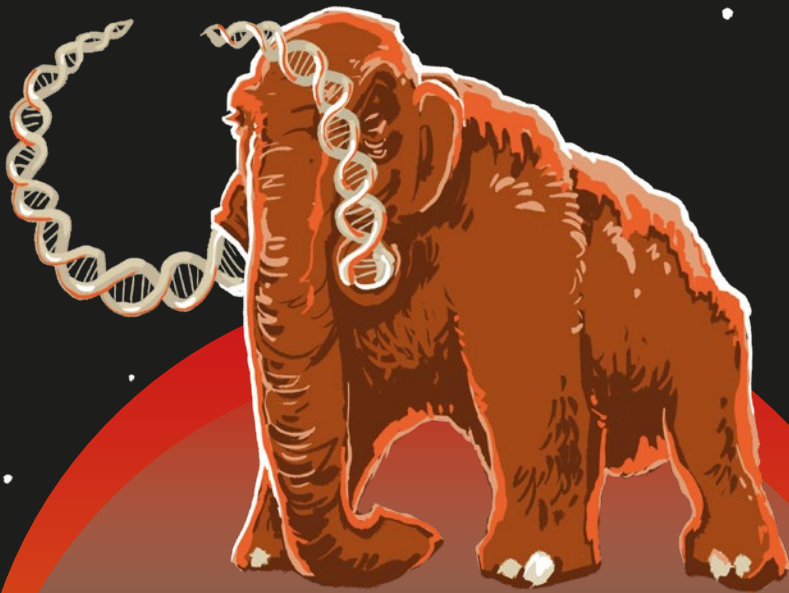


WAS MACHT DAS MAMMUT AUF DEM MARS?



WARUM WIR
UNSERE BIOSPHÄRE VOR DER

GENTECHNIK

SCHÜTZEN MÜSSEN



WAS MACHT DAS MAMMUT AUF DEM MARS?
Warum wir unsere Biosphäre vor der Gentechnik schützen müssen

Testbiotech 2024

AutorInnen: Matthias Juhas, Mario Kuttruff, Andreas Bauer-Panskus, Nina Valenzuela und Christoph Then
Grafik und Layout: Timo Zett

Wenn Sie unsere Arbeit unterstützen wollen:

SPENDENKONTO:

GLS Gemeinschaftsbank

IBAN: DE71 4306 0967 8218 2353 00

BIC: GENODEM1GLS

*Diese Publikation wurde gefördert von der
Umweltstiftung Greenpeace und der Stiftung GEKKO.*



UMWELTSTIFTUNG
GREENPEACE



STIFTUNG
GEKKO

Vollständiges IMPRESSUM auf Seite 44.

editorial

Gesündere Nahrungsmittel, weniger Pestizide, Sicherung der Welternährung: Die Versprechungen der Gentechnik sind oft sehr konkret und preisen Vorteile für das tägliche Leben an. Dagegen verblasst die Diskussion um die Risiken für die Umwelt oft: Wen interessieren schon Bakterien, Würmer, Bestäuber und der Erhalt der Ökosysteme?

Doch betrachten wir es mal so: Wir alle haben schon von *kritischer Infrastruktur* gehört, die erhalten werden muss, um die Funktion von Versorgungssystemen oder sogar unser Überleben zu sichern. Und Bakterien, Würmer, Pflanzen und Insekten sind ja nichts anderes als Teile der kritischen Infrastruktur für unser Überleben auf diesem Planeten. Wie können wir diese Infrastruktur schützen? Und wovor?

Dieser Bericht ist aus der Perspektive des Schutzes von Mensch, Umwelt und Natur geschrieben. Er zeigt, welche tiefgreifende negative Auswirkungen der Einsatz der Neuen Gentechnik auf unseren Alltag haben könnte. Alle Lebensformen (Pflanzen, Tiere, Mikroorganismen) und alle Bereiche der Biosphäre (Land, Wasser, Luft) können betrof-

fen sein. Mit dieser mächtigen Technologie gehen nie dagewesene Möglichkeiten einher. Und damit auch nie dagewesene Risiken.

Das, was wir als Natur, als natürliche biologische Vielfalt erleben, könnte durch uns für künftige Generationen verlorengehen. Die Frage, in was für einer Welt wir leben wollen, muss daher neu beantwortet werden.

Gehen wir zu unbedacht mit dieser Technologie um, können wir neue Pandemien auslösen, das Artensterben beschleunigen, Ökosysteme zerstören und unser eigenes Überleben gefährden. Um diese Risiken anschaulich zu machen, gibt dieser Bericht konkrete Beispiele und zeigt wichtige Zusammenhänge auf.

Hinter dieser Entwicklung stehen grundsätzliche Fragen, die die VerfasserInnen nicht beantworten können, die aber von der Gesellschaft nicht ignoriert werden dürfen: Lenken wir Menschen den Fortschritt oder sind wir angesichts unserer eigenen Technologien machtlos? Welchen Fortschritt wollen wir eigentlich? Was ist ‚falscher Fortschritt‘, was treibt ihn an und was hindert uns daran, Fortschritt und Allgemeinwohl stärker zu verbinden?

Gentechnik gehört (wie Künstliche Intelligenz, Atomenergie, Nanotechnologie) zu den Technologien, bei denen eine von Vermarktungsinteressen unabhängige Expertise unentbehrlich ist. Sonst gerät die Perspektive des Schutzes von Mensch und Umwelt rasch ins Hintertreffen. Das Thema bedarf einer wachsam und aktiven Zivilgesellschaft und wissenschaftlich belastbarer Informationen über die Risiken.

Testbiotech will dazu beitragen, gute Lösungen zu finden: Wie können wir den Umgang mit der Gentechnik so gestalten, dass wir künftigen Generationen keine unlösbaren Probleme hinterlassen? Wie können wir der Gentechnik die notwendigen Grenzen setzen?

Wir wünschen eine interessante Lektüre!

CHRISTOPH THEN

CHRISTOPH THEN
Geschäftsführer

ZUSAMMENFASSUNG

1 / Seite 06

BIOSPHEREN GENTECHNIK

Ein Ausflug zum Mars ...

2 / Seite 08

URSPUNG, GEGENWART UND ZUKUNFT DES LEBENS

3 / Seite 10

SIND WIR SCHLAUER ALS DIE EVOLUTION?

4 / Seite 13

ALTE GENTECHNIK

5 / Seite 15

NEUE GENTECHNIK

6 / Seite 22

GENTECHNISCH VERÄNDERTE MIKROORGANISMEN

7 / Seite 24

SYNTHETISCHE BIOLOGIE (SynBio)

8 / Seite 26

GENTECHNISCHE VERÄNDERUNG DER UMWELT: „OUTDOOR-GENTECHNIK“

9 / Seite 30

GENTECHNIK UND KÜNSTLICHE INTELLIGENZ (KI)

10 / Seite 34

DER MENSCH ALS VERSUCHSOBJEKT?

11 / Seite 36

NEUE GENTECHNIK UND DIE FRAGE: WOZU?

SCHLUSSFOLGERUNGEN / Seite 41

zusammen- fassung

„Gene Drives“ können ganze Populationen von Pflanzen und Tieren direkt in ihrer Umwelt manipuliert werden. Willkommen im „Gentechnolabor Umwelt“.

Der Blick auf die Entwicklung insgesamt zeigt: Das Versuchsfeld der Gentechnik wird drastisch ausgeweitet. Wir stehen vor einem tiefgreifenden Eingriff in die biologischen Grundlagen und in die Ökosysteme des Planeten.

Es droht eine Art „Biosphären-Gentechnik“: Alle Lebensformen wären direkt oder indirekt betroffen. Wir riskieren damit eine systemische Überlastung der ökologischen Netzwerke und eine Gefährdung der Lebensgrundlagen künftiger Generationen.

Darüber hinaus wird der Einsatz Künstlicher Intelligenz (KI) die Entwicklung erheblich beschleunigen. Eingesetzt werden entsprechende Programme u.a. bei der Entwicklung von Molekülen (Impfstoffe, Medikamente), gentechnisch veränderten Organismen (Pflanzen, Tiere und Mikroorganismen) oder auch biologischen Waffen. Vor den Risiken des Entstehens neuer Pandemien wird in diesem Zusammenhang schon von vielen ExpertInnen gewarnt, doch die Risiken für die Umwelt sind bisher kaum ein Thema.

MIT DEN NEUEN gentechnischen Verfahren und Werkzeugen wie der Gen-Schere CRISPR/Cas haben wir erstmals die Möglichkeiten, jedes Gen in jeder Lebensform gentechnisch zu verändern und diese Veränderungen innerhalb der jeweiligen Art zu verbreiten. Die Entwicklung solcher Organismen kann jetzt in „Turbo-Geschwindigkeit“ vorangetrieben und ausgeweitet werden.

Schon bald könnten sehr viel mehr gentechnisch veränderte Pflanzen, Tiere und Mikroorganismen in die Umwelt gelangen und sich dort ausbreiten, als bisher schon geschehen. Sogar über die gentechnische Veränderung wildlebender Arten, die Wiederbelebung ausgestorbener Tiere wie Mammuts oder die Erschaffung neuer Arten wird diskutiert.

Zudem birgt die zukünftige „Outdoor-Gentechnik“ neuartige Risiken: Der eigentliche Vorgang der gentechnischen Veränderung wird vom Labor in die Umwelt verlagert. Unter anderem mithilfe sogenannter

Unabhängig davon, wie man zu diesen Entwicklungen steht, ist es wichtig, sich einen Überblick zu verschaffen, um eine informierte Diskussion führen und fundierte Entscheidungen treffen zu können. Dieser Bericht gibt einen Überblick über zentrale Fragen – aus der Perspektive des Schutzes von Mensch und Umwelt. ///



1/ biosphären- gentechnik

EIN AUSFLUG ZUM MARS ...

BEREITS VOR RUND ZEHN JAHREN plante die US-amerikanische Raumfahrtbehörde NASA ein Projekt mit dem Ziel, Mikroorganismen zu finden, die für den Aufbau einer neuen Biosphäre auf dem Mars geeignet sein könnten [1]. Der Einsatz von Gentechnik könnte bei derartigen Projekten eine wichtige Rolle spielen, um bspw. Hefepilze oder Bakterien an die Bedingungen der Marsoberfläche anzupassen.

Wären diese ersten Versuche erfolgreich, würde man wohl darüber nachdenken, auf dem Mars durch eine Art ‚Biosphären-Gentechnik‘ eine ganz neue Lebenswelt entstehen zu lassen. Diese sollte dann gute Bedingungen für künftige Marsmissionen schaffen. Die NASA selbst spricht von ‚Ecopoiesis‘, d.h. der Entwicklung eines neuen Ökosystems. Das Ziel ist die Gestaltung der Marsoberfläche nach dem Vorbild der Erde (‚Terraforming‘). Derzeit scheint Leben auf dem Mars zwar unwahrscheinlich, aber nicht ganz ausgeschlossen.

Auf dem Mars gibt es nach aktuellem Kenntnisstand derzeit keine Biosphäre. Deswegen wären die Folgen einer Freisetzung von gentechnisch veränderten Mikroorganismen dort wohl unbedenklicher als auf der Erde.

Der Vergleich von Mars und Erde verdeutlicht jedoch, was auf der Erde besonders geschützt werden muss: Ein radikaler Eingriff in die biologische Vielfalt des Planeten Erde könnte für unsere eigene Existenz wesentlich gefährlicher sein als die Gentechnik-Mikroorganismen auf dem Mars. Auf der Erde haben sich in fast 4 Milliarden Jahren Evolution die heutigen Ökosysteme herausgebildet, die auch für unser eigenes Überleben unverzichtbar sind. Die über Milliarden Jahre durch die Evolution entstandenen Lebensgemeinschaften sind mehr als die Summe ihrer Teile. Werden ihre Grundlagen verändert, kann das ganze System zum Kippen gebracht werden. Diese Gefahr besteht insbesondere dann, wenn zu viele Gentechnik-Organismen gleichzeitig in die Ökosysteme gelangen, mit Merkmalen, die in diesen Systemen bisher nicht vorhanden und nicht an sie angepasst sind. ///

... UND DER BLICK ZURÜCK ZUR ERDE



WIEDERBELEBUNG DES MAMMUTS

»Der alte Freund und neue Held der Erde – das Mammut. Möge die Urgeschichte vorwärts donnern. Wir haben die DNA, die Technologie und die führenden Experten auf diesem Gebiet. Demnächst werden wir das Wollmammut präsentieren. Wieder zum Leben erweckt.«

SO WIRD DAS WIEDERAUFERSTEHUNGS-PROJEKT auf der Internetpräsenz des US-Startups Colossal Biosciences angepriesen [2]. Am Ende eines 10-Schritte-Programms ist dort das Bild eines KI-generierten Wollhaarmammut-Babys zu sehen – erschaffen mithilfe moderner Sequenzierungstechnologien, Stammzellverfahren und Gentechnik. Kernstück dieser ‚Mammutaufgabe‘ sind gentechnisch veränderte Stammzellen eines asiatischen Elefanten [3]. Der Plan ist, mit Neuer Gentechnik Teile des Erbguts von über 60 ‚Kaltwetter-Genen‘, die bspw. für den zotteligen Haarwuchs verantwortlich sind, durch kurze DNA-Sequenzen des Mammuts zu ersetzen. Diese wurden in Mammut-DNA identifiziert, die im sibirischen Permafrost überdauert hatte. Dadurch sollen Mammut-Elefant-Hybride entstehen, die optimal an kalte Temperaturen angepasst sind. Schon 2028 sollen die ersten gentechnisch veränderten Elefanten das Licht der Welt erblicken.

Laut Colossal diene das Projekt dazu, Tierarten vor dem Aussterben zu bewahren und sogar ausgestorbene Arten wieder ‚zum Leben zu erwecken‘. Zudem könne damit auch der Klimawandel bekämpft werden: So würden große Mammut-Herden bspw. in der Arktis den Permafrostboden verdichten, indem sie darauf herumtrampeln, und somit zu dessen Erhalt beitragen. Zudem sollen sie die sibirische Tundra wieder in eine steppenartige Graslandschaft verwandeln. Dass für ein derartiges ‚Biosphären-Engineering‘ eine erhebliche Anzahl von Mammuts nötig wäre, liegt auf der Hand.

Ob die Gentechnik-Tiere jedoch die vorhergesagten Eigenschaften aufweisen werden, ist äußerst zweifelhaft, da die Umweltbedingungen heute ganz andere sind als zu Lebzeiten der ursprünglichen Mammuts. Zudem würden Mammut-Elefanten-Hybriden sehr wahrscheinlich auch neue Verhaltensweisen zeigen. Aber Probleme gibt es schon zuvor: es ist sehr fraglich, ob überhaupt überlebensfähige Tiere geboren werden. Ob die auch zum Patent angemeldeten Verfahren (siehe z.B. WO2022125940, WO2024081614) jemals realisiert werden können, steht jedenfalls in den Sternen.

Und im Falle eines Erfolgs stellt sich die Frage, mit welchen Auswirkungen dieses u.a. von Geldgebern wie Peter Thiel, der CIA und Global Space Ventures finanzierte Projekt einhergehen und in welche Richtung uns Gentechnik-Vorhaben dieser Art in Zukunft führen werden. ///

2/ ursprung, gegenwart & zukunft des lebens

UNSERE ÖKOSYSTEME und ihre Artenvielfalt haben sich aus gemeinsamen Ursprüngen entwickelt und sich über Milliarden von Jahren aneinander angepasst. Dabei sind vielfältige Symbiosen entstanden. Einige Beispiele: Ohne unsere Darmbakterien könnten wir ebenso wenig überleben wie Pflanzen ohne Bodenorganismen. Bestäuber und ihre Blütenpflanzen gibt es nur im Kombi-Pack. Wir alle atmen den Sauerstoff, den Pflanzen produzieren. Alles hängt mit allem zusammen, wie bereits Alexander von Humboldt wusste.

Die Evolution beruht auf ‚intelligenten‘ biologischen Prozessen: Sie erlaubt Veränderungen, hat aber auch Mechanismen zur Stabilisierung entwickelt, die innerhalb bestimmter Grenzen verhindern können, dass die genetischen Grundlagen einer Art zu instabil werden [4]. Im weiteren Verlauf der Evolution werden sich viele weitere Lebensformen entwickeln. Aber neue Arten entstehen nicht im Alleingang. Sie brauchen ausreichend lange Zeiträume für die gegenseitige Anpassung.

Tabelle 1: Vergleich von Züchtung und Gentechnik

	Pflanzenzucht	gentechnische Verfahren
Bedeutung von Artgrenzen	Merkmale können innerhalb der Art oder zwischen nah verwandten Arten ausgetauscht werden.	Merkmale können unabhängig von Artgrenzen übertragen oder neu eingefügt werden.
Bedeutung der genetischen Vielfalt	Die natürliche oder induzierte genetische Vielfalt begrenzt die mögliche Auswahl der erwünschten Merkmale.	Die Eigenschaften der Pflanzen sind nicht durch die vorhandene genetische Vielfalt eingeschränkt.
Genomorganisation	Zufällige Mutationen unterliegen Begrenzungen. Diese sind u.a. bedingt durch Reparaturmechanismen, Genkopien, gekoppelte Gene und epigenetische Faktoren.	Die Gentechnik und insbesondere die Gen-Schere CRISPR/Cas können die Begrenzungen der Genomorganisation umgehen.
Anzahl und Ort der genetischen Veränderungen	Bei ungezielter Mutagenese kann die Anzahl der genetischen Veränderungen größer sein als bei der Gentechnik. Die erzielten Veränderungen gehen aber in der Regel nicht über das hinaus, was auch natürlicherweise zu erwarten ist.	Die Neue Gentechnik ermöglicht es, veränderte Genaktivitäten, neue Genkombinationen und Genfunktionen zu erzielen, die bei konventioneller Zucht nicht zu erwarten sind.

WAS KANN DIE ZÜCHTUNG ?

Die Züchtung von Pflanzen und Tieren nutzt Mechanismen der Evolution: Seit Menschen Züchtung betreiben, können sie die Entstehung bzw. Ausprägung von Merkmalen aktiv beeinflussen. Dafür eingesetzt werden Kreuzung und

Selektion und, bei Pflanzen, auch physikalische und chemische Reize, um das Auftreten ‚zufälliger‘ Mutationen zu beschleunigen. Dabei werden die Mechanismen der Evolution genutzt, aber in der Regel nicht umgangen: Die Züchtung arbeitet mit Zellen oder Organismen und nicht auf der Ebene einzelner Gene. Die Ergebnisse unterliegen sozusagen den ‚Leitplanken‘ der Evolution. Bei der Neuen Gentechnik werden aber ‚biotechnologische Mutagene‘ (Gen-Scheren) eingesetzt, mit deren Hilfe diese ‚Leitplanken‘ umgangen werden können. ///

3/ sind wir schlauer als die evolution?

SEIT DEM EINZUG DER GENTECHNIK sind wir dazu in der Lage, Lebewesen zu erschaffen, die keinen evolutionären Ursprung mehr haben. Manche Akteure sprechen von einem ‚Ende des Anfangs‘ und meinen damit, dass die Gentechnik das Ende der natürlichen Evolution eingeleitet hat.

Dabei basiert die Gentechnik auf einem Ansatz, der die Notwendigkeit zur gegenseitigen Anpassung unterschätzt und gar die Evolution für dumm erklärt. So schreibt eine der ErfinderInnen der Gen-Schere CRISPR/Cas, Jennifer Doudna [5]:

» Die Zeiten, in denen das Leben ausschließlich durch die schwerfälligen Kräfte der Evolution geprägt wurde, sind vorüber. Wir stehen an der Schwelle zu einem neuen Zeitalter, in dem wir die Herren über die genetische Ausstattung allen Lebens und all ihre vielfältigen, lebensprühenden Folgen sind.

Schon jetzt ersetzen wir das taube, dumme, blinde System, das über die Erdzeitalter hinweg das genetische Material auf unserem Planeten geformt hat, durch ein System der bewussten, absichtsvollen, von Menschen gelenkten Evolution.«

WAS IST EINE GENSCHERE?

UM BESTIMMTE EIGENSCHAFTEN

von z.B. Pflanzen zu verändern, werden sogenannte Gen-Scheren eingesetzt: Diese können so programmiert werden, dass sie eine bestimmte Stelle im Erbgut finden und dort das Erbgut durchtrennen. Dieser Bruch im Erbgut wird dann von der Zelle erkannt und repariert. Dabei wird aber die Herstellung der ursprünglichen Genfunktion durch die Gen-Schere verhindert. Die ursprüngliche Eigenschaft geht so verloren oder wird verändert. ///



EINE GEFAHR VERGLEICHBAR DEM VOM MENSCHEN GEMACHTEN KLIMAWANDEL

Die Gentechnik ermöglicht es, viele Lebensformen mit Merkmalen entstehen zu lassen, die zuvor in den jeweiligen Arten nicht vorhanden waren. Innerhalb kurzer Zeiträume können große Mengen dieser Organismen, die nicht durch die Prozesse der Evolution angepasst wurden, in die Umwelt entlassen werden. Dabei wird mit Werkzeugen wie der Gen-Schere CRISPR/Cas längst nicht nur an Ackerpflanzen gearbeitet: Auch Versuche an Bäumen, Nutztieren, Insekten und Mikroorganismen nehmen stetig zu.

Die Risiken des Einsatzes der Gentechnik lassen sich in Analogie zum vom Menschen gemachten Klimawandel veranschaulichen: In der Geschichte des Planeten hat es bereits viele und sehr große klimatische Veränderungen gegeben. Die Vorfah-

ren der heute lebenden Arten konnten sich aber daran anpassen, weil sich die Veränderungen in der Regel über lange Zeiträume erstreckten.

Ein besonderes Problem des aktuellen Klimawandels ist die extreme Geschwindigkeit, mit der die Konzentration an Treibhausgasen und damit die Temperaturen ansteigen. Viele Arten sind nicht nur deshalb bedroht, weil ihre Lebensräume vernichtet werden, sondern auch, weil ihre Anpassungsfähigkeit überschritten wird. Was wir derzeit erleben, ist eher vergleichbar mit dem Einschlag eines Kometen als einem langsamen Übergang von einer Eiszeit in eine wärmere Phase der Erdgeschichte.

Ganz ähnlich beruhen die Gefahren der Gentechnik für die biologische Vielfalt nicht nur auf den Eigenschaften einzelner Organismen, sondern auch auf der Geschwindigkeit, mit der neue Merkmale in bestehende Populationen eingeführt werden, ohne dass die Umwelt, d.h. die anderen Arten, die Zeit hat, sich entsprechend anzupassen. Dadurch können die ökologischen Netzwerke überlastet und das Artensterben beschleunigt werden. ►

EIN GRUNDLEGENDES MISSVERSTÄNDNIS DER GENTECHNIK

Seit ihrem Ursprung in den 1960er Jahren basieren die Anwendungen der Gentechnik auf einem irreführenden Reduktionismus. Die Lebensprozesse, die Biodiversität und die Ökosysteme werden auf einen Aspekt reduziert: auf die Ebene der DNA und die Möglichkeit ihrer technischen Veränderung.

Die Vorstellung von der DNA als dem ‚Code des Lebens‘ stammt aus dem letzten Jahrhundert. Tatsächlich ist DNA die Grundlage dafür, dass bestimmte Merkmale entstehen und vererbt werden. Doch erst die Zelle gibt der DNA ihre Funktion als Gen, steuert deren Aktivität und die Entwicklungsprozesse im Organismus. Die Funktion der Gene hängt von ihrem biologischen Kontext ab [6].

Und: Zellen sind kein geschlossenes System. Sie tauschen ständig Informationen mit ihrer Umwelt aus. Bei Bedarf schalten sie Gene an und ab, beeinflussen deren Funktionen und verknüpfen diese neu. Zellen sind die zentralen Schaltstellen der Entwicklung, die Grundlage der Artenvielfalt und ihrer Koevolution [6].

Was bedeutet das für einen Umgang mit der Gentechnologie, mit deren Hilfe immer neue DNA-Moleküle designt, in die Zellen eingeschleust und in die Umwelt entlassen werden? Was bedeutet das für die Zukunft des Lebens auf diesem Planeten und seiner Biosphäre? Welches Ausmaß an gentechnischen Eingriffen können die Ökosysteme verkraften, ohne dass wir unsere eigenen Lebensgrundlagen gefährden?

In jedem Fall gilt: Die Prozesse in den Zellen oder das Funktionieren der Ökosysteme kann nicht allein aus dem genetischen Code abgeleitet, verstanden oder vorhergesagt werden. Werden diese Grundlagen missachtet, kann die Gentechnik zu einer Gefahr für die gesamte Biosphäre werden. ///



4/ alte gentechnik

DIE ERSTEN GENTECHNISCH veränderten Pflanzen wurden in den 1980er- und 90er-Jahren entwickelt und zum Anbau freigegeben. Im Mittelpunkt dieser Anwendungen stehen noch immer zwei Eigenschaften: Pflanzen mit Resistenzen gegen Herbizide (v.a. gegen das Totalherbizid Glyphosat) und/oder Pflanzen, die Insektengifte gegen Schädlinge produzieren (v.a. Bt-Toxine aus dem Bodenbakterium *Bacillus thuringiensis*) [7]. Diese Eigenschaften werden mit den ungerichteten Methoden der ‚alten Gentechnik‘ erzeugt, bei denen Gene aus anderen Arten (Transgene) mittels Genkanone oder Agrobakterien in die Pflanzen eingebracht werden.

Die Gentechnik-Pflanzen sollten im Vergleich zu konventionell gezüchteten Pflanzen vor allem weniger Pestizide benötigen und höhere Erträge erzielen. Doch in vielen Regionen führte ihr Anbau zu einem erhöhten Pestizideinsatz, denn Unkräuter und Insektenschädlinge passten sich rasch an. Deswegen werden die Pflanzen immer weiter ‚aufgerüstet‘: Als sog. ‚Stacked Events‘ produzieren sie mehrere Insektengifte und werden gleichzeitig gegen verschiedene Herbizide resistent gemacht.

Letztlich lässt sich aus der Anwendung der ‚alten Gentechnik‘ lernen, dass es den jeweiligen Firmen nicht wirklich um Nachhaltigkeit, sondern um Profit geht: Patentiertes Saatgut zusammen mit

einem dazu ‚passenden‘ Pestizid zu verkaufen, ist gewinnbringend, hinsichtlich anderer Aspekte aber höchst problematisch.

Ein anderes Fazit lautet, dass sich die Risiken für Mensch und Umwelt oft erst beim genaueren Hinsehen erkennen lassen. Diese Notwendigkeit, genauer hinschauen zu müssen, darf aber nicht dazu verleiten, die Risiken pauschal in Abrede zu stellen.

PROBLEME FÜR UMWELT & LANDWIRTSCHAFT

In einigen Regionen breiteten sich Gentechnik-Pflanzen unkontrolliert aus, sie hybridisierten zum Teil mit natürlichen Populationen. Dabei können sie auch selbst zum ‚Unkraut‘ werden, wenn sie sich untereinander kreuzen und so gegen mehrere Herbizide gleichzeitig resistent werden [7].

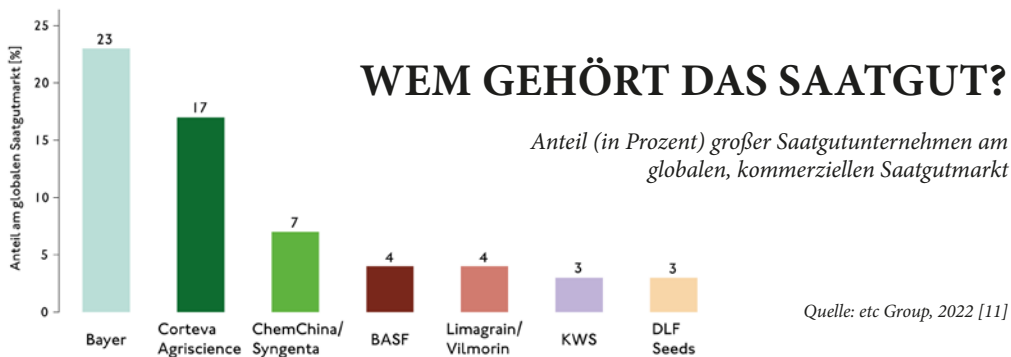
Die Nachkommen der transgenen Pflanzen weisen oft neue, unerwartete Eigenschaften auf. Beispielsweise kann sich in Spanien der insekten-giftige Gentechnik-Mais MON810 mit seiner dort vorkommenden wilden Ursprungsart, der Teosinte, kreuzen. Die Nachkommen zeigen überraschenderweise ein höheres Potential zur Ausbreitung [8]. ►

PATENTE AUF SAATGUT

Auch in anderen Regionen der Welt, in denen diese Pflanzen auf großen Flächen angebaut werden, wurden weitere unvorhergesehene Wechselwirkungen bekannt. So führte bspw. die Kombination von insektengiftigen und herbizidresistenten Gentechnik-Pflanzen für einige Schädlingslarven zu unerwarteten Vorteilen, so dass sich diese noch stärker ausbreiten können [7].

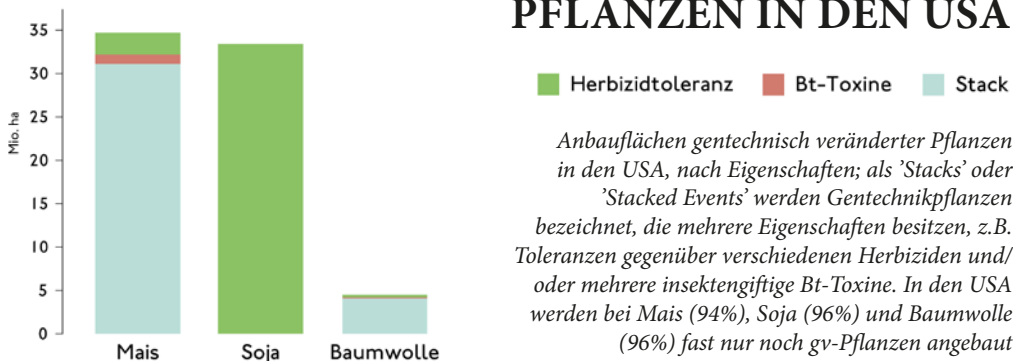
Zudem: Fehlende Regelungen, die den gentechnikfreien Anbau schützen, haben in manchen Regionen die Entwicklung der ökologischen Landwirtschaft erheblich behindert oder sogar unmöglich gemacht.

Zu den negativen Folgen des Anbaus transgener Pflanzen gehören auch die Einführung von Patenten und ein zunehmender Konzentrationsprozess bei den Saatgutfirmen. Besonders deutlich sind diese Folgen bspw. in den USA, wo Gentechnik-Pflanzen im großen Stil angebaut werden: Seit Anfang der 1990er Jahre, als die ersten gentechnisch veränderten Eigenschaften Einzug hielten, wurden mehr als 200 Saatgutproduzenten entweder aufgekauft oder mussten ihre Geschäftstätigkeit aufgeben. Heute besitzen die vier größten Unternehmen (Bayer, Corteva, ChemChina und BASF) in den USA 97 % der geistigen Eigentumsrechte auf Raps, 95 % auf Mais, 84 % auf Sojabohnen, 51 % auf Weizen und 74 % auf Baumwolle [9]. ///



Quelle: USDA, 2024 [10]

ANBAU VON GENTECHNIK-PFLANZEN IN DEN USA



5/ neue gentechnik

5.1/ PFLANZEN AUS NEUER GENTECHNIK

MIT DER NEUEN GENTECHNIK (NGT) können Pflanzen und Tiere auf eine andere Art und mit anderen Ergebnissen verändert werden, als es mit den alten gentechnischen Methoden oder der konventionellen Züchtung möglich ist. Das am häufigsten verwendete Werkzeug ist die Gen-Schere CRISPR/Cas, mit der man gezielt Gene ausschalten ('knock-out') oder auch neue Gene einfügen kann.

Schon mit kleinen gentechnischen Veränderungen, auch ohne das Einfügen zusätzlicher Gene, können neue Merkmale erzielt werden, die weit über das hinausgehen, was von der konventionellen Züchtung erwartet werden kann [12-15]. Ein Grund dafür ist, dass die Gen-Scheren die natürlicherweise ablaufenden Prozesse zur Wiederherstellung von Genen und Genfunktionen meist verhindern. Dabei sind auch komplexe Veränderungen möglich, bspw. wenn:

- ◆ mehrere Kopien eines Gens ausgeschaltet,
- ◆ miteinander gekoppelte Gene getrennt,
- ◆ durch sog. 'Multiplexing' mehrere Gene gleichzeitig verändert,
- ◆ NGT-Anwendungen wiederholt und miteinander kombiniert werden oder
- ◆ in zentrale Elemente der Genregulation eingegriffen wird.

Im Extremfall können sogar neue Arten erschaffen werden, ohne dass dafür zusätzliche Gene eingefügt werden müssen [16].

Während mit der alten Gentechnik die zusätzlichen Gene mehr oder weniger zufällig an bestimmten Stellen ins Erbgut inseriert werden, kann man mithilfe der NGTs den Ort der gentechnischen Veränderungen gezielter ansteuern. Deswegen sind die mehrstufigen Verfahren jedoch keineswegs präzise oder frei von Risiken: Auch wenn die Gen-Schere an einer Stelle im Erbgut gezielt schneidet, sind die Ergebnisse nicht wirklich vorhersagbar.

Am Ort der gentechnischen Veränderung können unerwünschte Genvarianten mit neuen Funktionen entstehen. Zudem kommt es oft zu unbeabsichtigten Insertionen (Einfügung von DNA), Deletionen (Verlust von DNA) oder auch mehrfachen Umlagerungen von längeren Abschnitten von Chromosomen. Auch Verwechslungen der zu verändernden Zielorte sind möglich ('Off-target-Effekte') [17]. ▶

ANZAHL DER MUTATIONEN

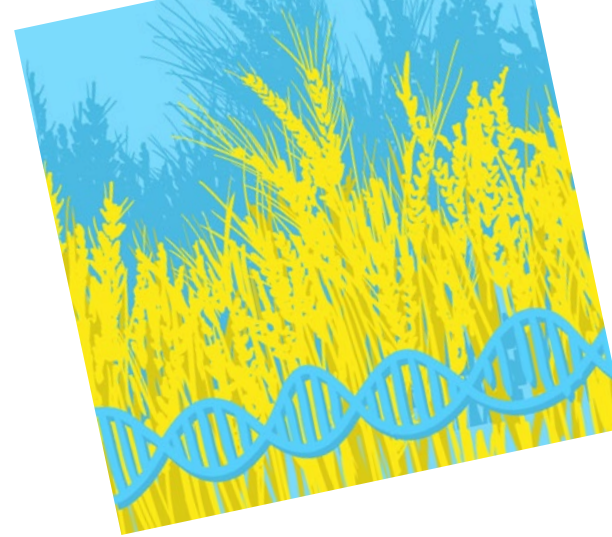
Es wird häufig hervorgehoben, dass NGTs im Vergleich zur Zufallsmutagenese (bei der Chemikalien oder Bestrahlung eingesetzt werden) eine geringere Anzahl von Mutationen hervorrufen. Doch die reine Anzahl der Mutationen ist im Hinblick auf die Risiken nicht entscheidend. Wichtig sind vielmehr der Ort der genetischen Veränderung bzw. die betroffene Genfunktion und die daraus resultierenden Eigenschaften der Pflanzen. Hier geht die Neue Gentechnik weit über das hinaus, was bei zufälligen Mutationen zu erwarten ist [12-15].

Ein Grund für diese Unterschiede sind Mechanismen, die die Evolution hervorgebracht hat, um die genetischen Grundlagen der Arten stabil zu halten. Die Genomorganisation beeinflusst die Stabilität und Wandlung des Erbguts. Wichtige Faktoren sind hier Reparaturprozesse, Genkopien, Kopplungen von Genen (gemeinsame Vererbung) oder Bereiche auf den Chromosomen, in denen die DNA bspw. besonders fest verpackt und somit besser gegen Mutationen geschützt ist als andere Bereiche (siehe Tabelle 1). Im Gegensatz zur Zufallsmutagenese können viele dieser Leitplanken der Evolution von der Gen-Schere umgangen werden [12, 18].

VIELE ARTEN UND UNTERSCHIEDLICHE EIGENSCHAFTEN

Die Pflanzenarten, die mithilfe der Neuen Gentechnik verändert werden, sind längst nicht mehr nur auf Ackerpflanzen wie Mais, Soja, Baumwolle und Raps beschränkt, die mit den Methoden der alten Gentechnik verändert wurden. Inzwischen umfassen sie diverse Arten von Obst, Gemüse, Bäumen, Sträuchern und Gräsern, Wild- und Unkräutern. Viele NGT-Pflanzen haben zudem das Potential, zu überdauern und sich auszubreiten, ohne dass sie effektiv kontrolliert werden könnten.

In den nächsten Jahren könnte eine große Anzahl von NGT-Pflanzen, die verschiedenen Arten angehören und unterschiedliche Eigenschaften aufweisen, gleichzeitig und innerhalb kurzer Zeit in die Umwelt entlassen werden. Daraus resultiert eine erhebliche Belastung für die Ökosysteme, z.B. durch gestörte Interaktionen zwischen NGT-Pflanzen und assoziierten Mikroorganismen oder Bestäubern. Hinzu kommen Auswirkungen auf weitere Tiere, die sich von den Pflanzen ernähren, sowie die Gefährdung der biologischen Vielfalt durch die invasive Ausbreitung von NGT-Pflanzen und deren Nachkommen.



GLUTENWEIZEN

Glutenproteine in Weizenkörnern stehen im Verdacht, Auslöser einer Reihe von glutenbedingten Erkrankungen zu sein, darunter auch die Darmkrankheit Zöliakie. Zu den Hauptbestandteilen von Gluten in Backwaren zählen v.a. α -Gliadine. Diese gehören zu einer großen Genfamilie, die in mehreren Kopien an verschiedenen Stellen im Weizen-genom vorhanden sind. Mithilfe der Gen-Schere CRISPR/Cas wurden 35 von 45 α -Gliadin-Genen ausgeschaltet [19]. Dadurch entsteht ein bisher einzigartiges Muster der gentechnischen Veränderung, das durch konventionelle Züchtung nicht erreicht werden kann. In der Folge kann es zu unbeabsichtigten Veränderungen von Inhaltsstoffen oder auch zur Entstehung von neuen Eiweißstoffen kommen, die ihrerseits Krankheiten auslösen können. Diese gentechnischen Veränderungen führen zu komplexen Fragen bei der Risikoprüfung, was u.a. auch die Europäische Lebensmittelbehörde EFSA festgestellt hat [20]. Da die Stoffwechselwege rund um die Produktion von Gluten auch eine Rolle bei der Reaktion auf Hitze- und Trockenstress spielen, kann sich die gentechnische Veränderung außerdem auch ungewollt auf die Hitze- und/oder Trockentoleranz der Pflanzen auswirken.

FRÜHLÜHENDE PAPPEL

Bäume brauchen viele Jahre, um ihre ersten Blüten zu entwickeln. Erst dann stehen sie für die weitere Züchtung bzw. Kreuzungen zur Verfügung. Mit nur wenigen kleinen gentechnischen Veränderungen und ohne das Hinzufügen neuer Gene wurde mithilfe der Gen-Schere CRISPR/Cas bei Pappeln die Zeitspanne bis zur ersten Blüte von mehr als sieben Jahren auf wenige Monate radikal verkürzt [21]. Damit ist es theoretisch möglich, ähnlich wie bei einjährigen Ackerpflanzen, diese Pappeln aus Neuer Gentechnik innerhalb kurzer Zeit für die weitere Kreuzung und Selektion verfügbar zu machen und dadurch den Anbau und die Vermarktung deutlich zu beschleunigen. Werden diese Pappeln freigesetzt, könnte sich diese Eigenschaft auch in den natürlichen Pappelbeständen verbreiten und bspw. den Erhalt der unter Naturschutz stehenden Schwarzpappel gefährden. Auch die Funktion der Ökosysteme wäre gefährdet, da Pappeln mit einer Vielzahl von Arten in Wechselwirkung stehen, insbesondere mit Insekten, darunter auch geschützte Schmetterlings- und Käferarten [22]. ►



AGROSPRIT-LEINDOTTER

Als eine der ältesten Kulturpflanzen Europas wird Leindotter u.a. für die Gewinnung von Speiseöl genutzt. In den USA wurden Leindotter-Pflanzen mit verändertem Ölqualität entwickelt, die zur Produktion von Agrosprit eingesetzt werden sollen. Dazu wurde deren Erbgut mithilfe der Gen-Schere CRISPR/Cas an insgesamt 18 Stellen verändert [23]. In der Folge bilden die Pflanzen kaum noch sog. mehrfach ungesättigte Fettsäuren.

Diese Muster der gentechnischen Veränderung und die veränderte Öl- und Fettsäurezusammensetzung sind mit konventioneller Züchtung kaum zu erreichen. Gentechnik-Leindotter kann sich in der Umwelt ausbreiten und seine Gene mit verwandten Arten tauschen. Darüber hinaus ist Leindotter eine wichtige Pflanzenart für Bestäuber, für die mehrfach ungesättigte Fettsäuren ein unverzichtbarer Bestandteil ihrer Nahrung ist. Bei einem Mangel können Orientierung, Wachstum und Fortpflanzung von Bienen beeinträchtigt werden [24]. Probleme können auch entstehen, wenn die Gentechnik-Ölsaaten versehentlich in Lebens- und Futtermittel gelangen.

GABA-TOMATEN

In japanischen Supermärkten werden die ersten Tomaten aus Neuer Gentechnik als ‚Beruhigungsmittel‘ mit schlaffördernder und blutdrucksenkender Wirkung verkauft. Die mit CRISPR/Cas veränderten Tomaten weisen im Vergleich zu konventionell gezüchteten Tomaten eine deutlich höhere Konzentration des Botenstoffs γ -Aminobuttersäure (GABA) auf [25]. Obwohl dafür nur ein Gen verändert werden musste, war es zuvor nicht gelungen, entsprechende Tomaten mit konventionellen Methoden zu züchten. GABA ist ein hemmender Neurotransmitter im zentralen Nervensystem, der u.a. den Blutdruck senken kann. Gleichzeitig beeinflusst GABA bspw. das Pflanzenwachstum, die Resistenz der Pflanzen gegen Umweltstress und andere Stoffwechselfunktionen. Daher ist davon auszugehen, dass sich der gentechnische Eingriff auf mehreren Ebenen auswirkt.

Weder die behaupteten positiven Effekte noch die gesundheitlichen Risiken der Gentechnik-Tomaten sind bisher genauer untersucht worden. Allerdings wird schwangeren und stillenden Müttern sowie Kleinkindern vom Verzehr dieser Früchte abgeraten [26].

5.2/ TIERE AUS NEUER GENTECHNIK

Mithilfe von Neuer Gentechnik werden v.a. Labor- und Nutztiere verändert, aber auch an Wildtieren wie Insekten oder Nagetieren werden Experimente durchgeführt. Es gibt sogar Projekte, die zum Ziel haben, bereits ausgestorbene Tiere wie das Mammut per Gentechnik wiederauferstehen zu lassen (s.o.).

Die Folgen für die Umwelt sind oft schwer einschätzbar. Zudem werfen die eingesetzten Verfahren (wie die Gen-Schere CRISPR/Cas sowie das Klonen oder der Embryotransfer) Fragen zum Tierschutz auf.

SCHWEINE, RINDER, FISCHE

Viele Anwendungen an Nutztieren wie Schweinen und Rindern zielen auf eine Zunahme der Muskelmasse beziehungsweise einen höheren Ertrag und sind deswegen ethisch zweifelhaft [27]. In Japan werden bereits Meerbrassen [28] und Kugelfische [29] vermarktet, die schneller zunehmen, weil ihnen mittels Neuer Gentechnik künstliche Gendefekte zugefügt wurden. Andere Anwendungen zielen bspw. auf Resistenzen gegen Krankheitserreger bei Schweinen, die insbesondere in der Massentierhaltung große Probleme verursachen [30].

Untersuchungen an Zellen von Mensch und Tier zeigen, dass es beim Einsatz der Gen-Scheren zu erheblichen Nebenwirkungen wie größeren unbeabsichtigten Umlagerungen an den Chromosomen kommen kann, wodurch sich unter anderem das Risiko für Krebserkrankungen erhöht [31].

INSEKTEN & NAGETIERE

Für Insekten und wildlebenden Nagetieren werden unter anderem sog. ‚Gene Drives‘ entwickelt, häufig mit dem Ziel der Dezimierung natürlicher Populatio-

nen. Mit dem Begriff ‚Gene Drive‘ werden Methoden zur gentechnischen Veränderung von Organismen bezeichnet, bei denen sich künstliche Genkonstrukte in den nachfolgenden Generationen deutlich schneller ausbreiten als bei normaler Vererbung [32]. Diese Gene Drives bieten erstmals die technische Möglichkeit, nicht nur bestimmte Gene zu verändern, sondern diese Veränderungen auch innerhalb der ganzen Art zu verbreiten. Der eigentliche Vorgang der gentechnischen Veränderung wird dabei aus dem Labor in die Umwelt verlegt, weswegen hier der Begriff ‚Outdoor-Gentechnik‘ verwendet wird. Der Einsatz von Gene Drives geht mit hohen Risiken einher: Die dadurch verursachten gentechnischen Veränderungen und deren Folgen sind zu wenig vorhersagbar und kontrollierbar. Die Schäden an der Artenvielfalt können irreversibel sein [33].

MÄUSE & AFFEN

Die Anzahl der Versuche mit gentechnisch veränderten Tieren ist in den letzten Jahren stetig gestiegen. Dies ist auch durch den technisch relativ einfachen und kostengünstigen Einsatz der Gen-Schere CRISPR/Cas bedingt. Mit diesem Werkzeug können innerhalb weniger Monate ‚maßgeschneiderte‘ Versuchstiere mit bestimmten Gendefekten erzeugt werden, worauf sich kommerzielle Anbieter u.a. in den USA spezialisiert haben. Dabei ist auch ein Trend zur Ausweitung der eingesetzten Tierarten zu beobachten. Neben Mäusen und Ratten werden auch immer häufiger andere Tierarten und sogar Primaten eingesetzt [34]. ▶



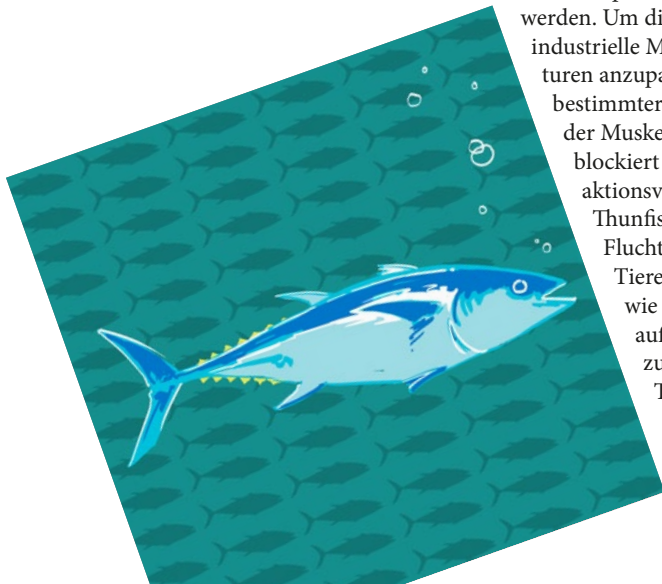
HORNLOSE RINDER

Die Firma Recombinetics hatte Rinder schon 2016 mittels Neuer Gentechnik so verändert, dass ihnen keine Hörner wachsen. Drei Jahre später stellte die US-Lebensmittelbehörde FDA jedoch fest, dass ungewollte Veränderungen im Erbgut der NGT-Rinder übersehen worden waren, und stoppte die Marktzulassung [35]. Es zeigte sich, dass sich neben der Genvariante für Hornlosigkeit auch Antibiotika-Resistenzgene ins Erbgut eingebaut hatten und diese ebenfalls an die nächsten Generationen weitergegeben wurden. Die unerwünschten Genkonstrukte stammten von gentechnisch veränderten Bakterien, die aus technischen Gründen bei den Herstellungsverfahren verwendet wurden. Wären diese NGT-Tiere in der Zucht eingesetzt worden, hätten sich die ungewollten Veränderungen rasch in den Zuchtbeständen ausbreiten können. Dieses Beispiel zeigt, dass die häufig als ‚minimaler Eingriff‘ dargestellten Verfahren der Neuen Gentechnik nicht so präzise sind wie behauptet und zu unbeabsichtigten Effekten mit weitreichenden Folgen führen können.



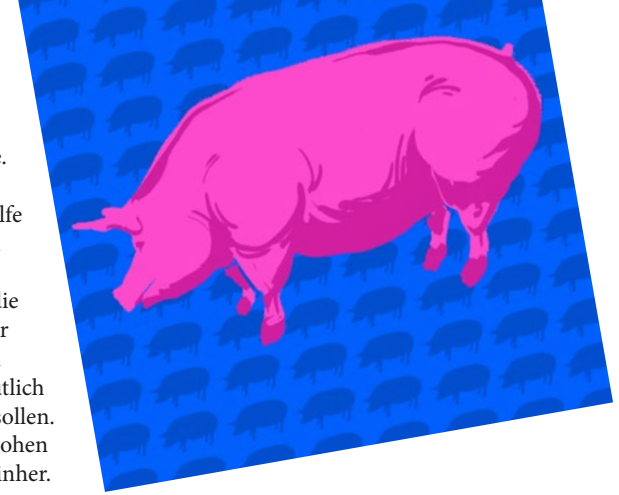
THUNFISCHE MIT MUSKELSCHWÄCHE

Thunfische reagieren auf entsprechende Reize reflexartig mit schnellem Fluchtverhalten. Dieser natürliche Reflex führt in Aquakulturen zu hohen Sterblichkeitsraten, da die jungen Thunfische mit sehr hohen Geschwindigkeiten gegen die Wände der Tanks prallen, in denen sie großgezogen werden. Um die Thunfische besser an die industrielle Massentierhaltung in Aquakulturen anzupassen, wurde die Übertragung bestimmter Signalreize, die zum Auslösen der Muskelkontraktion benötigt werden, blockiert [36]. Dadurch wird das Reaktionsvermögen gestört und die NGT-Thunfische zeigen ein langsames Fluchtverhalten. Bei Menschen (und Tieren) sind diverse Erbkrankheiten wie Muskelschwäche bekannt, die auf ähnliche Gendefekte zurückzuführen sind. Kurz gesagt, die Thunfische wurden per Gentechnik krank gemacht, damit man sie besser mästen kann.



„DOPPELMUSKELSCHWEINE“

Ein erhöhtes Muskelwachstum zur Steigerung der Fleischproduktion ist eines der wichtigsten Ziele in der Tierindustrie. Inzwischen gibt es zahlreiche Beispiele verschiedener Tierarten, bei denen mithilfe der Neuen Gentechnik eine Genfunktion blockiert wird, die das Muskelwachstum reguliert [27]. Dadurch vermehren sich die Muskelzellen viel stärker, als das sonst der Fall ist. Das Ergebnis sind unter anderem sog. ‚Doppelmuskelschweine‘, die ein deutlich höheres Gewicht auf die Waage bringen sollen. Diese Projekte gehen jedoch häufig mit hohen Tierverbrauchszahlen und viel Tierleid einher. So ist es nicht ungewöhnlich, dass bspw. von 1.000 NGT-Embryonen nur zehn Ferkel die gewünschten gentechnischen Veränderungen tragen [37]. Häufig leiden die Gentechnik-Tiere – nicht zuletzt aufgrund der angewandten Klonverfahren – an Krankheiten oder Missbildungen, werden tot geboren oder sterben nach wenigen Monaten. Auch das übermäßig starke Muskelwachstum ist ein Problem, es kann u.a. zu Schwierigkeiten bei der Geburt führen.



GENE DRIVE-INSEKTEN

Mit ‚Gene Drives‘ werden genetische Elemente bezeichnet, mit denen die ‚normale‘ Vererbung nach den Mendelschen Regeln außer Kraft gesetzt werden kann. Das Ziel ist dabei, die gentechnischen Veränderungen im ‚Optimalfall‘ an alle Nachkommen zu vererben. Gene Drives sind ein zentrales Werkzeug der ‚Outdoor-Gentechnik‘: Natürliche Populationen sollen durch die Ausbreitung nachteiliger Merkmale reduziert, ganz ausgelöscht oder durch gentechnisch veränderte Populationen ersetzt werden. Gene Drives sollen u.a. zur Bekämpfung verschiedener Mückenarten verwendet werden, die Malaria übertragen [38]. Andere mögliche Anwendungen betreffen ‚Schädlinge‘ in der Landwirtschaft [39]. Das Problem: Einmal freigesetzt, können diese Organismen schwere Schäden an den Ökosystemen verursachen. Derartige Freisetzungen sind in der Praxis kaum wirksam kontrollierbar. ///



6/ gentechnisch veränderte mikro- organismen

NEBEN PFLANZEN und Tieren stehen auch einzellige Mikroorganismen wie Bakterien oder Mikroalgen im Fokus gentechnischer Anwendungen.

Gentechnisch veränderte Bakterien sollen unter anderem als sog. ‚Biologicals‘ auf dem Acker eingesetzt werden, um die Aufnahme von Stickstoff, Phosphor oder Kalium bei Nutzpflanzen zu verbessern oder deren Widerstandsfähigkeit gegen hohe Salzgehalte und Trockenheit zu erhöhen. Ziel ist die Steigerung der Ernteerträge [40-42].

In anderen Projekten wird das Mikrobiom im Darm von Nutztieren gentechnisch verändert, um Krankheitserreger wie Salmonellen zu bekämpfen oder die Futterverwertung zu verbessern [43]. Bei Bienen sollen Bakterien im Darm bestimmte Stoffe freisetzen, um beispielsweise den Befall mit Parasiten abzuwehren [44].

Bei Mikroalgen (einzelligen Algen) konzentrieren sich die meisten Anwendungen auf die Ölgewinnung für die Produktion von Kraftstoffen. Um ausreichend große Mengen produzieren zu können, müssten diese in (halb-)offenen Tanks gehalten werden, was ein Entkommen in die Umwelt nicht verhindern könnte [27].

Auch als Pestizide könnten gentechnisch veränderte Mikroorganismen eingesetzt werden.

Beispielsweise werden Bakterien und Pilze gentechnisch so verändert, dass sie toxische Substanzen produzieren [45].

UNKONTROLLIERBARE RISIKEN

Mikroorganismen wie Bakterien haben ein sehr hohes Potential, sich über verschiedene Wege unkontrolliert auszubreiten. Sie können auch unter ungünstigen Wachstumsbedingungen sehr lange in der Umwelt überdauern. Zudem verbreiten sich gentechnische Veränderungen zwischen Bakterien sehr viel einfacher und schneller als bei Pflanzen oder Tieren. Infolge sehr großer Populationen und häufiger Zellteilungen können rasch unvorhergesehene Eigenschaften auftreten.

Gelangen verschiedene Gentechnik-Mikroorganismen gemeinsam in die Umwelt (unter Umständen auch zusammen mit gentechnisch veränderten Pflanzen und Tieren), ist eine Vorhersage der Interaktionen und der unbeabsichtigten Auswirkungen oft unmöglich. ///

Zellen sind mit Reparatur- und Kontrollmechanismen ausgestattet, die Veränderungen im Genom beeinflussen können. Diese ‚Leitplanken‘ sind wichtig für die genetische Stabilität der Arten und deren weitere Entwicklung.



7/ synthetische biologie ,SynBio‘

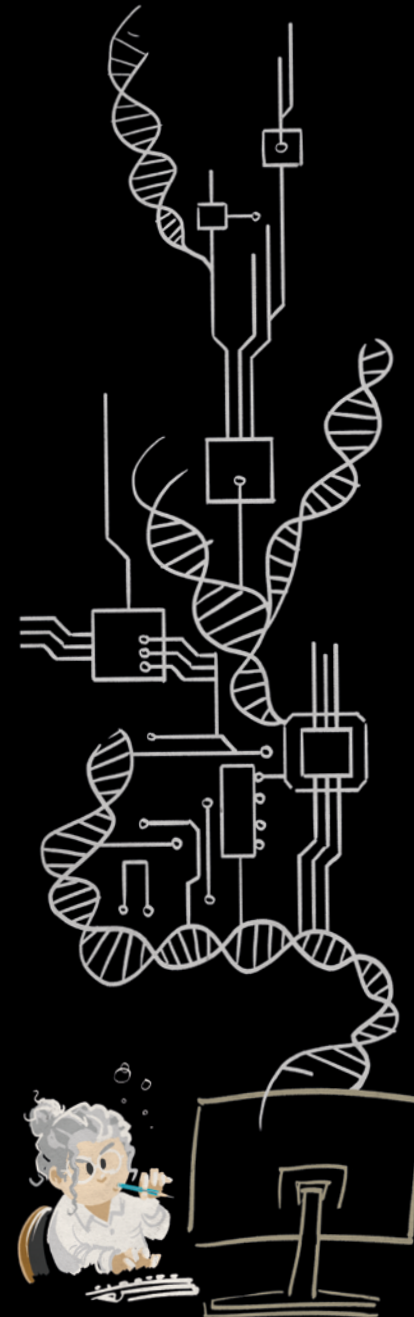
DIE SYNTHETISCHE BIOLOGIE verfolgt die Idee, Lebewesen und ihr Erbgut von Grund auf neu zu konstruieren und dabei ‚maschinenhaft‘ nach technischen Zielen und wirtschaftlichen Interessen zu gestalten. Dieses Konzept hat sich bisher nur zum Teil realisieren lassen.

Ein grundlegendes Werkzeug der Synthetischen Biologie – die Synthese von DNA und RNA im Labor – ist allerdings zu einem wichtigen und vielfach eingesetzten Hilfsmittel geworden: Die Anwendungsgebiete reichen von der Produktion von Impfstoffen bis zur Synthese des gesamten Erbguts von Viren, Bakterien und Hefepilzen. Auch bei der Gen-Schere CRISPR/Cas kommt bspw. synthetisierte RNA zum Einsatz, mit deren Hilfe sie ihr Ziel ansteuert.

GENE WIE BAUKLÖTZE

Bei vielen Anwendungen der Synthetischen Biologie hat sich deutlich gezeigt, dass man auf der Grundlage von DNA nur wenig über die Eigenschaften von neuen Organismen vorhersagen kann. Versuche, ‚Minimal‘-Organismen auf wenige ‚essentielle‘ Gene zu reduzieren, scheiterten oft [46]. Der Versuch, sog. ‚Biobricks‘ aus DNA-Sequenzen zu schaffen, die sich wie Bauklötze zu beliebigen Funktionseinheiten zusammenbauen lassen, war nur selten erfolgreich [47].

Gerade in der Synthetischen Biologie zeigt sich, dass der reduktionistische Ansatz, das Leben nur auf die Ebene von DNA zu reduzieren, oft ein Irrweg ist. Dies zeigt sich häufig schon auf der Ebene von relativ einfach aufgebauten Bakterien [46]. Umso mehr gilt dies für komplexere Lebensformen wie Tiere und Pflanzen. Wer das Erbgut eines Mammuts synthetisieren kann, ist längst noch nicht in der Lage, die ausgestorbenen Tiere wieder zum Leben zu erwecken.



WAS KÖNNEN ,XENOBOTS‘ ?

Auch in der Synthetischen Biologie werden die Forschungsansätze weiterentwickelt: Mithilfe von Künstlicher Intelligenz sollen die Abläufe in den Zellen digitalisiert und dadurch verfügbarer für technische Anwendungen werden. Zusätzlich zur Synthese von DNA wird überlegt, ganze zelluläre Systeme zu neuen Lebensformen zusammensetzen. Bekannt wurden unter anderem sog. ‚Xenobots‘, die aus embryonalen Zellen von Fröschen entwickelt wurden [48]. Die unförmigen Gebilde können sich schwimmend fortbewegen und miteinander interagieren. Sie sind jedoch nicht in der Lage zu fressen und können sich nicht auf übliche Weise fortpflanzen. Nach relativ kurzer Zeit gehen sie zugrunde. ///

8/ gentechnische veränderung der umwelt ,outdoor-gentechnik‘

DIE TRANSFORMATION der gentechnisch veränderten Organismen erfolgt nicht mehr ausschließlich im Labor. Vielmehr gibt es inzwischen mehrere Projekte, bei denen natürliche Populationen von Pflanzen oder Tieren direkt in ihrer Umwelt verändert werden sollen. Manche Verfahren sind dafür geeignet, gentechnische Veränderungen innerhalb einer ganzen Art zu verbreiten. Mit derartigen Eingriffen in die genetische Infrastruktur (vgl. Einleitung) der biologischen Vielfalt können Arten ausgelöscht und Ökosysteme zerstört werden.

SELBST- AUSBREITENDE TRANSGENE

Bereits freigesetzt wurden u.a. transgene Mücken in Brasilien, die sich mit den natürlichen Populationen paaren und dabei ihre künstlichen Gene an andere Mücken weitergeben. Das Ziel war hier, eine gentechnisch bedingte Unfruchtbarkeit bei den Insekten zu verbreiten, wodurch die Mückenpopulationen verkleinert und damit das Risiko der Übertragung von Krankheiten wie Dengue-

Fieber verringert werden sollte. Die Ergebnisse sind umstritten [49]. Ähnliche Ansätze wurden auch für landwirtschaftliche ‚Schädlinge‘ wie die Olivenfliege entwickelt [50].

GENE DRIVES

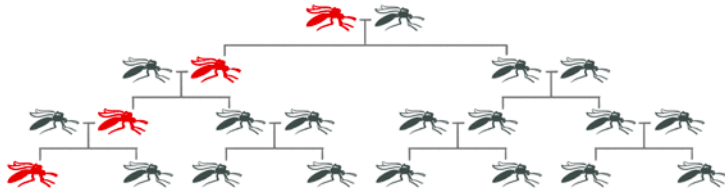
Künstliche Genkonstrukte können über Gene Drives besonders schnell verbreitet werden: Hier erfolgt die Vererbung veränderter Gene mit einer viel höheren Wahrscheinlichkeit, als das sonst der Fall ist. Im Ergebnis können sich die jeweiligen Eigenschaften sehr viel schneller ausbreiten und so große Populationen gentechnisch verändert, dezimiert oder auch ausgerottet werden. Gene Drives wurden bereits für die Manipulation von Hefepilzen [51], Insekten [52], Säugetieren [53] und Pflanzen [54] entwickelt. Damit sollen u.a. die Übertragung von Krankheiten, invasive Arten und ‚Unkräuter‘ bekämpft werden. Aber auch die Verbreitung erwünschter Eigenschaften (wie eine Umwandlung von Wild- zu Ackerpflanzen) wird diskutiert.

Mithilfe der Gen-Schere CRISPR/Cas können zusätzliche Gensequenzen eingefügt oder auch wichtige Genfunktionen blockiert werden. Dabei können Reparaturprozesse und Sicherheitsmechanismen in den Zellen umgangen werden. Mittels Gentechnik können so wichtige (artbildende) Eigenschaften verändert werden, die sich durch Züchtung kaum beeinflussen lassen. Deswegen müssen gentechnisch veränderte Pflanzen eingehend auf Risiken untersucht werden.

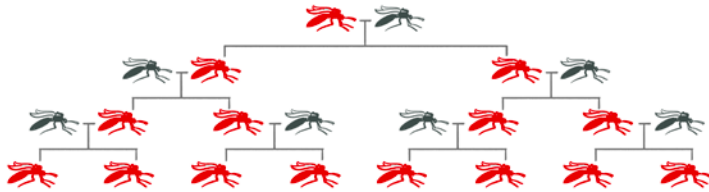


GENE DRIVES

NORMALE VERERBUNG



VERERBUNG EINES GENE DRIVES



MIT DEM BEGRIFF ‚GENE DRIVE‘ werden Methoden zur gentechnischen Veränderung von Organismen bezeichnet, bei denen sich künstliche Genkonstrukte in den nachfolgenden Generationen deutlich schneller ausbreiten als bei normaler Vererbung. Diese Gene Drives bieten erstmals die technische Möglichkeit, nicht nur bestimmte Gene zu verändern, sondern diese Veränderungen auch innerhalb der ganzen Art zu verbreiten. Der eigentliche Vorgang der gentechnischen Veränderung wird dabei aus dem Labor in die Umwelt verlegt, weswegen hier der Begriff ‚Outdoor-Gentechnik‘ verwendet wird. Der Einsatz von Gene Drives geht mit hohen Risiken einher. Gene Drives können in natürlichen Populationen eine mutagene Kettenreaktion auslösen, die dazu führt, dass sich diese selbst ausrotten. ///

Quellen im Text

GENTECHNIK-VIREN

Auch die Freisetzung von synthetischen Viren könnte dazu dienen, Pflanzen und Tiere in ihrer Umwelt gentechnisch zu verändern. Beispielsweise könnten diese Viren dazu genutzt werden, zusätzliche Gene in das Erbgut von Ziel-Populationen einzuschleusen. Als eine mögliche Anwendung wird diskutiert, die Übertragung von Krankheitserregern von Wildtieren wie Fledermäusen auf den Menschen nicht durch Impfungen zu verhindern, sondern durch eine gentechnische Veränderung der Wildpopulationen. Diese Veränderung könnte über die Infektion mit Gentechnik-Viren erreicht werden [55].

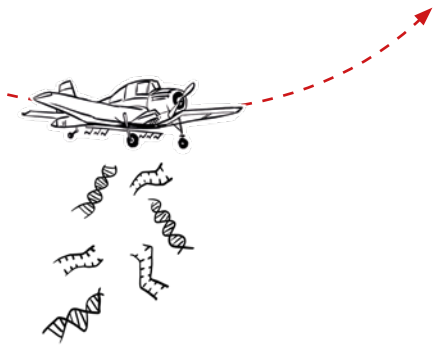
DNA UND RNA ALS WIRKSTOFF IN SPRAYS

DNA und RNA können künstlich synthetisiert und beispielsweise in Sprays eingesetzt werden. Diese Sprays können über Blätter von Pflanzen oder unter Umständen auch über die Haut von Tieren in die Zellen gelangen und dort in den Stoffwechsel eingreifen, das Erbgut verändern oder wichtige Genfunktionen blockieren. Eine Möglichkeit ist der Einsatz dieser Moleküle als Pestizide auf dem Acker: Insekten wie der Kartoffelkäfer oder auch Unkräuter sollen so bekämpft werden. Dabei können über RNA-Sprays, die ähnlich wie Pestizide versprüht werden sollen, lebenswichtige Genfunktionen blockiert werden, ohne dass die Tiere oder Pflanzen selbst gentechnisch verändert werden [56].

GENTECHNISCH VERÄNDERTE MIKROORGANISMEN

Eine weitere mögliche Anwendung der Outdoor-Gentechnik sind gentechnisch veränderte Bakterien, die per Gentransfer die Gen-Schere CRISPR/Cas an andere Bakterien ihrer Mikrobengesellschaft übermitteln können. Derartige NGT-Bakterien sollen u.a. bei Tierfutter als Zusatzstoffe beigemischt werden [43].

Bei anderen Anwendungen ist geplant, Bakterien, die mit Pflanzen oder Tieren in Symbiose leben, gentechnisch so zu verändern, dass sie Botenstoffe (RNA) produzieren, die die Eigenschaften ihrer ‚Wirt‘ beeinflussen (Paratransgenese). Erforscht wird bspw. die gentechnische Veränderung von Bakterien im Darm von Bienen, um diese resistent gegen Parasiten oder Pestizide zu machen [44].

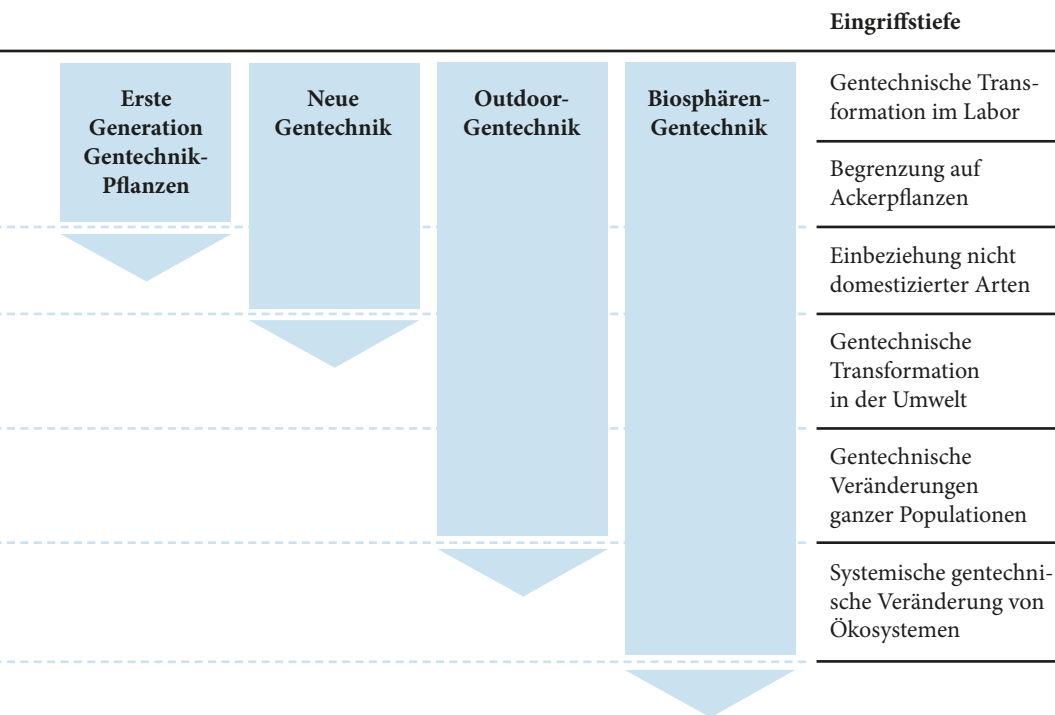


RISIKEN NICHT AUSREICHEND KALKULIERBAR

Viele Anwendungen der Outdoor-Gentechnik sind in ihren Wirkungen nicht ausreichend vorhersagbar: Werden bspw. künstliche Gene über Gene Drives verbreitet, treffen diese im Erbgut von Wildpopulationen oft auf spezielle Genvarianten und dadurch bedingte Wechselwirkungen. Die Unterschiede in den ‚genetischen Hintergründen‘ sind bei Wildpopulationen wesentlich größer als bei gezüchteten (domestizierten) Pflanzen oder Tieren. Dadurch können bei den Nachkommen der Gentechnik-Organismen neue Eigenschaften ▶

und Risiken auftreten, die sich von denen der ursprünglich freigesetzten Gentechnik-Organismen deutlich unterscheiden [33].

In diesen Fällen ist die bisherige Praxis der Risikobewertung und Zulassungsverfahren nicht mehr ausreichend. Diese wurde für die Risikoprüfung von Ackerpflanzen entwickelt, die oft nicht in der Umwelt überdauern können und sich nicht ausbreiten sollen. Doch bei der Outdoor-Gentechnik wird die gentechnische Transformation in die Umwelt verlegt; weder Raum noch die Dauer der Zeit der Freisetzung noch die möglichen Interaktionen mit der Umwelt sind ausreichend vorhersagbar oder begrenzt. Das Nichtwissen ist deutlich größer als das Wissen. Und die Risiken, schwerwiegende Schäden auszulösen, übertreffen die Möglichkeiten zur Kontrolle bei Weitem. In Zusammenhang mit Gene Drives wird sogar vor einem Ökozid gewarnt [57].



Mit gentechnischen Verfahren wird immer tiefer in die Ökosysteme eingegriffen. Bei der ersten Generation gentechnisch veränderter Pflanzen erfolgte die Transformation im Labor und Freisetzung waren auf Ackerpflanzen beschränkt. Die Neue Gentechnik wird zunehmend auch bei nicht domestizierten Pflanzen- und Tierarten eingesetzt, die auch jenseits der Ackerflächen vorkommen (Wildpflanzen, Insekten). Bei der Outdoor-Gentechnik erfolgt die gentechnische Transformation direkt in der Umwelt (auf dem Acker und darüber hinaus). Dazu werden Gentechnik-Organismen mit dem Ziel freigesetzt, natürliche Populationen der gleichen oder anderer Arten gentechnisch zu verändern (z.B. durch ‚Gene Drives‘). Die systematische gentechnische Veränderung kann ganze Ökosysteme betreffen (Biosphären-Gentechnik). Es ist zu erwarten, dass der Einsatz von Künstlicher Intelligenz diese Entwicklungen noch wesentlich beschleunigen wird. (Quellen im Text)

9/ gentechnik & künstliche intelligenz ,KI‘

IM VERGLEICH zur ‚alten Gentechnik‘ hat die Erfindung der Gen-Schere CRISPR/Cas (‚Neue Gentechnik‘) für eine Art Quantensprung beim Tempo der Entwicklung, der Art und der Anzahl der Anwendungen (und möglicher Freisetzung) gesorgt. Ein ähnlicher Effekt könnte durch die Kombination von KI und Gentechnik eintreten (‚KI-Gentechnik‘).

Ein wesentlicher Schub wird bspw. bei der Weiterentwicklung von Methoden und Techniken wie neuen Gen-Scheren [58] und Gene Drives [59] erwartet, aber auch in der Pflanzenzucht [60] oder bei Projekten wie der Wiederbelebung des Mammuts.

Die Auswertung großer Datenmengen und der Einsatz sog. ‚generativer KI‘, also Künstlicher Intelligenz, die nicht nur auswertet, sondern selbst etwas ‚erschafft‘ bzw. ‚hervorbringt‘, wird künftig im Bereich der Gen- und Biotechnologie eine zentrale Rolle spielen: In den letzten Jahrzehnten wurden riesige Datenmengen über Gene und Stoffwechselwege digitalisiert und gesammelt. Für ihre Auswertung und Verwendung gibt es eine

stetig wachsende Zahl von KI-Projekten [siehe z.B. 59–61].

Eingesetzt werden können entsprechende Programme u.a. bei der Entwicklung von Molekülen (Impfstoffe, Medikamente), gentechnisch veränderten Organismen und biologischen Waffen. Gleichmaßen betroffen sind die Bereiche *Health* (z.B. Bewertung von Wirkstoffen), *Biosecurity* (u.a. missbräuchliche Anwendungen von Daten pathogener Keime) und *Biosafety* (u.a. Freisetzung von Gentechnik-Organismen).

Darüber, dass Gentechnik und Synthetische Biologie, gerade in Kombination mit Künstlicher Intelligenz, mit Risiken einhergehen, ist sich eine wachsende Anzahl von ExpertInnen einig [62–65]. Im Fokus stehen dabei missbräuchliche Anwendungen wie im Labor hergestellte Viren und dadurch mögliche Pandemien. Diese Sorgen erscheinen sehr berechtigt.

Aber auch der Einsatz der Gentechnik in der Landwirtschaft und die Freisetzung von gentechnisch veränderten Organismen kann sich unter diesen Bedingungen rasch zu einem unkontrollierbaren Szenario entwickeln. ►

Potentieller Gebrauch wie Missbrauch sind oft schwer eingrenzbar und nicht eindeutig zu trennen [65]. So können Daten über das Erbgut gefährlicher Viren sowohl zur Entwicklung von Impfstoffen als auch zur Entwicklung noch infektiöserer Virusvarianten genutzt werden [62-65].

AUTOMATISIERUNG DER GENTECHNIK

Mithilfe von (generativer) KI ist es möglich, die Synthese von DNA bis hin zu ganzen Chromosomen zu automatisieren [66]. Dabei gibt es auf der Ebene der Gensynthese keine technischen Grenzen für gentechnische Veränderungen und die Neukombination von Genen. Entsprechende Genkombinationen lassen sich in Zellen überführen, die Reaktionen mit entsprechenden Programmen messen und auswerten. Die Daten können dann zur weiteren Optimierung genutzt werden. Man bezeichnet dieses Vorgehen als ‚Design-Build-Test-Learn‘ (DBTL)-Zyklen. Diese werden so oft wiederholt, bis man ein erwünschtes Ergebnis erzielt. Der Mensch macht dabei die Zielvorgaben und übernimmt die Rolle von technischen AssistentInnen, die KI führt die Regie.

Ein prominentes Beispiel, bei dem KI eine wichtige Rolle spielt, ist die Software, die die Firma Colossal zur ‚Wiederauferstehung‘ des Mammuts entwickelt hat (siehe oben). Derartige Programme können sowohl zum Design als auch zur Synthese von großen Abschnitten von Chromosomen genutzt werden. Auch bei weniger spektakulären Lebensformen sollen große Teile des Genoms verändert werden. Automatisierte Verfahren können hier eine große Rolle spielen, u.a. weil sich diese gentechnischen Veränderungen oft über viele, sich wiederholende Teilschritte erstrecken.

KONVERGENZ VON KI UND OUTDOOR-GENTECHNIK

KI-Gentechnik erlaubt u.a. das Auffinden und Vergleichen bestimmter Genvarianten und Einschätzungen über deren Einfluss auf Zellen und

Organismen [67]. Dabei kann die KI auch Daten über die Umwelt einbeziehen, um zum Beispiel Interaktionen zwischen Pflanzen und Bodenorganismen [68] abzuschätzen.

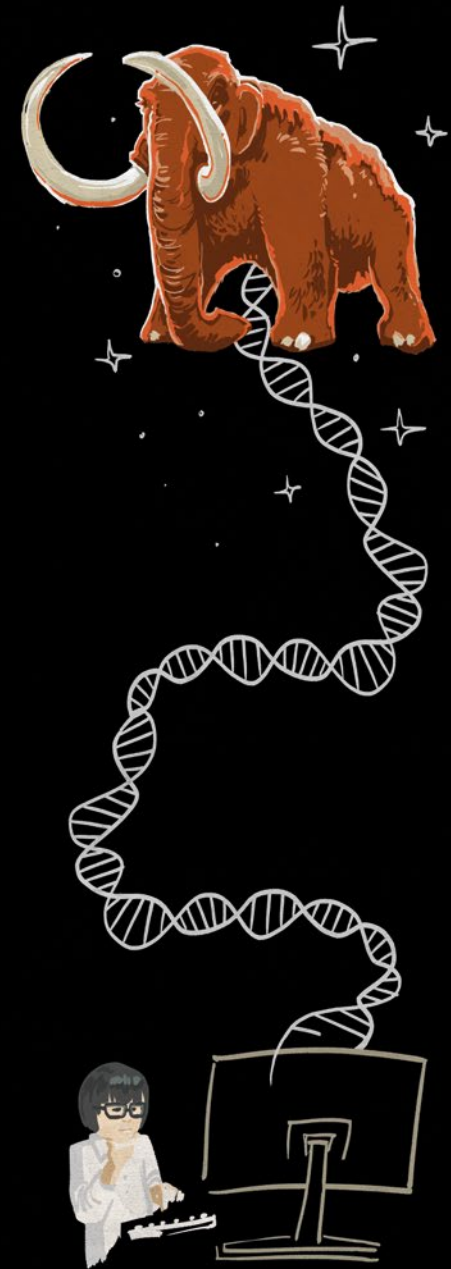
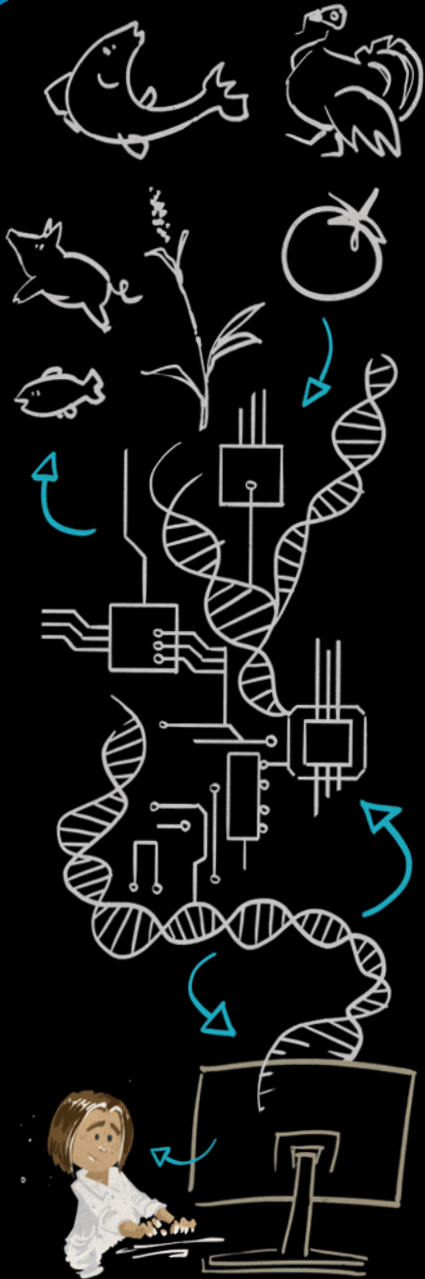
Hier ergeben sich besondere Synergien mit der Outdoor-Gentechnik, bei der es oft um besonders große Datensätze mit vielen Unbekannten geht. So ermöglicht KI bspw. die Simulation von komplexen Interaktionen zwischen Pflanzen und Bakterien oder die Modellierung der Entwicklung in Populationen transgener Insekten. Dabei akkumulieren sowohl die Ungewissheiten der Gentechnik als auch die der KI. Zugleich wird durch generative KI die Geschwindigkeit, mit der bspw. neue gentechnisch veränderte Mikroorganismen erzeugt werden, deutlich erhöht.

In einer aktuellen Kollaboration nutzt Syngenta bspw. die ‚Machine-learning‘-Plattform von Ginkgo Bioworks. Damit werden gentechnisch veränderte Bakterienstämme entwickelt, die als Biologicals zum Schutz gegen Krankheitserreger oder Umweltstress vermarktet werden sollen [42].

Im Hinblick auf diese Konvergenz von Hochtechnologien besteht ein grundsätzliches Problem: Die KI-Programme sind einseitig auf bestimmte Datenquellen ausgerichtet und nutzen vor allem genomische Daten, was an ihrer leichten Digitalisierbarkeit und Ähnlichkeit mit Sprachtexten liegt. Andere Ebenen (Zellen, Organismen, Umwelten, Ökosysteme) sind oft kaum adäquat in digitalen Daten erfassbar und auswertbar.

Dadurch besteht die Gefahr, dass KI dazu genutzt wird, fehlende empirische Untersuchungen durch Algorithmen zu ersetzen. Wechselwirkungen mit der Umwelt können so simuliert und Sicherheit auch dann behauptet werden, wenn die Datengrundlage völlig unzureichend ist. Beispielsweise ist nur ein Bruchteil der im Boden vorkommenden Mikroorganismen bekannt. Damit ist auch das Wissen, das man zum Training der KI benötigt, lückenhaft. Gleichzeitig sind die vorhandenen Mittel zur Überprüfung, wie die Informationen von der KI generiert wurden, mangelhaft (‚Black Box‘, es besteht die Gefahr von erfundenen bzw. völlig falschen Informationen bzw. ‚Halluzinationen‘).

Gerade der Einsatz von KI kann so dazu führen, dass sich blinde Flecken in der Risikoanalyse herausbilden und verfestigen, was angesichts der hohen Geschwindigkeit der Entwicklung besonders verhängnisvoll sein kann. ///



10/ der mensch als versuchs- objekt ?

EINGRIFFE IN DIE KEIMBAHN UND KÜNSTLICHE EMBRYONEN

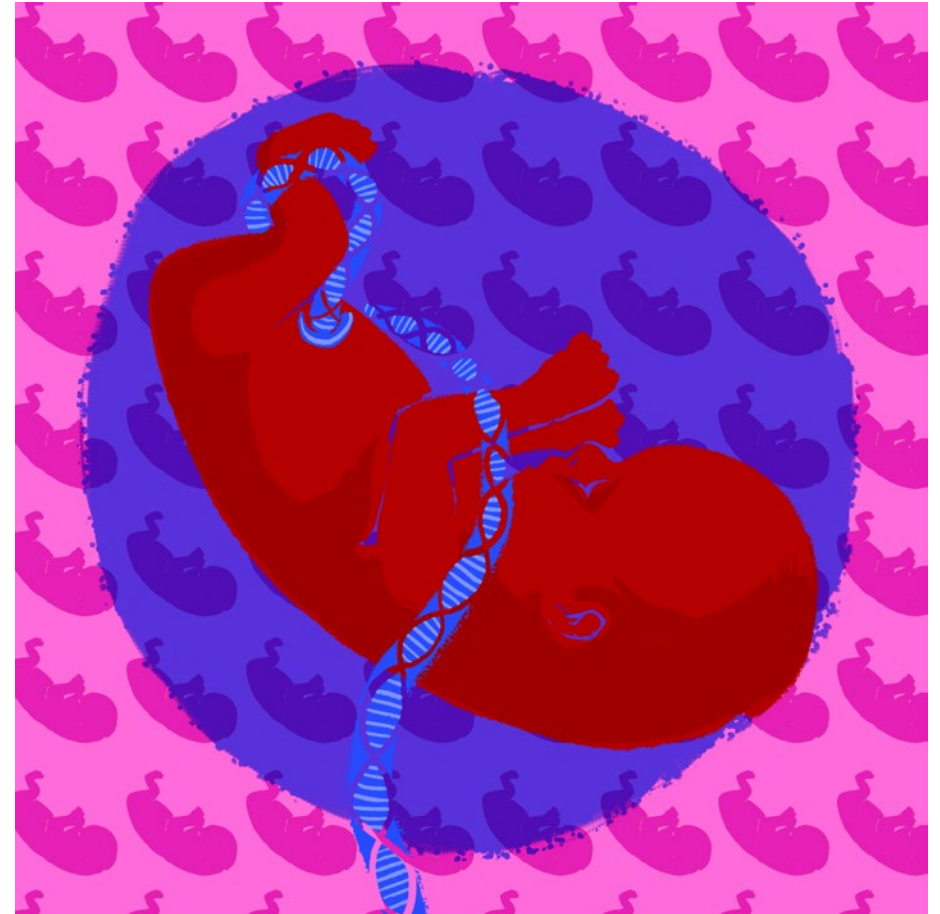
DIE GEN-SCHERE soll auch zu medizinischen Zwecken bei Menschen eingesetzt werden. So zum Beispiel im Zusammenhang mit der Sichelzellanämie, bei der die roten Blutkörperchen aufgrund einer bestimmten Genvariante zu wenig Sauerstoff binden, sich sichelförmig verformen und die Gefäße verstopfen können [69].

Abhilfe sollen hier sog. somatische Gentherapien leisten, die nur an den betroffenen Personen angewandt werden und sich nicht weitervererben. Hier haben die meisten ExpertInnen keine grundsätzlichen Einwände.

Grundsätzlich besteht auch hier die Möglichkeit, dass es dabei zu ungewollten genetischen Veränderungen kommen kann (wie Umlagerung der Chromosomen). Im Fall der Sichelzellanämie können die Zellen aber außerhalb des Körpers auf Fehler untersucht und vor einer Rückführung entsprechend behandelt werden.

Deutlich umstrittener als somatische Gentherapien sind Eingriffe in die menschliche Keimbahn, also gentechnische Veränderungen, die an nachfolgende Generationen weitervererbt werden. Diese sind bislang tabu, aber es gibt immer wieder Forderungen, die entsprechenden Gesetze zu verändern.

Ein chinesischer Forscher sorgte 2018 für Schlagzeilen, weil er bei menschlichen Embryonen Gene mit der Gen-Schere CRISPR/Cas verändert hatte, um sie so resistenter gegen HIV-Infektionen zu machen [70]. Er wurde in China dafür von einem Gericht verurteilt. Tatsächlich werfen die Folgen derartiger Eingriffe viele Fragen auf, die die Gesundheit der betroffenen Personen und die ethische Vertretbarkeit solcher Eingriffe betreffen. Es gibt auch die begründete Sorge wegen möglicher vererbbarer Nebenwirkungen. Auch die genetischen Veränderungen, die der chinesische



Forscher herbeigeführt hat, sind unpräzise und stehen im Verdacht, mehr Schaden als Nutzen zu bringen [57].

Doch trotz aller Bedenken schweben manchen GentechnikerInnen sogar Versuche zur Wiederauferstehung des Neandertalers vor. So schreibt der bekannte Gentechnik-Forscher George Church [71]:

„Eine neue Technik, die in meinem Harvard-Labor entwickelt wird, wird es uns ermöglichen, praktisch jedes ausgestorbene Tier, dessen Genom bekannt ist oder aus fossilen Überresten rekonstruiert werden kann, wiederaufstehen zu lassen, bis hin zum Wollhaarmammut, der Wandertaube und sogar dem Neandertaler. [...] Die Genomsequenz sowohl

des Wollhaarmammuts als auch des Neandertalers ist im Wesentlichen rekonstruiert worden; die genetische Information, die diese Spezies definiert, existiert, ist bekannt und in Computerdatenbanken gespeichert. Das Problem besteht darin, diese Informationen – diese abstrakten Buchstabenfolgen – in tatsächliche Nukleotidketten umzuwandeln, die die Gene und Genome der betreffenden Tiere bilden.“

Auch wenn diese Zukunftsphantasien möglicherweise nie realisiert werden: Eingriffe in die menschliche Keimbahn werden von vielen ForscherInnen keineswegs pauschal abgelehnt. Vielmehr verweist man darauf, dass es in Zukunft verbesserte Verfahren geben wird und nicht mehr das OB, sondern nur noch das WANN zur Diskussion stehen würde. ///

II/neue gentechnik und die frage: wozu?

KRISEN & HOFFNUNGEN

DIE MENSCHHEIT IST AKTUELL von diversen existentiellen Krisen bedroht, dazu gehört auch eine selbst verschuldete Bedrohung unserer Lebensgrundlagen. Die Ursachen dafür liegen in unserer gegenwärtigen Art und Weise zu leben – in unserer Art zu wirtschaften und unserer Kultur: Wir überschreiten anhaltend und exzessiv verschiedene planetare Grenzen [72]. Die Folgen zeigen sich u.a. in der menschengemachten Klimakrise und dem voranschreitenden Artensterben.

Unser Wirtschaftssystem sorgt also einerseits für enormen Wohlstand, ist andererseits aber auch verantwortlich für die Zerstörung der Ökosysteme und den Klimawandel. In der Krise befinden

sich aber nicht nur wir Menschen: Auch das auf unendliches Wachstum ausgerichtete Wirtschaftssystem ist existentiell bedroht. Weil früher oder später alles an seine Grenzen stößt, wird es immer schwieriger, weiteres Wachstum zu generieren.

Vor diesem Hintergrund werden von Politik und Wirtschaft derzeit große Hoffnungen auf die sog. 'Bioökonomie' gesetzt. Die Idee: Die Bioökonomie soll es ermöglichen, dass unsere Wirtschaft weiter wachsen kann – künftig jedoch ohne den Planeten zu ruinieren. Dazu sollen fossile Energieträger wie Kohle, Öl und Gas durch regenerative, nachwachsende Ressourcen ersetzt werden [73]. Der Wechsel von Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor zu solchen mit Elektroantrieb soll dazu ebenso beitragen wie die Neue Gentechnik in der Landwirtschaft.



ERWARTUNGEN & VERSPRECHUNGEN

Die oberflächliche Erzählung dessen, was die Neue Gentechnik in der Landwirtschaft machen soll, lautet: Es gehe darum, bessere Pflanzen zu kreieren – sei es die Anpassung an veränderte Klimabedingungen, die Steigerung von Erträgen oder die Reduktion des Pestizideinsatzes. Mittels Neuer Gentechnik sollen Pflanzen geschaffen werden, die noch besser an die Anforderungen des Menschen bzw. der Landwirtschaft angepasst sind.

Tiefgehend betrachtet bietet die Einführung der Neuen Gentechnik aber noch ganz andere Möglichkeiten: Die Methoden und Instrumente, die zur Herstellung von Gentechnik-Pflanzen und Tieren benötigt werden, können ebenso patentiert werden wie die daraus hervorgehenden Pflanzen und Tiere selbst. Damit kann vieles, was bisher zumindest in gewissem Maße – als natürliche Ökosystemdienstleistung – kostenlos zur Verfügung stand, zur technischen Erfindung gemacht und damit der wirtschaftlichen Wertschöpfung zugeführt werden (Stichwort Bioökonomie). Ein neuer Wachstumsmarkt entsteht. Und ein neuer Verwertungsdruck: Denn das Ziel der hinter den Hightech-,Erfindungen' stehenden InvestorInnen besteht definitionsgemäß darin, aus dem eingesetzten Geld mehr Geld zu machen. Das erzeugt Druck auf die Politik, die neuen 'Wachstumsmärkte' im Interesse der InvestorInnen möglichst wenig zu regulieren. ▶



GOLDGRÄBER- STIMMUNG

Wachstumsmärkte sind für InvestorInnen die interessantesten Märkte, denn sie versprechen hohe Renditen. Einerseits handelt es sich dabei um eine ‚Win-win-Situation‘ für die Beteiligten: Während Investierende ihr überschüssiges Geld vermehren können, können die, denen das Geld zur Verfügung gestellt wird, ihre Geschäfte vorantreiben – und damit schließlich ebenso ihr Geld vermehren. Andererseits aber tritt in einer zunehmend von Investment-Interessen dominierten Welt eine andere Frage immer deutlicher in den Vordergrund: Wächst der jeweilige Wirtschaftsbereich, weil er für die Gesellschaft besonders wertvoll ist, oder weil die getätigten Investitionen erfordern, dass Gewinne erwirtschaftet werden?

Klar ist, dass die oben beschriebene ‚Win-win-Situation‘ nur für eine Seite der Medaille gilt: Auf der anderen Seite stehen die Kosten, die oft auf Mensch, Natur, Tiere und Umwelt abgewälzt bzw. „externalisiert“ werden und damit von der Allgemeinheit zu tragen sind [74].

ÜBER „GREENSCAMMING“ & „ASTROTURFING“

Externalisierte Kosten werden oft nicht oder nur kaum berücksichtigt, teils auch gezielt verdeckt – und das hat Tradition: Vor nahezu 40 Jahren, als die menschengemachte Klimakatastrophe noch kaum ein Thema in der breiteren Öffentlichkeit war, formulierten WissenschaftlerInnen eines Erdöl-Konzerns hellsichtig, wie das Verbrennen fossiler Energieträger den Planeten aufheizen und damit künftig Mensch und Umwelt bedrohen wird. Aber anstatt zu handeln, anstatt Politik und Öffentlichkeit zu informieren und aufzuklären, anstatt Gegenmaßnahmen einzuleiten und so enorme zukünftige Schäden und

Kosten zu verhindern, entschied die Konzernleitung, die eigenen Geschäftsinteressen und die Aussicht auf kurzfristige Profite voranzustellen [75]. Die Studie wurde „vertraulich“ behandelt und die sogenannte „Global Climate Coalition“ [76] gegründet: eine Organisation, deren Name Umweltfreundlichkeit und Klimaschutz suggeriert. In Wahrheit war es aber eine vom Lobbyverband der Öl-Industrie gegründete und von einer Reihe großer Industrieunternehmen finanzierte Lobbyorganisation. Ihr Ziel bestand darin, den menschengemachten Klimawandel zu leugnen, um die profitablen Geschäfte nicht zu gefährden. Derartige PR-Techniken werden als „Astroturfing“ [77] oder „Greenscamming“ [78] bezeichnet.

„NATÜRLICHER“ KLIMAWANDEL & „NATÜRLICHE“ MUTATIONEN

Eine der verbreitetsten Strategien, die Menschheit als Ursache für die sich anbahnende Klimakatastrophe in Zweifel zu ziehen, bestand – und besteht teilweise noch immer – darin, darauf zu verweisen, dass es Klimaschwankungen schon immer gab. Alles sei ‚ganz natürlich‘. Damit soll verschleiert werden, dass unser gegenwärtiges Handeln der Haupttreiber des aktuellen Klimawandels ist, der sich in einer Geschwindigkeit vollzieht, wie es nie zuvor der Fall war [79].

‚Ganz natürlich‘ sei es auch, wenn mittels Neuer Gentechnikverfahren Veränderungen am Genom herbeigeführt werden. Da sich jedes Genom eines jeden Lebewesens auch aufgrund natürlicher Mutationen ständig verändert, mache Neue Gentechnik nichts anderes als das, was die Natur schon immer gemacht hat. Interessierte Akteure sprechen deshalb auch nicht weiter von „Neuer Gentechnik“. Stattdessen sollen Begriffe wie „neue Züchtungsmethoden“ oder „Präzisionszüchtung“ suggerieren, dass alles ‚ganz natürlich‘ sei, nur eben viel genauer und ohne Nebenwirkungen.



„EMISSIONSFREI“ & „NATURIDENTISCH“? EINE FRAGE DER BETRACHTUNGSEBENE

Abhängig von der Betrachtungsebene ist bspw. auch die Antwort auf die Frage, ob E-Autos ‚emissionsfrei‘ sind: Während auf der Mikroebene einzig sichtbar ist, dass E-Autos im Vergleich zu Verbrennern tatsächlich den Vorteil haben, lokal keine Reste eines schmutzigen Verbrennungsprozesses auszustoßen, führt auf der Makroebene die Einbeziehung des ressourcen- und naturzerstörenden Abbaus der benötigten Rohstoffe sowie die energieintensive Produktion von Batterien etc. zu einem differenzierteren – und damit ganz anderen – Bild. E-Autos führen nicht *per se* dazu, dass CO₂-Emissionen verhindert werden. Sie bewirken zunächst nur, dass sie andernorts stattfinden. Ob E-Autos evtl. dennoch in ihrer Gesamtbilanz besser im Sinne von emissionsärmer und ressourcenschonender als Verbrenner sind, hängt folglich von diversen Faktoren ab – z.B. der Größe und des Gewichts des Autos, der Nutzungsdauer etc. Ob E-Autos ‚nachhaltiger‘ sind, muss folglich im Einzelfall systemisch betrachtet und abgewogen werden. Dass sie aber jemals generell ‚emissionsfrei‘, also zum ökologischen Nulltarif zu haben sind, ist schlicht unrealistisch und nichts anderes als Greenwashing des Geschäftsmodells der Automobilindustrie [80].

Ähnlich muss auch bei der Neuen Gentechnik an Pflanzen der Blick geweitet werden: Auf der Mikroebene, bei Betrachtung lediglich eines kleinen Ausschnitts der DNA, ist es tatsächlich nicht immer möglich, eine NGT-Mutation von einer natürlichen oder durch Zufallsmutagenese ausgelösten Mutation zu unterscheiden. Genauso, wie ein E-Auto lokal emissionsfrei sein kann, nicht aber generell, scheint auch die NGT-Mutation nur auf dieser reduzierten Ebene ‚naturidentisch‘. Betrachtet man die gentechnische Veränderung im Hinblick auf seine Wirkungen auf der Ebene des Genoms, der Zelle, der Organismen und der ökologischen Systeme, wird klar, dass die Neue Gentechnik keineswegs als ‚naturidentisch‘ angesehen werden kann.



DAS RICHTIGE, UM DAS FALSCHER FORTZUFÜHREN?

Es ist – wie immer – kompliziert: Langfristig können E-Autos den motorisierten Individualverkehr in Relation zu Verbrennern vielleicht weniger schmutzig und ressourcenerstörend gestalten. Eine wirklich nachhaltige Mobilität wird aber nicht erreichbar sein, wenn alles bleibt, wie es ist, und einzig Verbrennungs- durch Elektromotoren ersetzt werden.

Vielleicht gelingt es auch mittels Neuer Gentechnik, ‚bessere‘ Pflanzen für die moderne Landwirtschaft zu entwickeln. Es drängt sich aber die Frage auf, ob ‚besser für die Landwirtschaft‘ auch ‚besser für die Ökosysteme‘ bedeuten würde oder ob dies vielleicht sogar in gewisser Weise im Widerspruch zueinander steht. Im Unterschied zu E-Autos steht hier jedenfalls nicht ‚nur‘ eine fehlgeleitete Verkehrswende auf dem Spiel – sondern im Extremfall die Existenz der funktionierenden Ökosysteme. Deshalb sollten hier verschiedene Wissenschaftsdisziplinen sehr genau hinschauen und die Versprechen der AnwenderInnen kritisch prüfen.

Darüber hinaus sollten wir auch grundsätzliche Fragen debattieren: Ist es überhaupt möglich, den motorisierten Individualverkehr in seinem jetzigen bzw. künftig noch größeren Ausmaß so umzugestalten, dass er ‚nachhaltig‘ ist – also ohne unsere Ressourcen und Lebensgrundlagen dauerhaft über alle Maßen zu strapazieren?

Dass viele Hoffnungen auf ‚Wunderpflanzen‘ aus Neuer Gentechnik gesetzt werden, führt jedenfalls auch dazu, dass die Illusion aufrechterhalten wird, wir könnten industrielle Landwirtschaft weiterhin wie bisher – bzw. noch ‚gewinnbringender‘ und ‚profitabler‘ – betreiben. Gewinnbringend und profitabel ist unsere Landwirtschaft aber nur auf der einen Seite. Auf der anderen wird sie immer ausbeuterischer und zerstörerischer – und gefährdet zunehmend unsere Lebensgrundlagen. Hier zeigt sich, dass unser gegenwärtiges Wirtschaftssystem ein grundsätzliches Problem in der Logik seiner Funktionsweise hat. In dieser Logik liegt wohl auch eine Hauptursache der gegenwärtigen ökologi-

schen Krisen und dafür, dass diese bisher nicht in den Griff zu bekommen sind: Die Gewinne der Gegenwart sind oft umso höher, je mehr Kosten externalisiert werden – sei es in die Zukunft oder auf Mensch, Tier, Natur und Umwelt. Verantwortlich gemacht werden dafür oft ‚die Konzerne‘. Tatsächlich sind aber auch sie in gewissem Sinne nur ‚Opfer des Systems‘ – sie haben keine Wahl. Im wirtschaftlichen Wettbewerb überlebt langfristig nur, wer profitabel (bzw. am profitabelsten) wirtschaftet. Die Externalisierung von Kosten wird damit gewissermaßen zur wirtschaftlichen Notwendigkeit.

In Bezug auf den Einsatz und den Umgang mit der Neuen Gentechnik in der Landwirtschaft sollten wir uns jedenfalls dafür stark machen, dass sie nicht dazu eingesetzt wird, die Tradition der Kostenexternalisierung fortzusetzen. Wir müssen verhindern, dass für die Aussicht auf kurzfristige Profite die langfristige Zerstörung unserer Lebensgrundlagen in Kauf genommen wird. Dazu bedarf es zum einen einer strikten Regulierung der Neuen Gentechnik und fortlaufender wissenschaftlicher Bewertungen durch verschiedene Wissenschaftsdisziplinen. Zum anderen müssen auch die grundsätzlichen Spielregeln und Anreize in unserem Wirtschaftssystem kritisch reflektiert werden. Hier gibt es grundlegende Interessenkonflikte: Während aus der Sicht ‚der Menschheit‘ das Interesse primär in dem langfristigen Erhalt unserer Lebensgrundlagen liegen sollte, liegt das primäre Interesse von Investitionen darin, möglichst schnell möglichst viel Profit zu machen.

Diese Aussicht auf kurzfristige, private Rendite ist wohl ein Hauptgrund dafür, dass unter Inkaufnahme großer allgemeiner und langfristiger Schäden viel Geld in neue (Gen-)Technologien investiert wird. Dagegen wird vergleichsweise wenig Geld für den langfristigen Schutz und Erhalt unserer Lebensgrundlagen zur Verfügung gestellt – eben weil damit keine kurzfristige, private Rendite einhergeht.

Wie können wir das ändern? Wie können (technologischer) Fortschritt und Allgemeinwohl besser zusammengebracht werden? Wir sollten darüber nachdenken – denn auf dem Spiel steht nicht weniger als die Zukunft der gesamten belebten Natur, der Ökosysteme und damit unserer Lebensgrundlagen. ///

Schlussfolgerungen

DIE ENTWICKLUNGEN IM BEREICH DER GENTECHNIK ERÖFFNEN DIE MÖGLICHKEIT, JEDES GEN JEDER LEBENSFORM GENTECHNISCH ZU VERÄNDERN und diese Veränderungen innerhalb der jeweiligen Art zu verbreiten. Dadurch können neue Pandemien ausgelöst, das Artensterben beschleunigt und Ökosysteme zerstört werden. Mit umfassenden Eingriffen in die genetische Infrastruktur der biologischen Vielfalt, wie sie durch die Gentechnik möglich wurden, gefährden wir auch unsere eigene Zukunft. Dagegen müssen wir Vorsorge treffen: Um unsere Lebensgrundlagen zu schützen, müssen bestimmte Anwendungen der Gentechnik strikt reguliert werden.

1. RISIKEN FÜR MENSCH & UMWELT

Im Umgang mit Gentechnik muss ein genereller Vorbehalt gelten: Freisetzungen von gentechnisch veränderten Organismen müssen möglichst vermieden werden!

- ◆ Ohne Risikoprüfung dürfen gentechnisch veränderte Organismen nicht zugelassen werden. Dies gilt für sowohl für die ‚alte‘ als auch für die Neue Gentechnik.
- ◆ Gentechnik-Organismen, deren Ausbreitung räumlich und zeitlich nicht kontrolliert werden kann, dürfen nicht freigesetzt werden.
- ◆ Die Anzahl freigesetzter Gentechnik-Organismen muss kontrollierbar sein, damit die Ökosysteme nicht überlastet werden.
- ◆ Lässt die Sicherheitsprüfung von Gentechnik-Organismen keine ausreichend belastbaren Schlussfolgerungen zu, müssen Ausschlusskriterien eingeführt werden, um die Zulassungsverfahren bei Bedarf stoppen zu können.
- ◆ Projekte mit dem Ziel, natürliche Populationen direkt in der Umwelt zu verändern (‚Outdoor-Gentechnik‘) dürfen nicht genehmigt werden.

3. ETHIK

Versuchen an Tieren und Menschen müssen klare Grenzen gesetzt werden, das heißt u.a.:

- ◆ keine kommerziellen Anreize für ethisch problematische Forschung an Menschen und Tieren wie die Erteilung von Patenten;
- ◆ keine Eingriffe in die menschliche Keimbahn.

2. TECHNIKFOLGENABSCHÄTZUNG

Die bisherigen Erfahrungen mit dem Anbau transgener Pflanzen zeigen, dass vor der Einführung weiterer Gentechnik-Pflanzen eine umfassende Technikfolgenabschätzung stattfinden muss:

- ◆ Es reicht nicht aus, die Risiken einzelner Gentechnik-Pflanzen zu untersuchen, auch die langfristigen und systemischen Auswirkungen für Mensch, Natur und Umwelt müssen berücksichtigt werden.
- ◆ Die Nachhaltigkeit des Anbaus muss regelmäßig überprüft werden. Gegebenenfalls muss die Zulassung widerrufen werden.
- ◆ Negative sozio-ökonomische Auswirkungen bspw. auf Saatgutmärkte (z.B. durch Patente), Lebensmittelproduktion und Wahlfreiheit müssen rechtzeitig erkannt bzw. verhindert werden.

4. MÖGLICHER MISSBRAUCH

Die Synthese von Genen und Anwendungen der Gen-Schere haben, auch in Verbindung mit KI, ein hohes Missbrauchspotential. Hier muss ausreichende Vorsorge getroffen werden:

- ◆ Die Synthese von Genen und die Neukombination von zellulären Systemen müssen gesetzlich reguliert bzw. einem kontinuierlichen Monitoring (Screening) unterliegen.
- ◆ Für den Zugang zu und die Arbeit mit genomischen Daten von Pathogenen muss es internationale Standards geben, die geeignet sind, missbräuchliche Anwendungen erheblich zu reduzieren.

5. KI & GENTECHNIK

Der unkontrollierte Einsatz von KI in Kombination mit Gentechnik (‚KI-Gentechnik‘) kann katastrophale Folgen für das Leben auf diesem Planeten haben. Um das zu verhindern, müssen konkrete Maßnahmen ergriffen und gesetzliche Regelungen festgelegt werden, wie:

- ◆ systematische Beobachtung und Aufklärung über die Methoden und Risiken von KI im Bereich Gen- und Biotechnologie unter Beteiligung der Zivilgesellschaft;
- ◆ Maßnahmen gegen einseitige Beeinflussung der Meinungsbildung durch Akteure wie Google und Microsoft, die selbst im Bereich Gentechnik involviert sind;
- ◆ maximale Transparenz über Forschungsprojekte, bei denen KI eingesetzt wird, um neue Genkombinationen oder gentechnisch veränderte Organismen zu entwickeln;
- ◆ kein automatisierter Einsatz von KI zur gentechnischen Veränderung von Organismen;
- ◆ keine Verlagerung der Verantwortung auf automatisierte KI-Systeme.



WAS MACHT DAS MAMMUT AUF DEM MARS?

Warum wir unsere Biosphäre vor der Gentechnik schützen müssen

Testbiotech 2024

AutorInnen: Matthias Juhas, Mario Kuttruff, Andreas Bauer-Pankus, Nina Valenzuela und Christoph Then
Grafik und Layout: Timo Zett

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

Testbiotech ist ein unabhängiges Institut für Folgenabschätzung im Bereich Biotechnologie. Unsere Arbeit basiert strikt auf wissenschaftlichen Grundlagen und bewertet die verfügbaren Informationen aus der

Perspektive des Schutzes von Gesundheit, Umwelt und Natur.

Testbiotech ist frei von jeglichen Interessen an der Entwicklung,

Anwendung und Vermarktung von gentechnisch veränderten

Produkten. Wir finanzieren unsere Arbeit durch private Spenden, öffentliche Projekt- und Stiftungsgelder und sind als gemeinnützige Organisation staatlich anerkannt.

Wenn Sie unsere Arbeit unterstützen wollen:

SPENDENKONTO:

GLS Gemeinschaftsbank

IBAN: DE71 4306 0967 8218 2353 00

BIC: GENODEM1GLS

Diese Publikation wurde gefördert von der Umweltstiftung Greenpeace und der Stiftung GEKKO.



[1] Boland E. (2018) NIAC Phase I Grant "Mars Ecolife Testbed" NNX14AM97G Final Progress Report, <https://ntrs.nasa.gov/citations/20190001182>

[2] <https://colossal.com/mammoth>

[3] Appleton E., et al. (2024) Derivation of elephant induced pluripotent stem cells. <https://doi.org/10.1101/2024.03.05.583606>

[4] Then, C. (2022) Biologische Intelligenz, Oekom Verlag

[5] Doudna J., Sternberg S.H. (2019) Eingriff in die Evolution. Springer.

[6] Ball P. (2023) How Life Works. Picador.

[7] Testbiotech (2023) Genetic engineering in agriculture: between high flying expectations and complex risks, <https://www.testbiotech.org/en/publikation/genetic-engineering-agriculture-between-high-flying-expectations-and-complex-risks/>

[8] Arias-Martín M., et al. (2024) Teosinte introducido en España y maíz Bt: tasa de hibridación, fenología y cuantificación de toxina CryIaB en los híbridos. <https://revistas.rcaap.pt/rca/article/view/35040>

[9] USDA (2023) More and Better Choices for Farmers: Promoting Fair Competition and Innovation in Seeds and Other Agricultural Inputs. <https://www.ams.usda.gov/sites/default/files/media/SeedsReport.pdf>

[10] USDA (2024) Acreage. <https://usda.library.cornell.edu/concern/publications/j098zb09z>

[11] etc Group (2022) Food Barons 2022 - Crisis Profiteering, Digitalization and Shifting Power, <https://etcgroup.org/content/food-barons-2022>

[12] Kawall K. (2019) New possibilities on the horizon: genome editing makes the whole genome accessible for changes. <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.00525>

[13] Koller F., et al. (2023) The need for assessment of risks arising from interactions between NGT organisms from an EU perspective. <https://doi.org/10.1186/s12302-023-00734-3>

[14] Eckerstorfer M. & Heissenberger A. (2023) New Genetic Engineering – possible unintended effects. https://emedien.arbeiterkammer.at/viewer/image/AC16982244/1/LOG_0003/

[15] ANSES (2024) Risques et enjeux socio-économiques liés aux plantes NTG. Avis de l'Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail relatif aux mé-

thodes d'évaluation des risques sanitaires et environnementaux et des enjeux socio-économiques associés aux plantes obtenues au moyen de certaines nouvelles techniques génomiques (NTG) (Saisine n° 2021-SA-0019), <https://www.anses.fr/fr/content/actu-nouvelles-techniques-genomiques>

[16] Rönspies M., et al. (2021) CRISPR-Cas-mediated chromosome engineering for crop improvement and synthetic biology. <https://doi.org/10.1038/s41477-021-00910-4>

[17] Koller F. & Cieslak M. (2023) A perspective from the EU: Unintended genetic changes in plants caused by NGT – their relevance for a comprehensive molecular characterisation and risk assessment. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2023.1276226>

[18] Kawall K. (2021) The generic risks and the potential of SDN-I applications in crop plants. <https://doi.org/10.3390/plants10112259>

[19] Sanchez-Leon S., et al. (2018) Low-gluten, nontransgenic wheat engineered with CRISPR/Cas9. <https://doi.org/10.1111/pbi.12837>

[20] EFSA (2021) Scientific Opinion on the evaluation of existing guidelines for their adequacy for the molecular characterisation and environmental risk assessment of genetically modified plants obtained through synthetic biology. <https://doi.org/10.2903/j.efsa.2021.6301>

[21] Ortega M.A., et al. (2022) In vitro floral development in poplar: insights into seed tri-ome regulation and trimonoecy. <https://doi.org/10.1111/nph.18624>

[22] Cieslak M. & Koller F. (2024) First-time flowering in poplars: minor genomic changes using new genomic techniques can change species-specific characteristics. https://fachstelle-gentechnik-umwelt.de/wp-content/uploads/Backgrounder_poplar_22_01_24.pdf

[23] Morineau C., et al. (2017) Selective gene dosage by CRISPR-Cas9 genome editing in hexaploid *Camelina sativa*. <https://doi.org/10.1111/pbi.12671>

[24] Kawall K. (2021) Genome-edited *Camelina sativa* with a unique fatty acid content and its potential impact on ecosystems. <https://doi.org/10.1186/s12302-021-00482-2>

[25] Nonaka S., et al. (2017) Efficient increase of γ -aminobutyric acid (GABA) content in tomato fruits by targeted mutagenesis. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-06400-y>

[26] Testbiotech (2024) CRISPR tomatoes now on the shelves, <https://www.testbiotech.org/en/news/crispr-tomatoes-now-shelves/>

- [27] Miklau M., et al. (2024) Horizon scanning of potential environmental applications of terrestrial animals, fish, algae and microorganisms produced by genetic modification, including the use of new genomic techniques. <https://doi.org/10.3389/fgene.2024.1376927>
- [28] Testbiotech (2021) Seabream with extra muscles. <https://www.testbiotech.org/en/limits-to-biotech/organisms/seabream-with-extra-muscles/>
- [29] Testbiotech (2021) 'Progress' going in the wrong direction: diseased New GE pufferfish. <https://www.testbiotech.org/en/news/progress-going-wrong-direction-diseased-new-ge-pufferfish/>
- [30] Testbiotech (2024) First European patent granted on CRISPR pigs. <https://www.testbiotech.org/en/news/first-european-patent-granted-on-crispr-pigs/>
- [31] Lazar N.H. et al. (2024) High-resolution genome-wide mapping of chromosome-arm-scale truncations induced by CRISPR-Cas9 editing. <https://doi.org/10.1038/s41588-024-01758-y>
- [32] Esvelt K.M., et al. (2014) Concerning RNA-guided gene drives for the alteration of wild populations. <https://doi.org/10.7554/eLife.03401>
- [33] Then C., et al. (2020) Spatio-temporal controllability and environmental risk assessment of genetically engineered gene drive organisms from the perspective of EU GMO Regulation. <https://doi.org/10.1002/ieam.4278>
- [34] See for example: <https://spots.com/animal-testing-statistics/>
- [35] Norris A.L., et al. (2020) Template plasmid integration in germline genome-edited cattle. <https://doi.org/10.1038/s41587-019-0394-6>
- [36] Higuchi K., et al. (2019) Targeted mutagenesis of the ryanodine receptor by Platinum TALENs causes slow swimming behaviour in Pacific bluefin tuna (*Thunnus orientalis*). <https://doi.org/10.1038/s41598-019-50418-3>
- [37] Wang K., et al. (2015) Efficient Generation of Myostatin Mutations in Pigs Using the CRISPR/Cas9 System. <https://doi.org/10.1038/srep16623>
- [38] Gantz V.M., et al. (2015) Highly efficient Cas9-mediated gene drive for population modification of the malaria vector mosquito *Anopheles stephensi*. <https://doi.org/10.1073/pnas.1521077112>
- [39] Wolf S., et al. (2023) Assessing potential hybridization between a hypothetical gene drive-modified *Drosophila suzukii* and nontarget *Drosophila* species. <https://doi.org/10.1101/risa.14096>
- [40] Alzate Zuluaga M.Y., et al. (2024) Plant-microbe interactions in the rhizosphere for smarter and more sustainable crop fertilization: the case of PGPR-based biofertilizers. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2024.1440978>
- [41] Wen A., et al. (2021). Enabling biological nitrogen fixation for cereal crops in fertilized fields. <https://doi.org/10.1021/acssynbio.1c00049>
- [42] Nature Biotechnology News In Brief (2024) Microbes: next-generation fertilizers. <https://doi.org/10.1038/s41587-024-02368-z>
- [43] Ballester A.R., et al. (2023) Horizon scanning on microorganisms and their products obtained by new developments in biotechnology. <https://doi.org/10.2903/sp.efsa.2023.EN-8503>
- [44] Leonard S.P., et al. (2020) Engineered symbionts activate honey bee immunity and limit pathogens. <https://doi.org/10.1126/science.aax9039>
- [45] Lovett B., et al. (2019) Transgenic *Metarhizium* rapidly kills mosquitoes in a malaria-endemic region of Burkina Faso. <https://doi.org/10.1126/science.aaw8737>
- [46] Reuss D.R., et al. (2020) Large-scale reduction of the *Bacillus subtilis* genome: consequences for the transcriptional network, resource allocation, and metabolism. <https://doi.org/10.1101/gr.215293.116>
- [47] Sleight S.C., et al. (2010) Designing and engineering evolutionary robust genetic circuits. <http://www.jbioleng.org/content/4/1/12>
- [48] Clawson W. & Levin M. (2023) Endless forms most beautiful 2.0: teleonomy and the bioengineering of chimaeric and synthetic organisms. <https://doi.org/10.1093/biolinnean/blac073>
- [49] Evans B.R., et al. (2019) Transgenic *Aedes aegypti* Mosquitoes Transfer Genes into a Natural Population. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-49660-6>
- [50] Ant T., et al. (2012) Control of the olive fruit fly using genetics-enhanced sterile insect technique. <https://doi.org/10.1186/1741-7007-10-51>
- [51] DiCarlo J.E., et al. (2015) Safeguarding CRISPR-Cas9 gene drives in yeast. <https://doi.org/10.1038/nbt.3412>
- [52] Gantz V.M. & Bier E. (2015) The mutagenic chain reaction: A method for converting heterozygous to homozygous mutations. <https://doi.org/10.1126/science.aaa5945>
- [53] Grunwald H.A., et al. (2019) Super-Mendelian inheritance mediated by CRISPR-Cas9 in the female mouse germline. <https://doi.org/10.1038/s41586-019-0875-2>
- [54] Oberhofer G., et al. (2024) Cleave and Rescue gamete killers create conditions for gene drive in plants. <https://doi.org/10.1038/s41477-024-01701-3>
- [55] Lentzos F., et al. (2022) Eroding norms over release of self-spreading viruses. <https://doi.org/10.1126/science.abj5593>
- [56] Fletcher S.J., et al. (2020) A perspective on RNAi-Based biopesticides. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.00051>
- [57] Cobb M. (2023) The Genetic Age, Our Perilous Quest to Edit Life. Profile Books.
- [58] Noshay J.M., et al. (2023) Quantum biological insights into CRISPR-Cas9 sgRNA efficiency from explainable-AI driven feature engineering. <https://doi.org/10.1093/nar/gkad736>
- [59] Vindman C., et al. (2024) The Convergence of AI and Synthetic Biology: The Looming Deluge. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2404.18973>
- [60] Farooq M.A., et al. (2024) Artificial intelligence in plant breeding. <https://doi.org/10.1016/j.tig.2024.07.001>
- [61] Eslami M., et al. (2022) Artificial intelligence for synthetic biology. <https://doi.org/10.1145/3500922>
- [62] Esvelt K. (2022) Delay, Detect, Defend: Preparing for a Future in which Thousands Can Release New Pandemics. <https://dam.gensp.ch/files/doc/gensp-geneva-paper-29-22>
- [63] Nuclear Threat Initiative (2023) The Convergence of Artificial Intelligence and the Life Sciences: Safeguarding Technology, Rethinking Governance, and Preventing Catastrophe. https://www.nti.org/wp-content/uploads/2023/10/NTIBIO_AI_Executive-Summary_FINAL.pdf
- [64] Mouton C.A., et al. (2024) The Operational Risks of AI in Large-Scale Biological Attacks, Results of a Red-Team Study. https://www.rand.org/pubs/research_reports/RRA2977-2.html
- [65] Grinbaum A., & Adomaitis L. (2024) Dual use concerns of generative AI and large language models. <https://doi.org/10.1080/23299460.2024.2304381>
- [66] Martin H.G., et al. (2023) Perspectives for self-driving labs in synthetic biology. <https://doi.org/10.1016/j.copbio.2022.102881>
- [67] Dixon T.A., et al. (2020) Bio-informational futures: The convergence of artificial intelligence and synthetic biology. <https://doi.org/10.15252/embr.202050036>
- [68] Ragland C.J., et al. (2024) Choreographing root architecture and rhizosphere interactions through synthetic biology. <https://doi.org/10.1038/s41467-024-45272-5>
- [69] Frangoul H., et al. (2021) CRISPR-Cas9 Gene Editing for Sickle Cell Disease and β -Thalassemia. <https://doi.org/10.1056/NEJMoa2031054>
- [70] Marx V. (2021) The CRISPR children. <https://doi.org/10.1038/s41587-021-01138-5>
- [71] Church, G., Regis, E. (2012) Regenesys, how synthetic biology will reinvent nature and ourselves. Basis Books, New York.
- [72] PIK (2023) Schwindende Widerstandskraft unseres Planeten: Planetare Belastungsgrenzen erstmals vollständig beschrieben, sechs von neun bereits überschritten. [planetare-belastungsgrenzen-erstmalig-vollstaendig-beschrieben-sechs-von-neun-bereits-ueberschritten-1](https://www.pik-potsdam.de/de/aktuelles/nachrichten/schwindende-widerstandskraft-unseres-planeten-planetare-belastungsgrenzen-erstmalig-vollstaendig-beschrieben-sechs-von-neun-bereits-ueberschritten-1)
- [73] BMEL (2014) Nationale Politikstrategie Bioökonomie. Nachwachsende Ressourcen und biotechnologische Verfahren als Basis für Ernährung, Industrie und Energie. <https://biooekonomie.de/sites/default/files/files/2016-09/npsb.pdf>
- [74] Lessenich S. (2016) Neben uns die Sintflut. Die Externalisierungsgesellschaft und ihr Preis. Hanser Berlin.
- [75] SPIEGEL ONLINE (2018) Wie ein Ölkonzern sein Wissen über den Klimawandel geheim hielt. <https://www.spiegel.de/spiegel/wie-shell-sein-wissen-ueber-den-klimawandel-geheim-hielt-a-1202889.html>
- [76] Wikipedia, https://de.wikipedia.org/wiki/Global_Climate_Coalition
- [77] Wikipedia, <https://de.wikipedia.org/wiki/Astroturfing>
- [78] Wikipedia, <https://de.wikipedia.org/wiki/Greenscamming>
- [79] Krätzig, C. (2019) Der Klimawandel ist keine Glaubenssache. <https://www.uni-hamburg.de/newsroom/imfokus/2019/09-27-klimaleugner.html>
- [80] Focus (2024) Ohrfeige für Autobauer: Behörde watscht BMW und MG ab, weil sie Elektroautos „emissionsfrei“ nennen. https://www.focus.de/auto/greenwashing-in-e-auto-werbung-sind-e-autos-emissionsfrei-werbeaufsichtsbehoerde-watscht-mg-und-bmw-ab_id_259656672.html



Weitgehend unbemerkt von den Augen der breiten Öffentlichkeit bahnt sich derzeit eine Zeitenwende an. Mit den neuen gentechnischen Verfahren und Werkzeugen wie der Gen-Schere CRISPR/Cas hat die Menschheit erstmals die Möglichkeit, jedes Gen in jeder Lebensform gentechnisch zu verändern und diese Veränderungen innerhalb der jeweiligen Art zu verbreiten.

Gehen wir zu unbedacht mit diesen mächtigen Technologien um, können wir neue Pandemien auslösen, das Artensterben beschleunigen, Ökosysteme zerstören und unser eigenes Überleben gefährden.

Diese Publikation wurde gefördert von der Umweltstiftung Greenpeace und der Stiftung GEKKO.



UMWELTSTIFTUNG
GREENPEACE

