschaltet, die die Anfälligkeit für Mehltau begünstigen (Wang et al., 2014). Neben der Resistenz gegen Mehltau wurden dabei aber auch unbeabsichtigte Effekte wie z.B. Blattchlorosen (Ausbleichungen) ausgelöst, die bei den herkömmlichen Mutageneseverfahren nicht auftraten (Acevedo-Garcia et al., 2017). Im Zusammenhang mit dem Verlust der betreffenden Genfunktionen werden auch Probleme wie z.B. Wachstumsabweichungen, beschleunigte Seneszenz, induzierte Nekrosen oder die erhöhte Anfälligkeit für andere Pilzkrankheiten beschrieben, die durch die weitere Forschung eventuell behoben werden können (Li, et al. 2022; Spanu, 2022). Dabei ist aber zu befürchten, dass bei NGT-Pflanzen ggf. nicht nur die Resistenz gegen Mehltau, sondern auch diese unerwünschten Nebenwirkungen deutlicher ausgeprägt sind, als bei konventionell gezüchteten Pflanzen. Mit Hilfe der Gen-Schere CRISPR/Cas gelang es jedenfalls, die Funktion aller Genkopien, die für die Mehltau-Anfälligkeit bei Weizen verantwortlich sind, auszuschalten, während dies bei konventionellen Verfahren nur unvollständig möglich war (siehe Kawall, 2021b). Es bleibt abzuwarten, ob und wie beabsichtigte Veränderungen und Nebenwirkungen hier in eine geeignete Balance gebracht werden können.

Ähnliche Probleme zeigen sich auch bei einem weiteren Beispiel: In England wird an Gentechnik-Weizen geforscht, der beim Backen weniger krebserregendes Acrylamid bilden soll. Mit Hilfe der Gen-Schere CRISPR/Cas wurde dafür ein bestimmtes Gen ausgeschaltet, das für die Bildung der Aminosäure Asparagin und letztlich auch für die Bildung von Acrylamid beim Backen ausschlaggebend ist. Asparagin ist aber auch für die Keimfähigkeit, das Wachstum der Pflanzen, ihre Stresstoleranz und die Abwehr von Pflanzenkrankheiten wichtig. Mithilfe der Gen-Schere CRISPR/Cas gelang es tatsächlich, den Gehalt an frei verfügbarem Asparagin in den

²¹ <https://www.bizjournals.com/twincities/news/2022/09/22/calxyt-considering-sale-of-assets-merger.html>

6. Welche Erwartungen an die Neue Gentechnik sind realistisch?

Körnern um bis zu 90 Prozent zu vermindern. Dafür wurde die Funktion von mehreren Kopien (Allele) eines Gens (TaASN2/Asparaginsynthetase) blockiert. In der Folge waren allerdings die Samen von einigen Varianten dieses CRISPR-Weizens fast nicht mehr keimfähig (Raffan et al., 2021). Erste Ergebnisse eines Freilandversuchs zeigen außerdem Veränderungen bzgl. des Gewichts und der Anzahl der Körner (Raffen et al. 2023).

Diese Beispiele zeigen, dass mit Hilfe der Neuen Gentechnik bei Pflanzen und Tieren extreme Eigenschaften erzeugt werden können, die über das hinausgehen, was mit konventioneller Zucht erreicht wird. Dabei können unbeabsichtigte Neben- und Wechselwirkungen im komplexen Netzwerk der Gene, Proteine und anderer biologisch aktiver Moleküle auch dann eintreten, wenn der Eingriff ins Erbgut gezielt und präzise ist. Durch diese oft ‚zwangsläufig‘ auftretenden Nebenwirkungen kann der Zuchtfortschritt erheblich verlangsamt werden und sich bestimmte Zuchtziele als nicht realisierbar erweisen. Kurz gesagt bieten die NGT-Verfahren ein großes Potential für genetische Veränderungen, aber es ist nicht einfach, dieses Potential auch in tatsächliche Vorteile umzusetzen. In der Folge lässt sich die notwendige Zeitspanne zwischen einer gentechnischen Veränderung bis zum Inverkehrbringen des Endprodukts nicht genau vorhersagen. Dagegen hatte beispielsweise die US Firma Calyxt im Jahr 2018 in einer Präsentation für InvestorInnen damit geworben, dass es generell nur drei bis sechs Jahre dauern würde, um Pflanzen mit neuen Eigenschaften zu entwickeln und auf dem Markt zu platzieren.²² Seitdem ist es der Firma jedoch nicht gelungen, neue NGT-Pflanzen zur Marktreife zu bringen.

Tatsächlich auf den Markt gebracht wurden (abgesehen von der gescheiterten Calyxt-Soja in den USA, s.o.) bisher lediglich drei NGT-Produkte in Japan: Die Tomate mit erhöhtem GABA-Gehalt,²³ deren Verzehr angeblich blutdrucksenkende Wirkung hat (s.o.), sowie zwei Fische (Seebrasse und Kugelfisch), die schneller zunehmen sollen.^{24, 25} Auch bei den Fischen zeigen sich ungewollte Nebenwirkungen der per Gentechnik eingeführten Merkmale wie eine Fehlstellung der Wirbelsäule (Kishimoto et al., 2018).

Diese Ausgleichsreaktionen (‚trade-offs‘) treten also häufig zusammen mit den durch die NGTs erzeugten Eigenschaften auf und gehen oft über das hinaus, was aus konventioneller Züchtung zu erwarten wäre. Um diese Pflanzen oder Tiere wieder ‚ins Gleichgewicht‘ zu bringen, muss im Vergleich zur konventionellen Züchtung ggf. mehr Zeit in die Entwicklung eines Merkmals investiert werden. Zudem stellt sich die Frage, ob Kreuzungen von NGT-Pflanzen oder -Tieren nicht dazu führen, dass deren unerwünschten Nebenwirkungen in den nächsten Generationen akkumulieren und sich weiter verstärken (siehe auch Testbiotech, 2022).

Wird die Neue Gentechnik von Forschung und Politik im Vergleich zur konventionellen Zucht mit Vorrang behandelt, wie es u.a. zur Erreichung der Ziele innerhalb des Europäischen „Green Deal“ und der „FarmTo Fork“ Strategie vorgeschlagen wird, könnten dadurch dringend benötigte züchterische Lösungen, die tatsächlich echte Vorteile hervorbringen, verlangsamt oder sogar verhindert werden.

Auch die Eidgenössische Ethikkommission für die Biotechnologie im Ausserhumanbereich (EKAH) in der Schweiz schätzt das tatsächliche Potenzial von Pflanzen und Tieren aus Neuer Gentechnik sehr zurückhaltend ein (EKAH, 2022). In ihrem Bericht zur Rolle der Biotechnologie in der Landwirtschaft in der Schweiz kommt sie zu der Schlussfolgerung, dass die Chancen, mit den neuen Gentechnikverfahren bis 2050 substanziell zur nötigen Emissionsreduktion beizutragen, sehr gering sind. Eine realistische Einschätzung der Chancen technologischer Optionen und eine transparente und ehrliche Kommunikation sollte nach ihrer Ansicht vermeiden, dass der Eindruck entsteht, Technologien wie die Neue Gentechnik würden die entscheidenden Beiträge leisten können, um die erforderlichen Transformationsprozesse zur Einhaltung der Klimaziele zu gestalten.

22 http://www.calyxt.com/wp-content/uploads/2018/06/Calyxt-Investor-Presentation_May-2018.pdf

23 https://euginius.eu/euginius/pages/gmo_detail.jsf:gmoname=GE-high+GABA+Tomato

24 https://euginius.eu/euginius/pages/gmo_detail.jsf:gmoname=GE-mstn+red+sea+bream

25 https://euginius.eu/euginius/pages/gmo_detail.jsf:gmoname=GE-lepr+tiger+pufferfish

7. Schlussfolgerungen und Empfehlungen

Dieser Bericht zeigt, dass sich der Anbau transgener Pflanzen sowohl bzgl. der wirtschaftlichen und ökologischen Auswirkungen, als auch der systemischen Auswirkungen auf die Lebensmittelproduktion häufig als nicht nachhaltig erwiesen hat. Bei der Einführung transgener Pflanzen standen nicht Problemlösungen im Vordergrund, die am verträglichsten für die Umwelt sind und zur Stabilität und Widerstandsfähigkeit der Öko- und Lebensmittelsysteme beitragen. Vielmehr wurden wirtschaftliche Interessen wie die Steigerung der Effizienz und/oder des Profits zum eigentlichen Entscheidungskriterium gemacht.

Ähnliche Probleme könnten mit dem Einsatz der Neuen Gentechnik in der Landwirtschaft verbunden sein. Dieser wird oft mit Nachhaltigkeitsaspekten beworben, oder damit begründet, dass angesichts des Klimawandels neue Lösungen benötigt werden, um die Welternährung zu sichern. Doch neue Lösungen können nicht als nachhaltig gelten, wenn ihr Einsatz dazu führen kann, dass die Ökosysteme durch massenhafte Freisetzen nicht angepasster Gentechnik-Organismen überlastet werden, Risiken unbemerkt in Lebensmitteln akkumulieren, Züchtung durch Patente behindert wird und die Interessen der VerbraucherInnen missachtet werden. Gleichzeitig erscheinen viele Erwartungen an die möglichen Vorteile von Pflanzen und Tieren aus Neuer Gentechnik als viel zu hoch gegriffen.

Schon bald könnte eine große Anzahl von NGT-Organismen zahlreicher Arten mit einer großen Bandbreite unterschiedlicher Eigenschaften innerhalb kurzer Zeit in die Umwelt entlassen werden. Viele von ihnen könnten sich unkontrolliert ausbreiten und es ist zu erwarten, dass sowohl zwischen den verschiedenen NGT-Organismen als auch mit deren Umwelt komplexe Wechselwirkungen auftreten werden.

Wichtig ist es deswegen, die Kontrolle über Freisetzungen von NGT-Organismen zu behalten. Vor diesem Hintergrund sieht Testbiotech die Notwendigkeit, die Art und Menge der Organismen, die man ggf. in die Umwelt freisetzt, strikt zu kontrollieren und zu begrenzen, um insbesondere unkontrollierte Ausbreitungen zu verhindern. Dazu müssen alle gentechnisch veränderten Organismen auch in Zukunft einer Zulassungsprüfung unterliegen und nach etwaigem Inverkehrbringen rückverfolgbar sein.

Die Konzepte von Natur- und Umweltschutz basieren zu großen Teilen auf dem Prinzip der Vermeidung von Eingriffen. Diese müssen auch im Bereich der Gentechnik zur Anwendung kommen. Grundsätzliche Vorbehalte gegen die Freisetzung gentechnisch veränderter Organismen müssen in Zukunft mehr Gewicht erhalten. Vor diesem Hintergrund und gemäß dem Vorsorgeprinzip sollte die EU-Gentechnikregulierung durch eine Aktualisierung der Standards für die Risikobewertung und die Einführung eines ergänzenden Rahmens zur Technikfolgenabschätzung angepasst werden. Das Ziel der vorausschauenden Technikfolgenabschätzung sollte dabei sein, die potenziellen Vor- und Nachteile von NGT-Anwendungen – einschließlich der ökologischen und sozio-ökonomischen Gesamtauswirkungen – zu untersuchen, um infolgedessen leere Versprechungen von realistischen Erwartungen unterscheiden zu können. Dadurch kann die Politik bzw. die EU-Kommission in ihrer Rolle als Risikomanager in die Lage versetzt werden, die Art und die Anzahl von möglichen Freisetzungen gentechnisch veränderter Organismen wirksam zu kontrollieren und zu begrenzen.

Dazu bedarf es transparenter, zuverlässiger und praktikabler Kriterien, um faktengestützte Entscheidungen über die Nachhaltigkeit und den potenziellen Nutzen der Neuen Gentechnik in der Landwirtschaft treffen zu können. Nur so könnte es möglich gemacht werden, negative Auswirkungen auf die Züchtung, die Landwirtschaft und die Erzeugung von Lebensmitteln rechtzeitig zu erkennen, und zu vermeiden, dass angebliche Lösungen durch die Neue Gentechnik vielmehr zu neuen Problemen für die Umwelt, die Ökosysteme und die künftigen Generationen werden.

Literaturverzeichnis

- Agapito-Tenfen, S., Lopez, F.R., Mallah, N., Abou-Slemayne, G., Trtikova, M., Nodari, R.O., Wickson, F.** (2017) Transgene flow in Mexican maize revisited: Socio-biological analysis across two contrasting farmer communities and seed management systems. *Ecol Evol* 7: 9461–9472. <https://doi.org/10.1002/ece3.3415>
- Agapito-Tenfen, S.Z. & Wickson, F.** (2018) Challenges for transgene detection in landraces and wild relatives: learning from 15 years of debate over GM maize in Mexico. *Biodivers Conserv* 27: 539–566. <https://doi.org/10.1007/s10531-017-1471-0>
- ALLEA** (2020) Genome Editing for Crop Improvement. Symposium summary. Berlin. <https://doi.org/10.26356/gen-editing-crop>
- Almeida, M.F., Tavares, C.S., Araújo, E.O., Picanço, M.C., Oliveira, E.E., Pereira E.J.G.** (2021) Plant resistance in some modern soybean varieties may favor population growth and modify the stylet penetration of *Bemisia tabaci* (*Hemiptera: Aleyrodidae*). *J Econ Entomol* 114(2): 970–978. <https://doi.org/10.1093/jee/toab008>
- Aono, M., Wakiyama, S., Nagatsu, M., Nakajima, N., Tamaoki, M., Kubo, A., Saji, H.** (2006) Detection of feral transgenic oilseed rape with multiple-herbicide resistance in Japan. *Environ Biosafety Res*, 5(2):77–87. <https://doi.org/10.1051/ebr:2006017>
- Acevedo-Garcia, J., Spencer, D., Thieron, H., Reinstädler, A., Hammond-Kosack, K., Phillips, A.L., Panstruga, R.** (2017) mlo-based powdery mildew resistance in hexaploid bread wheat generated by a non-transgenic TILLING approach. *Plant Biotechnol J* 15(3): 367–378. <https://doi.org/10.1111/pbi.12631>
- Barbour, M.A., Kliebenstein, D.J., Bascompte, J.** (2022) A keystone gene underlies the persistence of an experimental food web. *Science* 376(6588): 70–73. <https://doi.org/10.1126/science.abf2232>
- 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://doi.org/10.1186/s12302-020-00301-0>
- Bauer-Panskus, A., Breckling B., Hamberger S., Then C.** (2013) Cultivation-independent establishment of genetically engineered plants in natural populations: current evidence and implications for EU regulation, *Environ Sci Eur* 25: 34 <https://doi.org/10.1186/2190-4715-25-34>
- Belfield, E.J., Ding, Z.J., Jamieson, F.J.C., Visscher, A.M., Zheng, S.J., Mithani, A., Harberd, N.P.** (2018) DNA mismatch repair preferentially protects genes from mutation. *Genome Res* 28(1): 66–74. <https://doi.org/10.1101/gr.219303.116>
- Benbrook, C.M.** (2012), Impacts of genetically engineered crops on pesticide use in the U.S. -- the first sixteen years *Environ Sci Eur* 24: 24. <https://doi.org/10.1186/2190-4715-24-24>
- Beres, Z.T.** (2019) Ecological and evolutionary implications of glyphosate resistance in *Conyza canadensis* and *Arabidopsis thaliana*. Dissertation presented in partial fulfillment of the requirements for the degree Doctor of Philosophy in the graduate school of the Ohio State University. http://rave.ohiolink.edu/etdc/view?acc_num=osui555600547328876
- Bernardi, D., Salmeron, E., Horikoshi, R.J., Bernardi, O., Dourado, P.M., Carvalho, R.A., Martinelli, S., Head, G.P., Omoto, C.** (2015) Cross-resistance between Cry1 proteins in fall armyworm (*Spodoptera frugiperda*) may affect the durability of current pyramided Bt maize hybrids in Brazil. *PLoS ONE* 10(10): e0140130. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0140130>
- BfN** (2022) Gentechnik, Naturschutz und biologische Vielfalt: Grenzen der Gestaltung. Positionspapier. <https://doi.org/10.19217/pos222>
- Binimelis, R., Myhr, A.I.** (2016) Inclusion and Implementation of Socio-Economic Considerations in GMO Regulations: Needs and Recommendations. *Sustainability* 8: 62. <https://doi.org/10.3390/su8010062>

- Biswas, S., Tian, J., Li, R., Chen, X., Luo, Z., Chen, M., Zhao, X., Zhang, D., Persson, S., Yuan, Z., Shi, J.** (2020) Investigation of CRISPR/Cas9-induced SD1 rice mutants highlights the importance of molecular characterization in plant molecular breeding. *J Genet Genomics* 47(5): 273-280. <https://doi.org/10.1016/j.jgg.2020.04.004>
- Bollinedi, H., Dhakane-Lad, J., Gopala-Krishnan, S., Bhowmick, P.K., Prabhu, K.V., Singh, N.K., Singh, A.K.** (2019) Kinetics of β -carotene degradation under different storage conditions in transgenic Golden Rice® lines. *Food Chem* 278: 773-779. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.11.121>
- Böschen, S., Grunwald, A., Krings, B.J., Rösch, C.** (2021) Technikfolgenabschätzung: Handbuch für Wissenschaft und Praxis. <https://doi.org/10.5771/9783748901990>
- Bonny, S.** (2017) Corporate concentration and technological change in the global seed industry. *Sustainability* 9: 1632. <https://doi.org/10.3390/su9091632>
- Bortolotto, O.C., Silva, G.V., de Freitas Bueno, A., Pomari, A.F., Martinelli, S., Head, G.P., Carvalho, R.A., Barbosa, G.C.** (2014) Development and reproduction of *Spodoptera eridania* (*Lepidoptera: Noctuidae*) and its egg parasitoid *Telenomus remus* (*Hymenoptera: Platygasteridae*) on the genetically modified soybean (Bt) MON 87701xMON 89788. *Bull Entomol Res* 104(6): 724-730. <https://doi.org/10.1017/S0007485314000546>
- 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. <https://doi.org/10.1104/pp.17.00426>
- Brookes, G. & Baarfoot, P.** (2014) Key environmental impacts of global genetically modified (GM) crop use 1996–2011. *GM Crops & Food* 4(2): 109-119. <https://doi.org/10.4161/gmcr.24459>
- Brookes, G.** (2019) Twenty-one years of using insect resistant (GM) maize in Spain and Portugal: farm-level economic and environmental contributions. *GM Crops & Food* 10(2): 90-101. <https://doi.org/10.1080/21645698.2019.1614393>
- Brookes, G. & Baarfoot, P.** (2020) Environmental impacts of genetically modified (GM) crop use 1996–2018: impacts on pesticide use and carbon emissions. *GM Crops & Food* 11(4): 215-241. <https://doi.org/10.1080/21645698.2020.1773198>
- Brookes, G.** (2022a) Farm income and production impacts from the use of genetically modified (GM) crop technology 1996-2020. *GM Crops & Food* 13(1): 171-195. <https://doi.org/10.1080/21645698.2022.2105626>
- Brookes, G.** (2022b) Genetically Modified (GM) Crop Use 1996–2020: Impacts on Carbon Emissions. *GM Crops & Food*, 13:1, 242-261. <https://doi.org/10.1080/21645698.2022.2118495>
- Brookes, G.** (2022c) Genetically Modified (GM) Crop Use 1996–2020: Environmental Impacts Associated with Pesticide Use Change. *GM Crops & Food* 13(1): 262-289. <https://doi.org/10.1080/21645698.2022.2118497>
- Catacora-Vargas, G., Binimelis, R., Myhr, A. I., Wynne, B.** (2018) Socio-economic research on genetically modified crops: a study of the literature. *Agric Human Values* 35: 489-513. <https://doi.org/10.1007/s10460-017-9842-4>
- CBAN** (2019) GM Contamination in Canada: The failure to contain living modified organisms – Incidents and impacts. <https://cban.ca/wp-content/uploads/GM-contamination-in-canada-2019.pdf>
- Cheke, R.A.** (2018) New pests for old as GMOs bring on substitute pests. *PNAS*, 115(33): 8239-8240. <https://doi.org/10.1073/pnas.1811261115>
- Clapp, J.** (2021) The problem with growing corporate concentration and power in the global food system. *Nat Food* 2: 404-408. <https://doi.org/10.1038/s43016-021-00297-7>
- Coupe, R.H. & Capel, P.D.** (2016) Trends in pesticide use on soybean, corn and cotton since the introduction of major genetically modified crops in the United States. *Pest Manag Sci* 72: 1013-1022. <https://doi.org/10.1002/ps.4082>

- Darlington, M., Reinders, J.D., Sethi, A., Lu, A.L., Ramaseshadri, P., Fischer, J.R., Boeckman, C.J., Petrick, J.S., Roper, J.M., Narva, K.E., Vélez, A.M.** (2022) RNAi for western corn rootworm management: lessons learned, challenges, and future directions. *Insects* 13: 57. <https://doi.org/10.3390/insects13010057>
- Dyer, G.A., Serratos-Hernández, J.A., Perales, H.R., Gepts, P., Piñeyro-Nelson, A., Chávez, A., Noé Salinas-Arreortua, N., Yúnez-Naude, A., Taylor, J.E., Alvarez-Buylla, E.R.** (2009) Dispersal of Transgenes through Maize Seed Systems in Mexico. *PLoS ONE* 4(5): e5734. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0005734>
- Eckerstorfer, M.F., Dolezel, M., Heissenberger, A., Miklau, M., 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. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2019.00031>
- Eckerstorfer, M.F., Grabowski, M., Lener, M., Engelhard, M., Simon, S., Dolezel, M., Heissenberger, A., Lüthi, C.** (2021) Biosafety of genome editing applications in plant breeding: considerations for a focused case-specific risk assessment in the EU. *BioTech*, 10(3): 10. <https://doi.org/10.3390/biotech10030010>
- EEA, European Environment Agency** (2001) Late Lessons from Early Warnings: The Precautionary Principle 1896–2000. Environment Issue Report, no. 22. (Harremoes P, Gee D, MacGarvin M, Stirling A, Keys J, Wynne B, et al., eds). Copenhagen: European Environment Agency, https://www.eea.europa.eu/publications/environmental_issue_report_2001_22/Issue_Report_No_22.pdf
- EKAH** (2022) Klimawandel, Landwirtschaft und die Rolle der Biotechnologie. https://www.ekah.admin.ch/inhalte/dateien/EKAH-Bericht_Klimawandel_Landwirtschaft_Biotechnologie_2022_DE.pdf
- Eriksson, D., Custers, R., Edvardsson Bjornberg, K, Hansson, S.O., Purnhagen, K., Qaim, M., Romeis, J., Schiemann, J., Schleissing, S., Tosun, J., Visser, R.G.F.** (2020) Options to reform the European Union legislation on GMOs: scope and definitions. *Trends Biotechnol* 38(3): 231-234. <https://doi.org/10.1016/j.tibtech.2019.12.002>
- ETC Group** (2022) Food Barons 2022 - Crisis Profiteering, Digitalization and Shifting Power. <https://www.etcgroup.org/content/food-barons-2022>
- EU-Kommission** (2021) Study on the status of new genomic techniques under Union law and in light of the Court of Justice ruling in Case C-528/16, Commission staff working document, SWD(2021) 92 final. https://ec.europa.eu/food/plant/gmo/modern_biotech/new-genomic-techniques_en
- EU-Kommission** (2022) Public consultation „Legislation for plants produced by certain new genomic techniques“ <https://www.testbiotech.org/node/3033>; Ergebnis der Konsultation: https://ec.europa.eu/info/law/better-regulation/have-your-say/initiatives/13119-Legislation-for-plants-produced-by-certain-new-genomic-techniques/public-consultation_en
- Fang, J., Nan, P., Gu, Z., Ge, X., Feng, Y.-Q., Lu, B.-R.** (2018) Overexpressing exogenous 5-nolpyruvylshikimate-3-phosphate synthase (EPSPS) genes increases fecundity and auxin content of transgenic arabidopsis plants. *Front Plant Sci* 9:233. <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.00233>
- FAO** (2017) Sustainable Agriculture for Biodiversity – Biodiversity for Sustainable Agriculture. Rome. <https://www.fao.org/3/I6602E/i6602e.pdf>
- Fernandes, G.B., Silva, A.C.d.L., Maronhas, M.E.S., Santos, A.d.S.d., Lima, P.H.C.** (2022) Transgene flow: challenges to the on-farm conservation of maize landraces in the Brazilian semi-arid region. *Plants* 11: 603, <https://doi.org/10.3390/plants11050603>
- Filler Hayut, S., Melamed Bessudo, C., Levy, A.A.** (2017) Targeted recombination between homologous chromosomes for precise breeding in tomato. *Nat Commun* 8: 15605. <https://doi.org/10.1038/ncomms15605>
- Finger, R., El Benni, N., Kaphengst, T., Evans, C., Herbert, S., Lehmann, B., Morse, S., Stupak, N.** (2011) A meta analysis on farm-level costs and benefits of GM crops. *Sustainability*, 3(5): 743-762. <https://doi.org/10.3390/su3050743>

- Fischer, K., Ekener-Petersen, E., Rydhmer, L., Björnberg, K.E.** (2015) Social impacts of GM crops in agriculture: a Systematic literature review. *Sustainability* 7: 8598-8620. <https://doi.org/10.3390/su7078598>
- Fok, M., Gouse, M., Hofs, J.L., Kirsten, J.** (2007) Contextual appraisal of GM cotton diffusion in South Africa. *Life Sci Int J* 1: 468-482. <https://shs.hal.science/halshs-00176546>
- Forsbach, A., Schubert, D., Lechtenberg, B., Gils, M., Schmidt, R.** (2003) A comprehensive characterization of single-copy T-DNA insertions in the *Arabidopsis thaliana* genome. *Plant Mol Biol* 52(1): 161-176. <https://doi.org/10.1023/a:1023929630687>
- Frieß, J.L., von Gleich, A., Giese, B.** (2019) Gene drives as a new quality in GMO releases – a comparative technology characterization. *PeerJ* 7: e6793. <https://doi.org/10.7717/peerj.6793>
- Frigola, J., Sabarinathan, R., Mularoni, L., Muiños, F., Gonzalez-Perez, A., López-Bigas, N.** (2017) Reduced mutation rate in exons due to differential mismatch repair. *Nat Genet* 49: 1684-1692. <https://doi.org/10.1038/ng.3991>
- Gao, C.** (2018) The future of CRISPR technologies in agriculture. *Nat Rev Mol Cell Biol* 19: 275-276. <https://doi.org/10.1038/nrm.2018.2>
- GAO** (2021) technology assessment Design Handbook. United States Government Accountability Office, GAO-21-347G. <https://www.gao.gov/products/gao-21-347g>
- Gassmann, A.J.** (2021) Resistance to Bt maize by western corn rootworm: Effects of pest biology, the pest-crop interaction and the agricultural landscape on resistance. *Insects* 12(2): 136. <https://doi.org/10.3390/insects12020136>
- Gelvin, S.B.** (2017) Integration of Agrobacterium T-DNA into the plant genome. *Annu Rev Genet*, 51: 195-217. <https://doi.org/10.1146/annurev-genet-120215-035320>
- Gianessi, L.P., & Carpenter J.E.** (2000) Agricultural Biotechnology: Benefits of transgenic soybeans, National Center for Food and Agricultural Policy, NCFAP. www.iatp.org/files/Agricultural_Biotechnology_Benefits_of_Transge.pdf
- Global 2000** (2022) EXPOSED - How biotech giants use patents and new GMOs to control the future of food. <https://www.global2000.at/publikationen/neue-gentechnik-patente>
- Glover, D.** (2010) Is Bt Cotton a pro-poor technology? A review and critique of the empirical record. *J Agrar Chang* 10: 482-509. <https://doi.org/10.1111/j.1471-0366.2010.00283.x>
- Goold, H.D., Wright, P., Hailstones, D.** (2018) Emerging opportunities for synthetic biology in agriculture. *Genes* 9(7): 341. <https://doi.org/10.3390/genes9070341>
- Gutierrez, A.P., Ponti, L., Kranthi, K.R., Baumgärtner, J., Kenmore, P.E., Gilioli, G., Boggia, A., Cure, J.R., Rodríguez, D.** (2020) Bio-economics of Indian hybrid Bt cotton and farmer suicides. *Environ Sci Eur* 32: 139. <https://doi.org/10.1186/s12302-020-00406-6>
- Halstead, M.M., Kern, C., Saelao, P., Wang, Y., Chanthavixay, G., Medrano, J.F., Van Eenennaam, A.L., Korf, I., Tuggle, C.K., Ernst, C.W., Zhou, H., Ross, P.J.** (2020) A comparative analysis of chromatin accessibility in cattle, pig, and mouse tissues. *BMC Genomics*, 21: 698. <https://doi.org/10.1186/s12864-020-07078-9>
- Heap, I.** (2014) Global perspective of herbicide-resistant weeds. *Pest Manag Sci* 70: 1306-1315. <https://doi.org/10.1002/ps.3696>
- Heap, I. & Duke, S.O.** (2018), Overview of glyphosate-resistant weeds worldwide. *Pest Manag Sci* 74: 1040-1049. <https://doi.org/10.1002/ps.4760>
- 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. *Elementa* 9(1): 00086. <https://doi.org/10.1525/elementa.2021.00086>

- Horikoshi, R.J., Dourado, P.M., Berger, G.U., de S. Fernandes, D., Omoto, C., Willse, A., Martinelli, S., Head, G.P., Corrêa, A.S.** (2021) Large-scale assessment of lepidopteran soybean pests and efficacy of Cry1Ac soybean in Brazil. *Sci Rep* 11(1): 15956. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-95483-9>
- Howard, P.H.** (2009) Visualizing consolidation in the global seed industry: 1996–2008. *Sustainability* 1: 1266–1287. <https://doi.org/10.3390/su1041266>
- Howard, P.H.** (2015) Intellectual property and consolidation in the seed industry. *Crop Sci* 55: 2489. <https://doi.org/10.2135/cropsci2014.09.0669>
- Huang, Y. & Li, G.-M.** (2018) DNA mismatch repair preferentially safeguards actively transcribed genes. *DNA Repair* 71: 82–86. <https://doi.org/10.1016/j.dnarep.2018.08.010>
- IHS Markit** (2020) Game changers: gene-editing technologies and their applications 2020. <https://cdn.ihsmarkit.com/www/pdf/0320/202002-GeneEditingTech-Agrow-LD-Sample-Version001-pdf.pdf>
- Iversen, M., Grønsberg, I.M., van den Berg, J., Fischer, K., Aheto, D.W., Böhn, T.** (2014) Detection of transgenes in local maize varieties of small-scale farmers in Eastern Cape, South Africa. *PLoS ONE* 9(12): e116147. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0116147>
- Jakka, S.R.K., Shrestha, R.B., Gassmann, A.J.** (2016) Broad-spectrum resistance to *Bacillus thuringiensis* toxins by western corn rootworm (*Diabrotica virgifera virgifera*). *Sci Rep* 6: 27860. <https://doi.org/10.1038/srep27860>
- Jefferson, O.A., Lang, S., Williams, K., Koellhofer, D., Ballagh, A., Warren, B., Schellberg, B., Sharma, R., Jefferson, R.** (2021) Mapping CRISPR-Cas9 public and commercial innovation using The Lens institutional toolkit. *Transgenic Res* 30: 585–599. <https://doi.org/10.1007/s11248-021-00237-y>
- Jost, P., Shurley, D., Culpepper, S., Roberts, P., Nichols, R., Reeves, J. and Anthony, S.** (2008) Economic Comparison of transgenic and nontransgenic cotton production systems in Georgia. *Agron J* 100: 42–51. <https://doi.org/10.2134/agronj2006.0259>
- Jonas, H.** (1979): Das Prinzip Verantwortung. Versuch einer Ethik für die technologische Zivilisation. Frankfurt.
- Jones, D.M., Wells, R., Pullen, N., Trick, M., Irwin, J.A., Morris, R.J.** (2018) Spatio-temporal expression dynamics differ between homologues of flowering time genes in the allopolyploid *Brassica napus*. *Plant J* 96: 103–118. <https://doi.org/10.1111/tpj.14020>
- JRC** (2021) Current and future market applications of new genomic techniques. Joint Research Centre, EUR 30589 EN, Publications Office of the European Union, Luxembourg, ISBN 978-92-76-30206-3, <https://doi.org/10.2760/02472>
- Jupe, F., Rivkin, A.C., Michael, T.P., Zander, M., Motley, S.T., Sandoval, J.P., Slotkin, R.K., Chen, H., Castanon, R., Nery, J.R., Ecker, J.R.** (2019) The complex architecture and epigenomic impact of plant T-DNA insertions. *PLoS Genet* 15(1): e1007819. <https://doi.org/10.1371/journal.pgen.1007819>
- Kaphengst, T., El Benni, N., Evans C., Finger R., Herbert S., Morse S., Stupak N.** (2010) Assessment of the economic performance of GM crops worldwide. Report to the European Commission. https://www.researchgate.net/publication/337497990_Final_Report_Assessment_of_the_economic_performance_of_GM_crops_worldwide
- Kawall, K.** (2019) New possibilities on the horizon: genome editing makes the whole genome accessible for changes. *Front Plant Sci* 10: 525. <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.00525>
- Kawall, K., Cotter J., Then C.** (2020) Broadening the GMO risk assessment in the EU for genome editing technologies in agriculture. *Environ Sci Eur* 32: 106. <https://doi.org/10.1186/s12302-020-00361-2>

- Kawall, K.** (2021a) Genome edited *Camelina sativa* with a unique fatty acid content and its potential impact on ecosystems, *Environ Sci Eur* 33: 38. <https://doi.org/10.1186/s12302-021-00482-2>
- Kawall, K.** (2021b) The generic risks and the potential of SDN-1 applications in crop plants. *Plants* 10(11): 2259. <https://doi.org/10.3390/plants10112259>
- Khajuria, C., Ivashuta, S., Wiggins, E., Flagel, L., Moar, W., Pleau, M., Miller, K., Zhang, Y., Ramaseshadri, P., Jiang, C., Hodge, T., Jensen, P., Chen, M., Gowda, A., McNulty, B., Vazquez, C., Bolognesi, R., Haas, J., Head, G., Clark, T.** (2018) Development and characterization of the first dsRNA-resistant insect population from western corn rootworm, *Diabrotica virgifera virgifera* LeConte. *PLoS ONE* 13(5): e0197059. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0197059>
- Kishimoto, K., Washio, Y., Yoshiura, Y., Toyoda, A., Ueno, T., Fukuyama, H., Kato, K., Kinoshita, M.** (2018) Production of a breed of red sea bream *Pagrus major* with an increase of skeletal muscle mass and reduced body length by genome editing with CRISPR/Cas9. *Aquaculture* 495: 415-427. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2018.05.055>
- Klümper, W., Qaim, M.** (2014) A meta-analysis of the impacts of genetically modified crops. *PLoS ONE* 9(11): e111629. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0111629>
- Kovak, E., Blaustein-Rejto, D., Qaim, M.** (2022) Genetically modified crops support climate change mitigation. *Trends Plant Sci* 27(7): 627-629. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2022.01.004>
- Kranthi, K.R., Stone, G.D.** (2020) Long-term impacts of Bt cotton in India. *Nat Plants* 6: 188-196. <https://doi.org/10.1038/s41477-020-0615-5>
- Laforest, M., Martin, S., Soufiane, B., Bisailon, K., Maheux, L., Fortin, S., James, T., Miville, D., Marcoux, A., Simard, M.J.** (2022) Distribution and genetic characterization of bird rape mustard (*Brassica rapa*) populations and analysis of glyphosate resistance introgression. *Pest Manag Sci*, 78: 5471-5478. <https://doi.org/10.1002/ps.7170>
- Ledford, H.** (2015) CRISPR, the disruptor. *Nature* 522: 20-24. <https://doi.org/10.1038/522020a>
- Lentzos, F., Rybicki, E.P., Engelhard, M., Paterson, P., Sandholtz, W.A., Reeves, G.** (2022) Eroding norms over release of self-spreading viruses. *Science* 375(6576): 31-33. <https://doi.org/10.1126/science.abj5593>
- Leopoldina, Deutsche Forschungsgemeinschaft und Union der deutschen Akademien der Wissenschaften** (2019) Wege zu einer wissenschaftlich begründeten, differenzierten Regulierung genomeditierter Pflanzen in der EU. Halle (Saale). <https://www.leopoldina.org/publikationen/detailansicht/publication/wege-zu-einer-wissenschaftlich-begrunden-differenzierten-regulierung-genomeditierter-pflanzen-in-der-eu-2019/>
- Li, S., Lin, D., Zhang, Y., Deng, M., Chen, Y., Lv, B., Li, B., Lei, Y., Wang, Y., Zhao, L., Liang, Y., Liu, J., Chen, K., Liu, Z., Xiao, J., Qui, J-L., Gao, C.** (2022) Genome-edited powdery mildew resistance in wheat without growth penalties. *Nature* 602: 455-460. <https://doi.org/10.1038/s41586-022-04395-9>
- Lin, T., Zhu, G., Zhang, J., Xu, X., Yu, Q., Zheng, Z., Zhang, Z., Lun, Y., Li, S., Wang, X., Zhang, Y., Wang, A., Zhang, Y., Lin, K., Li, C., Xiong, G., Xue, Y., Mazzucato, A., Causse, M., Fei, Z., Giovannoni, J.J., Vchetalat, R.T., Zamir, D., Städler, T., Li, J., Ye, Z., Du, Y., Huang, S.** (2014) Genomic analyses provide insights into the history of tomato breeding. *Nat Genet* 46: 1220-1226. <https://doi.org/10.1038/ng.3117>
- Liu, J., Nannas, N.J., Fu, F-F., Shi, J., Aspinwall, B., Parrott, W.A., Dawe, R.K.** (2019) Genome-scale sequence disruption following biolistic transformation in rice and maize. *Plant Cell* 31: 368-383. <https://doi.org/10.1105/tpc.18.00613>
- Ludwick, D.C., Meihls, L.N., Ostlie, K.R., Potter, B.D., French, L., Hibbard, B.E.** (2017) Minnesota field population of western corn rootworm (Coleoptera: Chrysomelidae) shows incomplete resistance to Cry34Ab1/Cry35Ab1 and Cry3Bb1. *J Appl Entomol* 141(1-2): 28-40. <https://doi.org/10.1111/jen.12377>

- Machado, E.P., dos S. Rodrigues Junior, G.L., Führ, F.M., Zago, S.L., Marques, L.H., Santos, A. C., Nowatzki, T., Dahmer, M.L., Omoto, C., Bernardi, O.** (2020) Cross-crop resistance of *Spodoptera frugiperda* selected on Bt maize to genetically-modified soybean expressing Cry1Ac and Cry1F proteins in Brazil. *Sci Rep* 10(1): 10080. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-67339-1>
- Mallikarjuna-Swamy, B.P., Marundan, S. Jr, Samia, M., Ordonio, R.L., Rebong, D.B., Miranda, R., Alibuyog, A., Rebong, A.T., Tabil, M.A., Suralta, R.R., Alfonso, A.A., Biswas, P.S., Kader, M.A., Reinke, R.F., Boncodin, R., MacKenzie, D.J.** (2021) Development and characterization of GR2E Golden rice introgression lines. *Sci Rep* 11(1): 2496. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-82001-0>
- Makarevitch, I., Svitashv, S.K., Somers, D.A.** (2003) Complete sequence analysis of transgene loci from plants transformed via microprojectile bombardment. *Plant Mol Biol* 52(2): 421-432. <https://doi.org/10.1023/a:1023968920830>
- Menchaca, A., dos Santos-Neto, P.C., Mulet, A.P., Crispo, M.** (2020) CRISPR in livestock: From editing to printing. *Theriogenology*, 150: 247e254. <https://doi.org/10.1016/j.theriogenology.2020.01.063>
- Men, X., Ge, F., Edwards, C. A., Yardim, E. N.** (2005) The influence of pesticide applications on *Helicoverpa armigera* Hübner and sucking pests in transgenic Bt cotton and non-transgenic cotton in China. *Crop Protection* 24(4): 319-324. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2004.08.006>
- Miyazaki, J., Bauer-Panskus, A., Böhn, 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://doi.org/10.1186/s12302-019-0274-1>
- Monroe, G., Srikant, T., Carbonell-Bejerano, P., Becker, C., Lensink, M., Exposito-Alonso, M., Klein, M., Hildebrandt, J., Neumann, N., Kliebenstein, D., Weng, M.-L., Imbert, E., Ågren, J., Rutter, M.T., Fenster, C.B., Weigel, D.** (2022) Mutation bias reflects natural selection in *Arabidopsis thaliana*. *Nature* 602: 101-105. <https://doi.org/10.1038/s41586-021-04269-6>
- Nagrare, V.S., Kranthi, S., Biradar, V.K., Zade, N.N., Sangode, V., Kakde, G., Shukla, R.M., Shivare, D., Khadi, B. M., Kranthi, K.R.** (2009) Widespread infestation of the exotic mealybug species, *Phenacoccus solenopsis* (Tinsley) (Hemiptera: Pseudococcidae), on cotton in India. *Bull Entomol Res* 99(5), 537-541. <https://doi.org/10.1017/S0007485308006573>
- Najork, K., Friedrich, J. Keck, M.** (2022) Bt cotton, pink bollworm, and the political economy of sociobiological obsolescence: insights from Telangana, India. *Agric Hum Values* 39, 1007–1026. <https://doi.org/10.1007/s10460-022-10301-w>
- Naranjo, S. E.** (2011) Impacts of Bt Transgenic Cotton on Integrated Pest Management. *J Agric Food Chem* 59(11): 5842-5851. <https://doi.org/10.1021/jf102939c>
- Niu, Y., Oyediran, I., Yu, W., Lin, S., Dimase, M., Brown, S., Reay-Jones, F.P.F., Cook, D., Reisig, D., Thrash, B., Ni, X., Paula-Moraes, S.V., Zhang, Y., Chen, J.S., Wen, Z., Huang, F.** (2021) Populations of *Helicoverpa zea* (Boddie) in the southeastern United States are commonly resistant to Cry1Ab, but still susceptible to Vip3Aa20 expressed in MIR 162 corn. *Toxins* 13(1): 63. <https://doi.org/10.3390/toxins13010063>
- 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. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-06400-y>
- OECD** (1992) *Biotechnology, Agriculture and Food, 1992*, Published by OECD Publishing, Publication, 28 July 1992, OECD Code: 931992031P1, ISBN 92-64-13725-4.

- Oswald, K.J., French, B.W., Nielson, C., Bagley, M.** (2012) Assessment of fitness costs in Cry3Bb1-resistant and susceptible western corn rootworm (Coleoptera: Chrysomelidae) laboratory colonies. *J Appl Entomol* 136: 730-740. <https://doi.org/10.1111/j.1439-0418.2012.01704.x>
- Páez Jerez, P.G., Hill J.G., Pereira E.J.G., Pereyra P.M., Vera M.T.** (2022) The role of genetically engineered soybean and Amaranthus weeds on biological and reproductive parameters of *Spodoptera cosmioides* (Lepidoptera: Noctuidae). *Pest Manag Sci* 78: 2502–2511. <https://doi.org/10.1002/ps.6882>
- Parenti, M.D., Santoro, A., Del Rio, A., Franceschi, C.** (2019) Literature review in support of adjuvanticity/immunogenicity assessment of proteins. *EFSA Supporting Publications* 16(1): 1551E. <https://doi.org/10.2903/sp.efsa.2019.EN-1551>
- Pfeifer, K., Frieß, J.L. and Giese, B.** (2022) Insect allies—Assessment of a viral approach to plant genome editing. *Integr Environ Assess Manag* 18: 1488-1499. <https://doi.org/10.1002/ieam.4577>
- Phélinas, P., & Choumert, J.** (2017) Is GM soybean cultivation in Argentina sustainable? *World Development* 99: 452-462. <https://doi.org/10.1016/j.worlddev.2017.05.033>
- PlantGeneRisk Datenbank**, <https://www.testbiotech.org/database>
- Price, B. & Cotter, J.** (2014) The GM Contamination Register: a review of recorded contamination incidents associated with genetically modified organisms (GMOs), 1997–2013. *Food Contam* 1: 5. <https://doi.org/10.1186/s40550-014-0005-8>
- Pschorn-Strauss, E.** (2005) Bt cotton in South Africa: the case of the Makhathini farmers. *Grain Seedling*. <https://grain.org/el/492>
- Quist, D., Chapela, I.** Transgenic DNA introgressed into traditional maize landraces in Oaxaca, Mexico. *Nature* 414: 541-543. <https://doi.org/10.1038/35107068>
- Raffan, S., Sparks, C., Huttly, A., Hyde, L., Martignago, D., Mead, A., Hanley, S.J., Wilkinson, P.A., Barker, G., Edwards, K.J., Curtis, T.Y., Usher, S., Kosik, O., Halford, N.G.** (2021) Wheat with greatly reduced accumulation of free asparagine in the grain, produced by CRISPR/Cas9 editing of asparagine synthetase gene TaASN2. *Plant Biotechnol J* 19(8): 1602-1613. <https://doi.org/10.1111/pbi.13573>
- Raffan, S., Oddy, J., Meade, A., Barker, G., Curtis, T., Usher, S., Burt, C., Halford, N.G.** (2023) Field assessment of genome edited, low asparagine wheat: Europe's first CRISPR wheat field trial. *Plant Biotechnol J*. <https://doi.org/10.1111/pbi.14026>
- Raitskin, O. & Patron, N.J.** (2016) Multi-gene engineering in plants with RNA-guided Cas9 nuclease, *Curr Opin Biotech*: 37: 69-75. <http://dx.doi.org/10.1016/j.copbio.2015.11.008>
- Rang, A., Linke, B., Jansen, B.** (2005) Detection of RNA variants transcribed from the transgene in Roundup Ready soybean. *Eur Food Res Technol* 220(3): 438-443. <https://doi.org/10.1007/s00217-004-1064-5>
- Sammons, R.D. & Gaines, T.A.** (2014) Glyphosate resistance: state of knowledge. *Pest Manag Sci* 70: 1367-1377. <https://doi.org/10.1002/ps.3743>
- Santamaría-Hernando, S., López-Maroto, Á., Galvez-Roldán, C., Munar-Palmer, M., Monteagudo-Cascales, E., Rodríguez-Herva, J.J., Krell, T., López-Solanilla, E.** (2022) *Pseudomonas syringae* pv. tomato infection of tomato plants is mediated by GABA and l-Pro chemoperception. *Mol Plant Pathol* 23(10):1433-1445. <https://doi.org/10.1111/mpp.13238>
- Schafer, M.G., Ross, A.A., Londo, J.P., Burdick, C.A., Lee, E.H., Travers, S.E., Van de Water, P.K., Sagers, C.L.** (2011) The establishment of genetically engineered canola populations in the US. *PLoS One* 6(10): e25736. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0025736>

- Schnurr, M.** (2012) Inventing Makhathini: Creating a prototype for the dissemination of genetically modified crops into Africa. *Geoforum* 43: 784-792. <https://doi.org/10.1016/j.geoforum.2012.01.005>
- Schulz, R., Bub, S., Petschick, L.L., Stehle, S., Wolfram, J.** (2021) Applied pesticide toxicity shifts toward plants and invertebrates, even in GM crops. *Science* 372(6537): 81-84. <https://doi.org/10.1126/science.abe1148>
- Schütte, G., Eckerstorfer, M., Rastelli, V., Reichenbecher, W., Restrepo-Vassalli, S., Ruohonen-Lehto, M., Saucy, A.-G.W., Mertens, M.** (2017) Herbicide resistance and biodiversity: agronomic and environmental aspects of genetically modified herbicide-resistant plants. *Environ Sci Eur* 29(1): 5. <https://doi.org/10.1186/s12302-016-0100-y>
- Service, R.F.** (2013) What happens when weed killers stop killing? *Science* 341 (6152): 1329. <https://doi.org/10.1126/science.341.6152.1329>
- Simon, S., Otto, M. and Engelhard, M.** (2018) Synthetic gene drive: between continuity and novelty. *EMBO Rep* 19: e45760. <https://doi.org/10.15252/embr.201845760>
- 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>
- Smyth, S.J.** (2020) The human health benefits from GM crops. *Plant Biotechnol J* 18: 887-888. <https://doi.org/10.1111/pbi.13261>
- Sohn, S.I., Pandian, S., Oh, Y.J., Kang, H.J., Ryu, T.H., Cho, W.S., Shin, E.K., Shin, K.S.** (2021) A review of the unintentional release of feral genetically modified rapeseed into the environment. *Biology* 10(12): 1264. <https://doi.org/10.3390/biology10121264>
- Spanu, P.D.** (2022) Slicing the cost of bread. *Nat Plants* 8: 200-201. <https://doi.org/10.1038/s41477-022-01115-z>
- STOA** (2022) Genome-edited crops and 21st century food system challenges. <https://doi.org/10.2861/290440>
- Tabashnik, B.E., Brévault, T., Carrière, Y.** (2013) Insect resistance to Bt crops: lessons from the first billion acres, *Nat Biotechnol* 31(6): 510-521. <https://doi.org/10.1038/nbt.2597>
- Tabashnik, B.E., & Carrière, Y.** (2017). Surge in insect resistance to transgenic crops and prospects for sustainability. *Nat Biotechnol* 35(10): 926-935. <https://doi.org/10.1038/nbt.3974>
- Tay, W.T., Soria, M.F., Walsh, T., Thomazoni, D., Silvie, P., Behere, G.T., Anderson, C., Downes, S.** (2013) A brave new world for an old world pest: *Helicoverpa armigera* (Lepidoptera: Noctuidae) in Brazil. *PLoS ONE* 8(11): e80134. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0080134>
- Testbiotech** (2015) Escape of genetically engineered organisms and unintentional transboundary movements: Overview of recent and upcoming cases and the new risks from SynBio organisms. <https://www.testbiotech.org/node/1339>
- Testbiotech** (2018) Testbiotech comment on data for risk assessment of Provitamin A Biofortified Rice Event GR2E submitted to Food Standards Australia New Zealand by IRRI. *Testbiotech Background* 05 - 02- 2018, <https://www.testbiotech.org/node/2149>
- Testbiotech** (2021a) Risk assessment of GE plants in the EU: Taking a look at the ‘dark side of the moon’. <https://www.testbiotech.org/node/2692>
- Testbiotech** (2021b) New GE and food plants: The disruptive impact of patents on breeders, food production and society. <https://www.testbiotech.org/node/2772>
- Testbiotech** (2021c) Testbiotech comment on the IUCN report “Genetic frontiers for conservation, an assessment of synthetic biology and biodiversity conservation”. <https://www.testbiotech.org/node/2802>

- Testbiotech** (2022) New genomic techniques (NGTs): agriculture, food production and crucial regulatory issues, Commissioned by and written for Verbraucherzentrale Bundesverband (vzbv), https://www.vzbv.de/sites/default/files/2022-11/vzbv-report_final_final.pdf
- Then, C.** (2015) Handbuch Agro-Gentechnik, oekom Verlag
- Then, C.** (2019) Neue Gentechnikverfahren und Pflanzenzucht - Patente-Kartell für große Konzerne. In: Neue Gentechnik - Zwischen Labor, Konzernmacht und bäuerlicher Zukunft. Rundbrief Forum Umwelt & Entwicklung 2/2019. https://www.forumue.de/wp-content/uploads/2019/06/5_Neue-Gentechnikverfahren-und-Pflanzenzucht_Then.pdf
- Then, C., Kawall, K., Valenzuela, N.** (2020) Spatio-temporal controllability and environmental risk assessment of genetically engineered gene drive organisms from the perspective of EU GMO Regulation. *Integr Environ Assess Manag* 16(5): 555-568. <https://doi.org/10.1002/ieam.4278>
- Third World Network** (2022) Bt Crops Past Their Sell-By Date: A Failing Technology Searching for New Markets? <https://twm.my/title2/biosafety/bio19.htm>
- Tippe, R., Moy, A.-C., Eckhardt, J., Meienberg, F., Then, C.** (2022) Patents on genes and genetic variations block access to biological diversity for plant breeding: patent research conducted in 2021 shows how industry is trying to patent genes, plants, seeds and food. No Patents on Seeds!, <https://www.no-patents-on-seeds.org/en/report2022>
- Vázquez-Barríos, 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(1): 1-10. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-81567-z>
- Wang, W, Xia, H., Yang, X., Xu, T., Si, H.J., Cai, X.X., Wang, F., Su, J., Snow, A.A., Lu, B.-R.** (2014) A novel 5-enol-pyruvylshikimate-3-phosphate (EPSP) synthase transgene for glyphosate resistance stimulates growth and fecundity in weedy rice (*Oryza sativa*) without herbicide. *New Phytol* 202(2): 679– 688. <https://doi.org/10.1111/nph.12428>
- Wang, Y., Cheng, X., Shan, Q., Zhang, Y., Liu, J., Gao, C., Qiu, J.L.** (2014) Simultaneous editing of three homoeoalleles in hexaploid bread wheat confers heritable resistance to powdery mildew. *Nat Biotechnol* 32(9): 947-51. <https://doi.org/10.1038/nbt.2969>
- Wang, H., La Russa, M., Qi, L.S.** (2016) CRISPR/Cas9 in genome editing and beyond. *Annu Rev Biochem* 85: 227-264. <https://doi.org/10.1146/annurev-biochem-060815-014607>
- World Commission on Environment and Development, WCED** (1987) Our Common Future. <https://sustainabledevelopment.un.org/content/documents/5987our-common-future.pdf>
- Wegier, A., Pineyro Nelson, A., Alarcon, J., Gálvez Mariscal, A., Alvarez Buylla, E.R., Piñero, D.** (2011) Recent long-distance transgene flow into wild populations conforms to historical patterns of gene flow in cotton (*Gossypium hirsutum*) at its centre of origin. *Mol Ecol* 20(19): 4182–4194. <https://doi.org/10.1111/j.1365-294X.2011.05258.x>
- Wendel, J.F., Jackson, S.A., Meyers, B.C., Wing, R.A.** (2016) Evolution of plant genome architecture. *Genome Biol* 17: 37. <https://doi.org/10.1186/s13059-016-0908-1>
- Windels, P., De Buck, S., Van Bockstaele, E., De Loose, M., Depicker, A.** (2003) T-DNA integration in Arabidopsis chromosomes. Presence and origin of filler DNA sequences. *Plant Physiol*, 133(4): 2061-2068. <https://doi.org/10.1104/pp.103.027532>
- Xiao, Y., Li, W., Yang, X., Xu, P., Jin, M., Yuan, H., Zheng, W., Soberón, M., Bravo, A., Wilson, K., Wu, K.** (2021) Rapid spread of a densovirus in a major crop pest following wide-scale adoption of Bt-cotton in China. *Elife* 10: e66913. <https://doi.org/10.7554/eLife.66913>
- Yang, F., Kerns, D.L., Little, N.S., Santiago González, J.C., Tabashnik, B.E.** (2021) Early warning of resistance to Bt toxin Vip3Aa in *Helicoverpa zea*. *Toxins* 13(9): 618. <https://doi.org/10.3390/toxins13090618>

- Yang, Q., Tae-Sung, P., Bumkyu, L., Myung-Ho, L.** (2022) Unusual removal of T-DNA in T1 progenies of rice after Agrobacterium-mediated CRISPR/Cas9 editing. Research Square. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-1066224/v1>
- Yang, X., Li, L., Jiang, X., Wang, W., Cai, X., Su, J., Wang, F., Lu, B.-R.** (2017) Genetically engineered rice endogenous 5-enolpyruvylshikimate-3-phosphate synthase (epsps) transgene alters phenology and fitness of crop-wild hybrid offspring. *Sci Rep* 7(1): 6834. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-07089-9>
- Yue, J., VanBuren, R., Liu, J., Fang, J., Zhang, X., Liao, Z., Wai, C.M., Xu, X., Chen, S., Zhang, S., Ma, X., Ma, Y., Yu, H., Lin, J., Zhou, P., Huang, Y., Deng, B., Deng, F., Zhao, X., Yan, H., Fatima, M., Zerpa-Catanho, D., Zhang, X., Lin, Z., Yang, M., Chen, N.J., Mora-Newcomer, E., Quesada-Rojas, P., Bogantes, A., Jiménez, V.M., Tang, H., Zhang, J., Wang, M.-L., Paull, R.E., Yu, Q., Ming, R.** (2022) SunUp and Sunset genomes revealed impact of particle bombardment mediated transformation and domestication history in papaya. *Nat Genet* 54: 715-724. <https://doi.org/10.1038/s41588-022-01068-1>
- Zapiola, M.L., Campbell, C.K., Butler, M.D., Mallory-Smith, C.A.** (2008) Escape and establishment of transgenic glyphosate-resistant creeping bentgrass *Agrostis stolonifera* in Oregon, USA: a 4-year study. *J Appl Ecol* 45: 486-494. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2664.2007.01430.x>
- Zetsche, B., Heidenreich, M., Mohanraju, P., Fedorova, I., Kneppers, J., DeGennaro, E.M., Winblad, N., Choudhury, S.R., Abudayyeh, O.O., Gootenberg, J.S., Wu, W.Y., Scott, D.A., Severinov, K., van der Oost, J., Zhang, F.** (2017) Multiplex gene editing by CRISPR-Cpf1 using a single crRNA array. *Nat Biotechnol* 35: 31-34. <https://doi.org/10.1038/nbt.3737>
- Zhao, J.H., Ho, P., Azadi, H.** (2011) Benefits of Bt cotton counterbalanced by secondary pests? Perceptions of ecological change in China. *Environ Monit Assess* 173(1): 985-994. <https://doi.org/10.1007/s10661-010-1439-y>
- Zukoff, S.N., Ostlie, K.R., Potter, B., Meihls, L.N., Zukoff, A.L., French, L., Ellersieck, M.R., Wade French, B., Hibbard, B.E.** (2016) Multiple assays indicate varying levels of cross resistance in Cry3Bb1-selected field populations of the western corn rootworm to mCry3A, eCry3.1Ab, and Cry34/35Ab1. *J Econ Entomol* 109(3): 1387-1398. <https://doi.org/10.1093/jee/tow073>