

Neue Verfahren in der Pflanzenzüchtung – Nutzen und Herausforderungen

Zusammenfassung einer Tagung des Forums Genforschung
vom 27. Januar 2015 in Bern



Inhaltsverzeichnis

Hintergrund und Aufbau des Berichts	5
Grundlagen aus der Vergangenheit für die Pflanzenzüchtung der Zukunft	6
<i>Bruno Studer</i>	
Die Pflanzenzüchtung gestern	6
Die Pflanzenzüchtung heute.....	8
Die Pflanzenzüchtung morgen.....	9
Neue Werkzeuge der Pflanzenzüchtung im Fokus: Programmierbare Endonukleasen	10
<i>Jochen Kumlehn</i>	
Einsichten in die Praxis der modernen Rapszüchtung bei Syngenta	12
<i>Viola Spamer, Patricia Ahl Goy</i>	
Praxis der Rapszüchtung heute	12
Potential der neuen Züchtungstechniken für Syngenta	15
Neue Methoden der Pflanzenzüchtung im Licht der europäischen Sicherheitsdiskussion	17
<i>Joachim Schiemann</i>	
Sicherheitsbeurteilung aus behördlicher Sicht	20
<i>Helmut Gaugitsch</i>	
Rechtliche Grundlagen für die Pflanzenzüchtung in der Schweiz	23
<i>Christoph Errass</i>	
Schlussdiskussion	26
Referenzen	29
Weitere relevante Literatur zum Thema	30

Redaktion: Lucienne Rey (textrey), Christoph Lüthi (SCNAT)
Bild Titelseite: 123rf.com

Referentinnen und Referenten

Prof. Dr. Bruno Studer, Institut für Agrarwissenschaften, ETH Zürich

Dipl. Biol. Viola Spamer, Syngenta Seeds GmbH Bad Salzuflen

Dr. Patricia Ahl Goy, Syngenta Crop Protection AG Basel

Dr. Jochen Kumlehn, Leibniz-Institut für Pflanzengenetik und Kulturpflanzenforschung Gatersleben

Prof. Dr. Joachim Schiemann, Institut für die Sicherheit biotechnologischer Verfahren bei Pflanzen,
Julius Kühn-Institut Quedlinburg

Dr. Helmut Gaugitsch, Umweltbundesamt Österreich

Prof. Dr. Christoph Errass, Law School, Universität St. Gallen

Moderation

Odette Frey

Organisation

Forum Genforschung der Akademie der Naturwissenschaften (SCNAT) mit Unterstützung des Bundesamtes für Umwelt (BAFU) und des Bundesamtes für Landwirtschaft (BLW)

Finanzielle Unterstützung Tagungsbericht

Bundesamt für Umwelt (BAFU)

Hintergrund und Aufbau des Berichts

In der Pflanzenzüchtung wurden in den letzten hundert Jahren gewaltige Fortschritte erzielt. Dank verbesserten Sorten und Hybridzüchtung gelang es, die Erträge und Qualität der Ernten erheblich zu steigern. Die letzte grosse agronomische Innovation waren gentechnisch veränderte (GV) Pflanzen, die seit Mitte der 1990er-Jahre in immer mehr Ländern und auf immer grösseren Flächen angebaut werden. Mangels Akzeptanz in der Bevölkerung und geeigneter Produkte werden in der Schweizer Landwirtschaft jedoch bis heute keine GV-Pflanzen angebaut. Ein 2005 eingeführtes und ursprünglich auf 5 Jahre befristetes Moratorium für den Anbau von GV-Pflanzen wurde bereits zwei Mal bis aktuell 2017 verlängert. Eine Motion für eine weitere Verlängerung wurde bereits eingereicht.

In der Zwischenzeit wurden neue, auf Gentechnik beruhende Züchtungsverfahren entwickelt, die eine eindeutige Unterscheidung zwischen konventionellen und GV-Pflanzen zunehmend erschweren. So lassen sich beispielsweise bei gewissen Verfahren die Veränderungen im Erbgut später nicht mehr als gezielt eingebracht nachweisen, da Pflanzen entstehen, die sich theoretisch auch zufällig und ohne menschliches Zutun oder mit konventioneller Züchtung hätten herausbilden können. In naher Zukunft braucht es daher einen politischen Entscheid, wie in der Schweiz mit diesen neuen Verfahren und den daraus resultierenden Produkten umgegangen werden soll.

Daher zielte die am 27. Januar 2015 vom Forum Genforschung der Akademie der Naturwissenschaften Schweiz an der UniS in Bern durchgeführte Séance de Réflexion darauf ab, einen Überblick über den aktuellen Stand der Pflanzenforschung und die neuen Verfahren zu geben. Moderiert von der Wissenschaftsjournalistin Odette Frey diskutierten Fachleute dabei auch über Potenzial, Sicherheit und Regulierung dieser Verfahren. Der vorliegende Bericht fasst die Erkenntnisse aus der Tagung zusammen. Die Gliederung orientiert sich dabei an den einzelnen Referaten, die Reihenfolge wurde jedoch leicht verändert. Der letzte Teil gibt die Podiumsdiskussion und die Beiträge aus dem Publikum wieder.

Die Präsentationen der Tagung sind verfügbar auf:

www.naturwissenschaften.ch/service/events/12380-neue-verfahren-in-der-pflanzenzuechtung---nutzen-und-herausforderungen

Grundlagen aus der Vergangenheit für die Pflanzenzüchtung der Zukunft

Bruno Studer, Institut für Agrarwissenschaften, ETH Zürich

Die Pflanzenzüchtung gestern

In der Geschichte der Pflanzenzüchtung gab es mehrere wichtige Errungenschaften, welche die Pflanzenzüchtung maßgeblich geprägt haben. Eine ganz wesentliche war die gezielte Ausnutzung des Heterosis-Effektes durch die Hybridzüchtung. Dieser Effekt beschreibt die überdurchschnittliche Merkmalsausprägung in der Nachkommenschaft von gekreuzten Inzuchtlinien. In der Pflanzenzüchtung werden diese Produkte auch als Hybriden bezeichnet. Bei Getreidearten, wie etwa bei Mais, hat die Hybridzüchtung seit der Einführung in den 1930er-Jahren zu markant höheren Erträgen geführt. Diese Zunahme wurde ab den 1960er-Jahren durch den vermehrten Einsatz von Pflanzenschutzmitteln und Kunstdünger noch verstärkt (Abbildung 1).

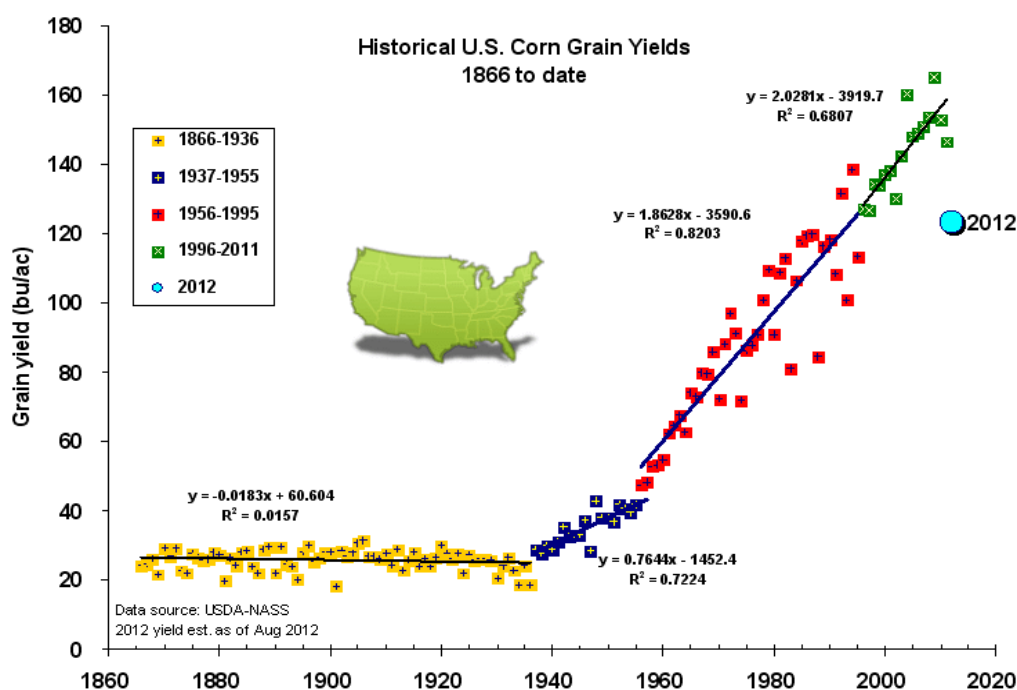


Abbildung 1. Entwicklung des Maiskornenertrags in den USA von 1860 – 2020 (modifiziert von www.agry.purdue.edu, Datenquelle USDA-NASS).

Auch bei anderen Hauptkulturarten wie zum Beispiel Reis, hat der Anbau von Hybridsorten seit den 70er-Jahren rapide zugenommen. Heute sind etwa 80 Prozent der kultivierten Sorten Hybridsorten, die im Vergleich zu Populationssorten bis zu 30 Prozent mehr Ertrag bringen. Hybridzüchtung wird auch bei Raps, Zuckerrübe und Roggen erfolgreich angewendet, beim Weizen steht die Hybridzüchtung kurz vor dem Durchbruch. Zudem werden bei vielen Gemüsen wie Tomaten oder Rosenkohl hauptsächlich Hybridsorten angebaut, da deren Produkte bezüglich Entwicklungszeit, Form und Größe wesentlich einheitlicher sind.

Ab den 1960er-Jahren gelang dem US-amerikanischen Agrarwissenschaftler Norman Borlaug ein durchschlagender Erfolg mit seinem sogenannten Mexiko-Weizen, in welchen er Zwergwuchs eingekreuzt hatte. Dank der kürzeren Wuchsform knickte dieser Weizen auch bei zusätzlicher Düngung und dadurch schweren Ähren nicht um. Der Ernteindex, d.h. das Verhältnis zwischen dem Korn- und Strohertrag, verbesserte sich dadurch massiv. Durch diese Kurzhalmstorten stieg der Ertrag in Mexiko innerhalb von weniger als 20 Jahren um das Sechsfache, in Indien in 10 Jahren um das Dreifache (Abbildung 2). Diese Sorten bildeten auch die Grundlage für die nachfolgende Grüne Revolution.

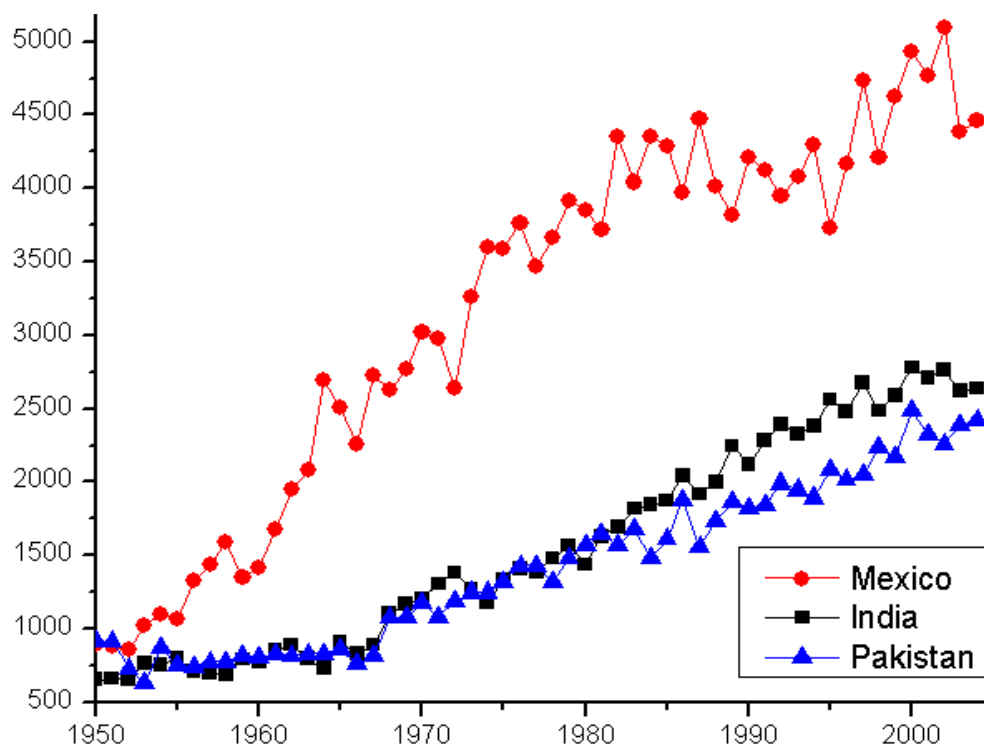


Abbildung 2. Entwicklung der Weizenerträge ausgewählter Länder während der Grünen Revolution (Quelle: FAO).

Mit Blick auf die Anbauflächen einiger Hauptkulturen sind in den vergangenen Jahrzehnten erhebliche Verschiebungen festzustellen: So ist seit 1960 der Anbau von Weizen zurückgegangen. Ölsaaten dagegen haben kontinuierlich zugelegt, die Anbaufläche für Raps beispielsweise hat sich innerhalb weniger Jahre von 2'500 auf 22'000 Hektare ausgedehnt. Dies ist – neben Ertragssteigerungen durch die Einführung der Hybridzüchtung – unter anderem auch darauf zurückzuführen, dass sich die Qualität des Öls in vielen Sorten von einem nicht konsumierbaren Industrieöl zu einem hochwertigen Speiseöl entwickelt hat, das keine gesundheitsschädliche Erucasäure mehr enthält (Walter et al. 2014). Auch bei Soja wurden erhebliche Verbesserungen erzielt, sodass beispielsweise durch züchterische Verbesserung der Kühltoleranz ein Anbau in unseren Breitengraden möglich wurde. Es ist auch festzustellen, dass die Anzahl der Länder, die gentechnisch veränderte Pflanzen anbauen, nach wie vor steigt. Auch die Anbaufläche und der monetäre Wert, der durch GV-Pflanzen generiert wird, nehmen weiter zu (ISAAA 2014). Diese Beispiele zeigen, dass Innovation in der Pflanzenzüchtung die treibende Kraft des Pflanzenbaus ist.

Die Pflanzenzüchtung heute

Die Anzahl der gezüchteten Kulturarten geht stetig zurück, und der züchterische Fokus beschränkt sich heute auf wenige Hauptkulturen. Geschuldet ist diese Erscheinung nicht zuletzt den Sparmassnahmen und Reorganisationen, die dazu geführt haben, dass sich die Züchter auf finanziell interessante Kulturen konzentrieren. Das wiederum führte indirekt zu Konzentrationserscheinungen bei der Anzahl der Züchtungsbetriebe. So gibt es in der Schweiz nur noch eine Handvoll Organisationen, die in ihren Züchtungsprogrammen noch etwa 40 Arten bearbeiten. Beispiel Raps: Von den über 650 seit dem Jahre 2000 im europäischen Sortenkatalog aufgelisteten Rapsorten befindet sich die Mehrheit in der Hand weniger sehr grosser Unternehmen, in der Schweiz findet gar keine Rapszüchtung mehr statt (Walter et al. 2012). Die Konzentration auf wenige Grossunternehmen bleibt auch mit Blick auf die verwendeten Züchtungstechnologien nicht ohne Folgen. Denn die kleinen Unternehmen können es sich kaum leisten, neue Technologien zu entwickeln und einzusetzen, um konkurrenzfähig zu bleiben, was wiederum das Verschwinden kleiner Züchter beschleunigt.

Das wichtigste Züchtungsziel ist nach wie vor der Ertrag. Ein zunehmend wichtiger Aspekt ist dabei die Ertragsstabilität, indem der realisierte näher an den potenziellen Ertrag herangeführt wird. Daneben sind Qualität und Resistenz gegenüber Pflanzenpathogenen ebenfalls prioritäre Ziele. Ausserdem wird heute der Toleranz gegenüber Hitze, Trockenheit oder Frost, sowie der Ressourceneffizienz, also einem nachhaltigeren Wasser- und Nährstoffverbrauch, ein höherer Wert beigemessen. Beispiele für die Zuchtziele der Zukunft umfassen Mehrjährigkeit von einjährigen Kulturpflanzen oder die biologische Stickstofffixierung ausserhalb von Leguminosen.

Bei der Weiterentwicklung der Pflanzenzüchtung spielen in erster Linie technologische Fortschritte der Phänotypisierung und Genotypisierung eine grosse Rolle. Die Phänotypisierung beschäftigt sich mit der präzisen Erfassung von Pflanzeigenschaften, zum Beispiel mittels automatischer Bildanalyseverfahren. Drohnensysteme oder 3D-Laserscanner könnten deshalb für die digitale Beschreibung von Kulturen an Bedeutung gewinnen (Walter et al. 2012). Neue Methoden der Genotypisierung erlauben es, die der Züchtung zu Grunde liegende genetische Diversität präzise zu beschreiben und effizient im Züchtungsprozess durch genetische Marker zu nutzen (vgl. Seite 14). Mit geringem Aufwand können so sehr viele Pflanzen gleichzeitig auf ihre Eigenschaften getestet werden. Zudem können die Pflanzen bereits in einem sehr frühen Stadium analysiert werden, statt dass die volle Entwicklungszeit bis zur Reife abgewartet werden muss. Durch diese beiden Gegebenheiten kann durch gezielte Genotypisierung die Züchtungsdauer erheblich verkürzt werden.

Sowohl vollautomatische Systeme zur Phänotypisierung als auch Genotypisierung durch DNA-Sequenzierung bauen auf der Verarbeitung gewaltiger Datenmengen auf. Nicht von ungefähr spricht man auch von «Big Data» in der Pflanzenzüchtung. Um mit diesen Daten und den immer komplexer werdenden statistischen Modellen umgehen zu können, ist das effiziente Verarbeiten, Nutzen und Speichern der Daten von entscheidender Bedeutung. Zurzeit findet in der Pflanzenzüchtung ein Vernetzungsprozess statt: Es werden Plattformen entwickelt, um das experimentelle Design mit der Modellierung und der Statistik zu verknüpfen. Ziel dieser Bemühungen ist es, Werkzeuge für pflanzenzüchterische Entscheidungen zu gewinnen. Aber auch die Forschungsgemeinschaften vernetzen sich zunehmend, was die erfolgreiche Durchführung von Grossprojekten wie dem «3000 Rice Genomes Project» ermöglicht. Dieses zielt darauf ab, 3000 Sorten und Landsorten von Reis zu sequenzieren. Die Sequenzdaten erlauben es schliesslich, aus dem riesigen Katalog von Sequenzdaten Pflanzen mit spezifischen Eigenschaften auszuwählen und damit neue Sorten zu generieren, die diese Eigenschaften vereinen (The 3000 Rice Genomes Project 2014).

Damit die Forschung der öffentlichen Hand gegenüber den Forschungs- und Entwicklungsabteilungen grosser Unternehmen nicht ins Hintertreffen gerät, ist eine trans- und interdisziplinäre Vernetzung der Pflanzenzüchtungsbranche erforderlich, z.B. in Kompetenzzentren. So könnte auch der Austausch zwischen den relevanten Stakeholdern gefördert werden. Auch die Forschungsförderung ist zunehmend vernetzt. Da sich die private Pflanzenzüchtung auf wenige, ökonomisch wichtige Hauptkulturen

fokussiert, ist auch hier die öffentliche Hand gefordert, andere Kulturpflanzen, die regional von sehr grosser Bedeutung sein können, weiterzuentwickeln.

Die Pflanzenzüchtung morgen

Weltweit wächst der Bedarf an Nahrungsmitteln. Die Welternährungsorganisation FAO prognostiziert, dass die Kulturpflanzenerträge bis ins Jahr 2050 um rund 70 Prozent zunehmen müssten, um den geschätzten Bedarf an Nahrungsmitteln abzudecken (Abbildung 3). Die Pflanzenzüchtung steht auch zunehmend im Spannungsfeld zwischen Ökonomie und Ökologie, d.h. Ertragssteigerungen dürfen nicht auf Kosten der ökologischen Nachhaltigkeit gehen. Um den von der FAO berechneten Ertragszuwachs auf der aktuell bewirtschafteten Fläche zu erzeugen, müsste der jährliche Züchtungsfortschritt verdoppelt werden. Obwohl mit herkömmlicher Pflanzenzüchtung noch Verbesserungen möglich sind, ist absehbar, dass diese sehr bald an ihre Grenzen stossen wird. Das bedeutet, dass der Werkzeugkasten der Pflanzenzüchtung um weitere Methoden ergänzt werden muss, damit sich neue Möglichkeiten eröffnen. Welches Set an Züchtungstechnologien eingesetzt wird, hängt dabei hauptsächlich von der zu bearbeitenden Kultur, dem Zuchtziel, aber auch von der Grösse des Züchtungsunternehmens ab. Grundsätzlich lassen sich die Anstrengungen in drei Kategorien einteilen: Erhöhung der genetischen Vielfalt, Steigerung des Selektionserfolgs und Beschleunigung der Züchtungsphase. Gerade beim ersten Punkt gibt es durch neue Technologien reichliches Potenzial. Dieses gilt es in Zukunft sinnvoll zu nutzen.

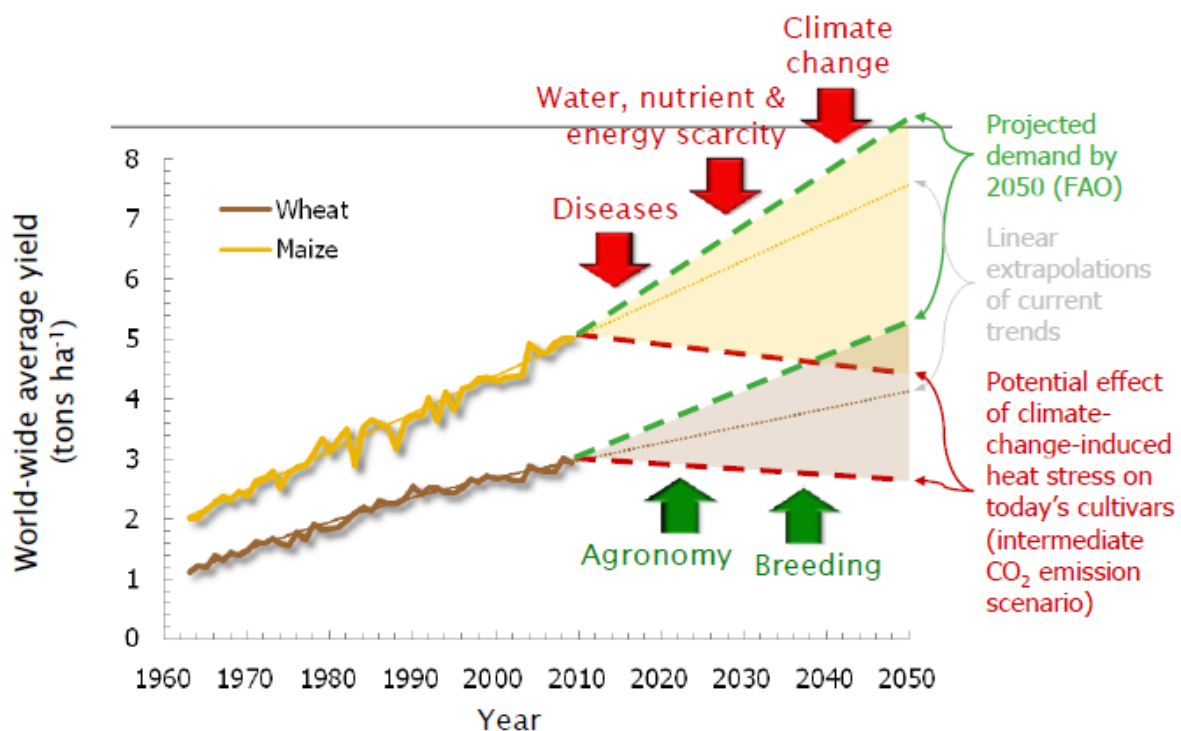


Abbildung 3. Herausforderungen für die Pflanzenzüchtung im 21. Jahrhundert (Quelle: CIMMYT)

Neue Werkzeuge der Pflanzenzüchtung im Fokus: Programmierbare Endonukleasen

Jochen Kumlehn, Leibniz-Institut für Pflanzengenetik und Kulturpflanzenforschung Gatersleben

Jede Zelle eines Lebewesens enthält seine gesamte Erbinformation, d.h. das Genom in Form von DNA, aufgeteilt auf die verschiedenen Chromosomen des jeweils artspezifischen Chromosomensatzes. Die DNA ist ein langkettiges Molekül und besteht primär aus vier verschiedenen Basen, welche die Buchstaben des genetischen Codes verkörpern. Gene sind Informationseinheiten der DNA. Sie enthalten neben dem codierenden auch einen regulatorischen Abschnitt, der die Übersetzung der jeweiligen genetischen Information in Abhängigkeit vom Zelltyp oder von zellulären Reaktionen aktiviert oder unterdrückt. Innerhalb eines Gens codieren immer drei aufeinanderfolgende Basen für eine Aminosäure. Bei der Übersetzung der Gene werden die Aminosäuren zu Ketten verknüpft und bilden die jeweiligen Genprodukte, die Proteine. Das Genom eines höheren Lebewesens besteht aus mehreren Milliarden Basen und beinhaltet typischerweise mehrere 10'000 verschiedene Gene.

Genetische Veränderungen entstehen ständig auf ganz natürliche Art:

- Durch die Rekombination des mütterlichen und väterlichen Erbguts in den Nachkommen.
- Durch Fehler beim Kopieren der DNA in Vorbereitung der Aufteilung der gesamten Erbinformation bei der Zellteilung.
- Durch Fehler bei der Reparatur beschädigter DNA (beispielsweise durch die natürliche UV-Strahlung).
- Durch den Verlust oder die Verdoppelung von Chromosomenteilen, Chromosomen oder ganzer Chromosomensätze (was im Vergleich zu den vorangehenden Phänomenen wesentlich gravierendere Veränderungen darstellt).

Der Austausch von Erbinformationen findet nicht nur innerhalb der gleichen oder nahe verwandter Arten, sondern – anders als allgemein angenommen – auch zwischen sehr unterschiedlichen Arten statt (Crisp et al. 2015). Mit zunehmender Erforschung von Details der Erbinformation sind immer mehr solcher Beispiele zutage getreten. Die Veränderungen erfolgen bezüglich der betroffenen Stelle im Genom und der resultierenden Basenabfolge zufällig und lassen sich weder vorhersagen noch rückgängig machen. Diese natürlichen Prozesse sind Basis und Voraussetzung von Evolution, Domestikation und konventioneller Pflanzenzüchtung.

Für die Herstellung transgener, also gentechnisch veränderter Pflanzen, wird ebenfalls ein natürlicher Prozess instrumentalisiert. Die Übertragung der Gene erfolgt zumeist mit Hilfe des Agrobakteriums *Agrobacterium tumefaciens*. Dieses Bakterium infiziert Pflanzen und überträgt aus eigenem Interesse einen Bestandteil seiner Erbsubstanz in das Erbgut der Pflanze. Diesen Mechanismus macht sich die Gentechnik zunutze. Dazu werden die bakteriellen Gene, die normalerweise ins Pflanzengenom eingefügt werden, durch die Gene von Interesse ersetzt und Pflanzenzellen mit diesen modifizierten Bakterien infiziert. Aus einzelnen transformierten Zellen werden dann mittels Zellkultur (vgl. Seite 14) ganze Pflanzen hergestellt. Der Einbau des Gens erfolgt mit dieser Technik allerdings rein zufällig irgendwo in der pflanzlichen DNA, wobei der Ort jedoch einen Einfluss auf die Pflanze haben kann – so, wie es bei der natürlichen Genübertragung ebenso der Fall ist (Gelvin et al. 2005).

Gezielte Modifikationen der pflanzlichen Erbsubstanz durch Designer-Endonukleasen

Neuere Verfahren gehen zielgerichteter vor. Sie verbinden eine spezifische Sequenzerkennung mit einer Endonuklease. Letztere sind Enzyme, die einen Bruch im DNA-Doppelstrang verursachen. Beispiele für solche programmierbaren Nukleasen, die in der Gentechnik genutzt werden, sind Meganukleasen, Zink-Finger-Nukleasen, RNA-dirigierte Nukleasen und TALENs (Puchta & Fauser 2014). Am Leibniz-Institut für Pflanzengenetik und Kulturpflanzenforschung IPK Gatersleben wird beispielsweise mit TALENs gearbeitet.

Auch in diesem Fall ist das für die Zielgen-spezifische Bindung erforderliche Molekül der Natur – namentlich Bakterien der Gattung *Xanthomonas* – abgeschaut. Diese Bakterien docken an Pflanzenzellen an und schleusen bestimmte Proteine – die sogenannten *transcription-activator-like effectors* (kurz: TAL-Effektoren) – in die Pflanzenzelle ein, die an vorgesehenen Stellen der DNA der infizierten Pflanze binden und diese dazu veranlassen, die betroffenen Gene zum Vorteil des Bakteriums in ihrer Aktivität zu beeinflussen – etwa, damit ihm mehr Nährstoffe zugeführt werden (Nino-Liu et al. 2006).

Die TAL-Effektoren enthalten einen Abschnitt, die DNA-Bindedomäne, die an einen passenden DNA-Abschnitt im Zielgen bindet. Diese DNA-Bindedomäne lässt sich ganz spezifisch für ein beliebiges Zielgen designen. An die Bindedomäne ist die Endonuklease Fok1 gekoppelt, welche den DNA-Doppelstrang an der erwünschten Stelle schneidet. Um die DNA durchtrennen zu können, müssen zwei Fok1-Moleküle von beiden Seiten an derselben Stelle des Doppelstrangs zugreifen. Es braucht daher zwei Einheiten solcher TALE-Nukleasen mit unterschiedlichen Bindedomänen, die jeweils an einen der beiden in der Doppelhelix verbundenen Einzelstänge der DNA binden (Boch et al. 2009). In der Regel werden nach solchen Brüchen die beiden Enden von einem in jeder Zelle vorhandenen Reparatursystem, dem sogenannten «Non-Homologous End Joining», fehlerfrei repariert. Mit geringer Häufigkeit passieren jedoch Fehler, die für den Informationsgehalt des betroffenen Gens folgenschwer sein können. Die häufigsten Fehler sind Insertion oder Deletion, d. h. ein oder mehrere Basenpaare werden zusätzlich eingebaut oder gehen verloren. Da beim Ablesen des Gens immer drei Basen für eine Aminosäure codieren, verschiebt sich nach einer Insertion oder Deletion selbst eines einzelnen Basenpaares der Leseraster ab dieser Stelle bis zum Ende des Gens und der Code verliert dadurch seinen Sinn. Solche DNA-Brüche und Mutationen bei der Reparatur geschehen auch natürlicherweise. Mit TALEN verursachte Mutationen sind von denen nicht unterscheidbar.

Am IPK wurde in einem Machbarkeitsnachweis gezeigt, dass eine gezielte Gen-Abschaltung mit TALEN in Kulturpflanzen funktioniert. Dazu wurden gentechnisch veränderte Gerstenpflanzen erzeugt, die das grün fluoreszierende Protein (GFP)-Gen enthalten. Zellen, die das GFP enthalten, fluoreszieren unter UV- oder UV-nahem blauen Licht. Es wurden TALENs produziert, die an das GFP-Gen binden und dieses zerschneiden können und GFP-transgener Gerstenpollen damit behandelt. Pollen, bei dem ein Fehler bei der Genreparatur aufgetreten ist, fluoreszierte danach nicht mehr. Die Mutation und damit die Genabschaltung sind dabei fest ins Erbgut eingeschrieben und werden an die nachfolgenden Generationen weitergegeben (Gurushidze et al. 2014). Nachdem nun gezeigt wurde, dass die Genabschaltung mittels TALEN grundsätzlich auch in Kulturpflanzen funktioniert, könnte die Methode in Zukunft beispielsweise dazu verwendet werden, die Produktion unerwünschter Pflanzeninhaltsstoffe gezielt zu unterbinden.

Das Verfahren lässt sich weiterentwickeln, indem nach dem DNA-Doppelstrangbruch ein zweiter Reparaturmechanismus, die Homologie-abhängige DNA-Reparatur, ausgenutzt wird. Dieser nutzt DNA-Vorlagen auf sehr präzise Weise, um Schäden in der DNA zu reparieren. Normalerweise verwendet dieser Mechanismus die in der Zelle vorhandenen intakten DNA-Sequenzen der Schwesterchromatiden oder homologen Chromosomen als Vorlage. Es kann jedoch auch eine Reparaturvorlage mit einer Modifikation nach Wahl in die Zelle eingeschleust werden. Mit einer gewissen Häufigkeit wird diese vom Reparaturmechanismus genutzt und die gewünschte Modifikation übernommen. Die in die Zelle eingeführte Reparaturvorlage selber bleibt nicht erhalten, sondern wird wieder abgebaut. Auch für diese Methode gelang den Forschern am IPK der Machbarkeitsnachweis. Sie nutzten dazu wiederum die GFP-transgene Gerste und die Sequenz des gelb-fluoreszierenden Proteins (YFP), das sich vom GFP nur in zwei Basenpaaren bzw. einer Aminosäure unterscheidet. An diesen Stellen wurde mit TALENs ein Doppelstrangbruch verursacht und die Sequenz des YFP als Reparaturvorlage in die Zellen geschleust. Tatsächlich leuchteten danach einige Zellen unter UV-Licht gelb (Budhagatapalli et al. 2015).

TALEN, wie auch die anderen Endonuklease-basierten Verfahren, eröffnet somit die Option, Gene an- und abzuschalten oder jede beliebige Gensequenz mit einer Sequenz eigener Wahl auszutauschen. Die Vorteile liegen auf der Hand und sind gewaltig: Es lassen sich Genfunktionen erforschen (durch

Abschalten des Gens und Untersuchen der Folgen), funktionelle Varianten eines Gens herstellen und damit neue genetische Variation erzeugen, Gene an bestimmten Stellen einfügen, Interaktionsstellen entfernen, die Viren für die Infizierung von Zellen nutzen, oder die Biosynthese von Allergie-auslösenden oder toxischen Proteinen unterbinden. Die Pflanzenzüchtung wird mit diesen Verfahren nicht mehr durch zufällige Veränderungen am Genom, sondern höchst präzise und kontrolliert vorangetrieben.

Auf die Frage, ob sich mit dieser Methode auch Gene einbauen lassen, erwidert J. Kumlehn, dass dies durchaus möglich sei. Das sei aber bereits mit der klassischen Gentechnik möglich gewesen und deshalb im Referat nicht erwähnt worden. Allerdings bieten die Designer-Nukleasen auch hier einen gewichtigen Vorteil, da sich die Einbaustelle des Gens bestimmen lasse, während dies zuvor zufällig erfolgt sei. So lassen sich die Gene gezielt an Stellen einbauen, die zuvor charakterisiert wurden und von denen man weiss, dass dadurch keine unbeabsichtigten Nebeneffekte entstehen.

Einsichten in die Praxis der modernen Rapszüchtung bei Syngenta

Viola Spamer, Syngenta Seeds GmbH; Patricia Ahl Goy, Syngenta Crop Protection AG

Obwohl Raps bereits etwa 2500 v. Chr. entstand, setzte erst mit dem Aufkommen der Raps-Hybridzüchtung in den 1990er-Jahren eine rasche Entwicklung ein. Raps wird zur Herstellung von Speiseöl, Biokraftstoff und als hochwertiges Protein-Futtermittel verwendet. Nach Soja ist Raps global die zweitwichtigste Ölsaat.

Praxis der Rapszüchtung heute

Für die Pflanzenzüchtung gibt es vereinfacht zwei Wege zu neuen Produkten: Entweder über die klassische Kreuzung oder mit Einsatz von Gentechnik. Der Agrarkonzern Syngenta beschreitet beim Raps einzig den klassischen Weg. Das hängt damit zusammen, dass die Abteilung, in der V. Spamer tätig ist, im deutschen Salzuflen ansässig ist und hauptsächlich für den Europäischen Markt züchtet. Für diesen sind mit Gentechnik hergestellte Produkte nicht interessant.

Die Entwicklung neuer Rapsorten erfolgt in zwei Schritten. Zuerst werden aus der zur Verfügung stehenden Rapsvielfalt interessante Pflanzen gekreuzt. Da Raps ursprünglich aus der Kreuzung von zwei verschiedenen Kohlarten entstand, ist es zudem möglich, den Raps zu re-synthetisieren. Das heisst, die ursprünglichen Kohlarten werden neu gekreuzt und somit die Vielfalt in den bestehenden Rapsorten erhöht. Im zweiten Schritt werden Nachkommen mit der gewünschte Merkmalskombination selektiert. Sämtliche neu entwickelte Rapsorten werden zwingend im Feld getestet, bevor sie als verkaufsfähige Sorte auf den Markt kommen (Abbildung 4).

Syngenta arbeitet bei der Entwicklung neuer Sorten eng mit Universitäten zusammen. Die sogenannte Vorzüchtung, welche Grundlagenforschung, anwendungsorientierte Forschung und angewandte Gemeinschaftsforschung beinhaltet, arbeitet an der Schnittstelle zwischen Hochschulen und den firmeneigenen Labors und stellt damit sicher, dass Forschungsergebnisse und neue Techniken aus den Universitäten rasch implementiert werden. Pflanzen aus diesen Forschungskollaborationen werden danach betriebsintern weiterentwickelt, bevor sie an die eigentliche Sortenentwicklung weitergegeben werden. Dies ist der langwierigste Schritt. Anschliessend folgt die Sortenprüfung. Da diese kontinuierlich Rückmeldungen liefert, beginnt Syngenta bei guten Resultaten bereits parallel mit der Saatgutproduktion. Das stellt zwar eine Abweichung vom typischen Ablauf dar, erlaubt aber eine Zeitersparnis. Bis neue Erkenntnisse aus der Grundlagenforschung in einer neuen Sorte beim Bauern aufs Feld kommt, dauert es also über 25 Jahre (Abbildung 5).

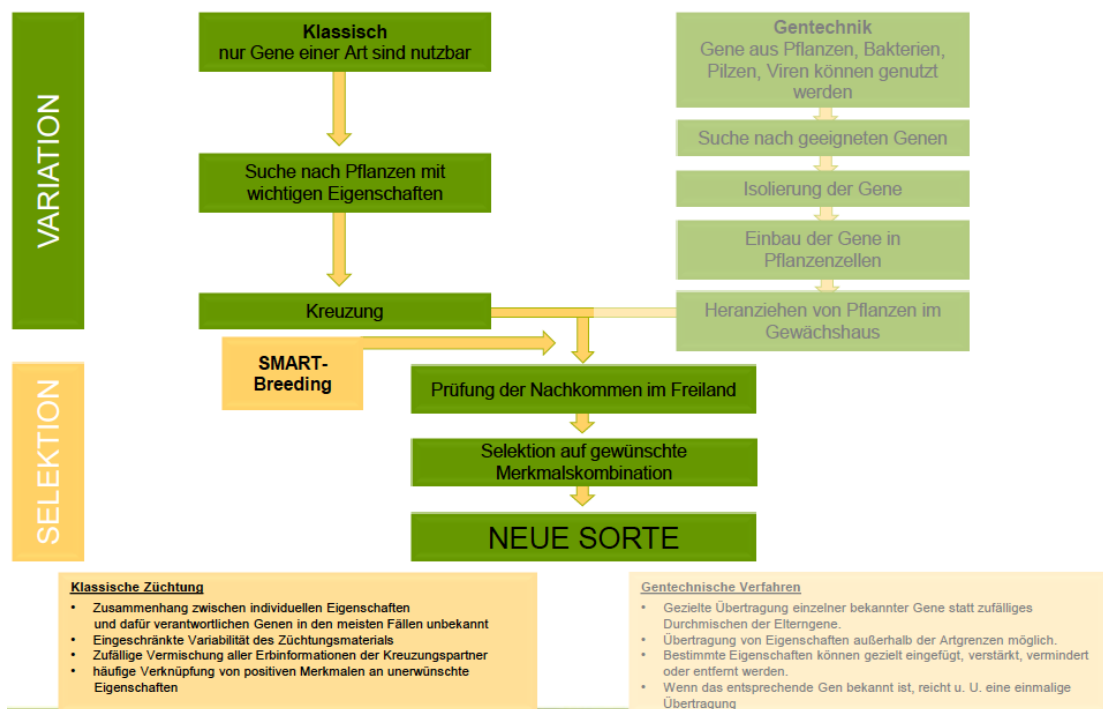


Abbildung 4. Züchtungsschritte (verändert nach www.bdp-online.de)

Syngenta setzt bei der konventionellen Rapszüchtung hauptsächlich auf drei Techniken: Selektions-, Kombinations- und Hybridzüchtung. In der Selektionszüchtung werden reinerbige Inzuchtlinien geschaffen. Dazu werden Rapslinien mit besonders vorteilhaften Eigenschaften ausgewählt und durch Selbstung (d.h. Selbstbefruchtung) und Selektion über mehrere Generationen vorangetrieben, bis möglichst gute Inzuchtlinien, sogenannte Genotypen, entstanden sind. Die Hauptmerkmale sind nun praktisch reinerbig vorhanden. Bei der Kombinationszüchtung werden durch Kreuzung bestehender Inzuchtlinien neue geschaffen, die die Vorteile beider Eltern vereinen. Die entstehenden Inzuchtlinien durchlaufen danach wieder die Selektionszüchtung, bis die erwünschten Merkmale reinerbig vorliegen. Die dritte Technik, die Hybridzüchtung, nutzt die vorhandenen Inzuchtlinien, um dank des Heterosis-Effekts (vgl. Seite 6) möglichst leistungsfähige Sorten zu erzeugen.

Für die Hybridisierung ist es notwendig, dass eine Selbstbestäubung der verwendeten Inzuchtlinien verhindert wird. Syngenta verwendet dazu ein System namens «Safecross», bei dem ein Sterilitätsgen im Zellkern der Pflanzen vorliegt. Aufgrund der hohen Komplexität der Herstellung des sogenannten Basissaatguts werden die Mutter- und Vaterlinien bei Syngenta von jeweils eigenen Expertenteams hergestellt. Diesen vorangestellt ist die Vorzüchtung, die sowohl Vater- als auch Mutterlinie mit den gewünschten Eigenschaften bereitstellt. Aus der Kreuzung des Basissaatguts entsteht schliesslich das Hybridaatgut, das an den Landwirt verkauft wird.

Als wichtigste unterstützende Techniken verwendet Syngenta die Zell- und Gewebekultur und «Smart Breeding». Erstere wird zur Herstellung sogenannter Dihaploiden verwendet, indem unreife, haploide Pollenkörner einer interessanten Linie auf Nährmedien, also *in vitro*, zu vollständig reinerbigen Keimlingen kultiviert werden. Diese Keimlinge sind allerdings immer noch haploid. Durch die Behandlung mit einer Chemikalie wird bei der Zellteilung nach der Verdoppelung der Chromosomen die Aufteilung auf die beiden Tochterzellen unterbunden. Die resultierenden Zellen sind somit wieder diploid, jedoch mit zwei identischen Chromosomensätzen. Aus diesen Zellen können dann unter *in vitro* Bedingungen in einer einzigen Generation reinerbige Nachkommen gewonnen werden. Das entspricht einer Zeitersparnis von sechs Generationen im Vergleich zur Herstellung reinerbiger Linien ohne diese Technik.

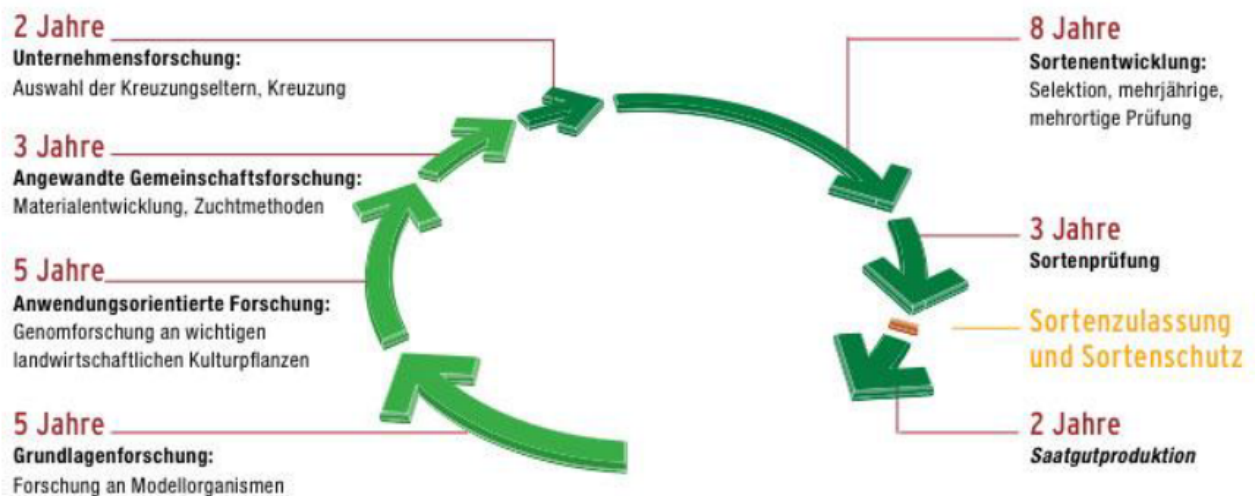


Abbildung 5. Züchtungszyklus (www.bdp-online.de)

Die Techniken des «Smart Breeding» gestatten es, mit erheblich grösserer Präzision zu züchten als bei herkömmlichen Verfahren. «Smart» steht dabei für «Selection with Markers and Advanced Reproductive Technologies», wobei Syngenta hauptsächlich markergestützte Selektion (MAS) verwendet. Bei diesem Prozedere wird für die Selektion der Pflanzen nicht das Erscheinungsbild (Phänotyp) verwendet, sondern der Genotyp, d.h. die DNA, analysiert. Im Idealfall befindet sich die DNA-Zielsequenz des Markers innerhalb des Gens von Interesse. Es kann aber auch sein, dass die Zielsequenz bloss an das Zielgen gekoppelt ist, d.h. häufiger gemeinsam mit ihm vererbt wird, als es bei unabhängiger Vererbung zu erwarten wäre. Den Keimlingen der Nachkommen werden Gewebeproben entnommen, aufgrund derer ermittelt werden kann, ob das erwünschte Profil – die Zielsequenz und damit die erwünschte Eigenschaft – vorhanden ist. So lassen sich die Pflanzen bereits in einem sehr frühen Stadium analysieren, statt bis zur vollen Ausbildung der erwünschten Eigenschaften warten zu müssen. Die entsprechenden Nachkommen werden dann für die weitere Züchtung verwendet (Abbildung 6).

Eine weitere von Syngenta verwendete «Smart Breeding»-Technik ist das «DNA-Fingerprinting». Wie bei MAS wird mit molekularen Markern gearbeitet, die DNA-Sequenzen erkennen. Allerdings werden hier gleichzeitig viele verschiedene Zielsequenzen analysiert, die möglichst gleichmässig und unabhängig über die Chromosomen verteilt sind. Diese Analyse ergibt einen genetischen Fingerabdruck, anhand dessen die Verwandtschaftsbeziehungen berechnet werden können – d.h., es lässt sich damit berechnen, wie gross die genetische Distanz zwischen Individuen, resp. Sorten ist. Je nach Züchtungsziel können so Sorten zum Kreuzen ausgewählt werden, die sich sehr ähnlich sind, aber in bestimmten Eigenschaften unterscheiden, oder es kann mit sehr unterschiedlichen Sorten eine grössere Vielfalt erzeugt werden.

Assoziationskartierungen gehören ebenfalls zum «Smart-Breeding»-Werkzeugset von Syngenta. Sie erlauben es, Genotyp und Phänotyp einer Pflanze in Beziehung zu setzen. Dazu wird eine ganze Pflanzenpopulation, die sich in vielen Eigenschaften unterscheidet, mittels Hochdurchsatz-Sequenzierung analysiert. So können Unterschiede in einem einzigen Basenpaar, sogenannte SNP («Single Nucleotide Polymorphism»), an bestimmten Stellen im Genom mit einem bestimmten Phänotyp in Verbindung gesetzt werden. Die Assoziationskartierung ist auch hilfreich, um «Quantitative Trait Loci» (QTL) zu finden, d.h. die Stellen im Genom, die einen Einfluss auf die Ausprägung bestimmter Erscheinungsmerkmale der Pflanzen haben. Mit diesem Wissen lassen sich auch wieder Marker entwickeln, die man dann bei der MAS verwenden kann. Besonders nützlich ist, dass 2014 das ganze Genom der Raps-pflanze publiziert wurde, woran sich Syngenta beteiligt hatte. Das erlaubt, gefundene QTL einfacher bestimmten

Genen zuzuordnen und auf den Chromosomen zu lokalisieren. Dadurch wird das «Smart Breeding» noch zuverlässiger und effizienter.

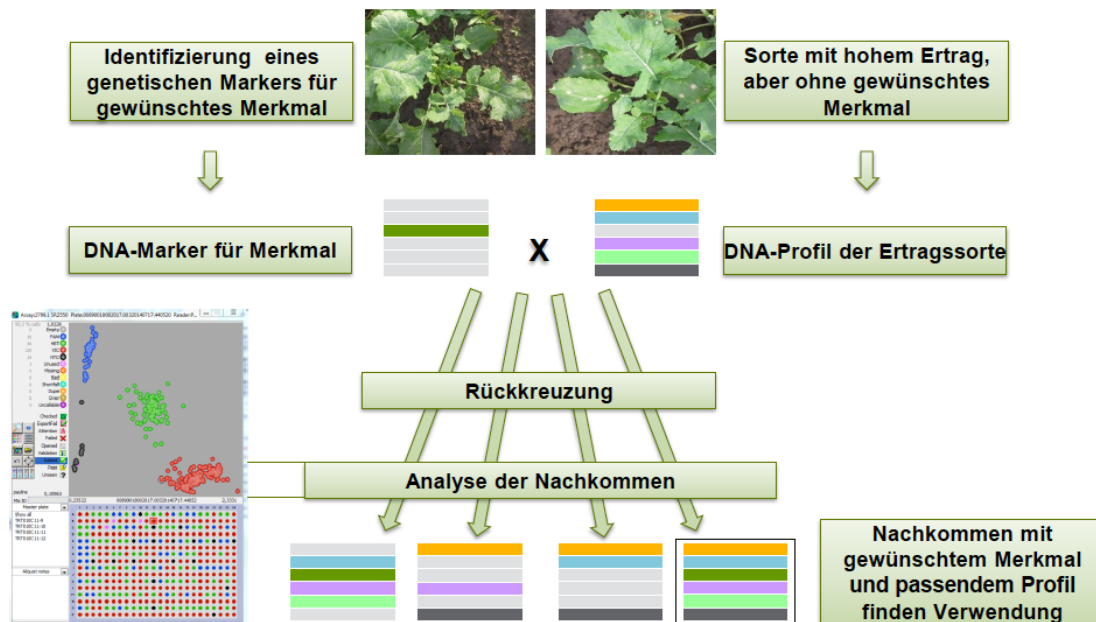


Abbildung 6. SMART-Breeding – Markergestützte Selektion (V. Spamer, Syngenta).

Eine weitere «Smart Breeding»-Technik, die bei Syngenta jedoch nicht eingesetzt wird, ist die Mutationszüchtung mit Tilling, resp. Eco-Tilling. Dieser Ausdruck steht für «Targeting Induced Local Lesions In Genomes» – ein Verfahren, das Mutagenese mit DNA-Screening kombiniert: Mit chemischen Substanzen oder Bestrahlung werden Veränderungen in der DNA verursacht. Anschliessend werden mittels Hochdurchsatz-Sequenzierung jene Pflanzen ausgewählt, die an der gewünschten Stelle eine Mutation aufweisen. Beim Eco-Tilling wird dieselbe DNA-Screening-Technik eingesetzt, es werden aber nur natürlich auftretende Mutationen analysiert und keine mutagenen Stoffe eingesetzt (daher der Zusatz «Eco»). Die klassische Mutationszüchtung profitiert ebenfalls massgeblich von der wachsenden Kenntnis des Genoms, da man die behandelten Pflanzen gezielt auf Mutationen in interessanten Bereichen untersuchen kann.

Potential der neuen Züchtungstechniken für Syngenta

Heute wird in der Pflanzenzüchtung also bereits eine Reihe von modernen Züchtungsverfahren eingesetzt, mit denen grundsätzlich die gleichen Ziele erreicht werden können wie mit herkömmlichen Methoden. Allerdings erlauben sie ein wesentlich präziseres und schnelleres Arbeiten. Dies ist auch für die aktuell diskutierten neuen Verfahren in der Pflanzenzüchtung oft der Fall. Für Syngenta sind diese von grossem Interesse, da sie es erlauben, noch schneller, präziser und flexibler zu arbeiten. Obschon diese Verfahren als neu betrachtet werden können, sind sie tatsächlich oft nur Verbesserungen bereits existierender Methoden. Denn grundsätzlich baut Pflanzenzüchtung immer auf dem auf, was Pflanzengenome von Natur aus machen: Sie sind dynamisch und ändern sich durch spontane Mutationen. Nur verstehen wir die zugrundeliegenden Phänomene immer besser und können viel präziser arbeiten, um die Pflanzen auf erwünschte Art zu verändern. Eine grössere Auswahl an Methoden bedeutet aber auch, dass es mehr als einen Weg gibt, um ein und dasselbe Produkt herzustellen. Nachträglich lässt sich in solchen Fällen aber oft auch mit modernster Technik nicht mehr feststellen, mit welcher Methode das

Produkt hergestellt wurde oder ob es sogar auf konventioneller Züchtung beruht.

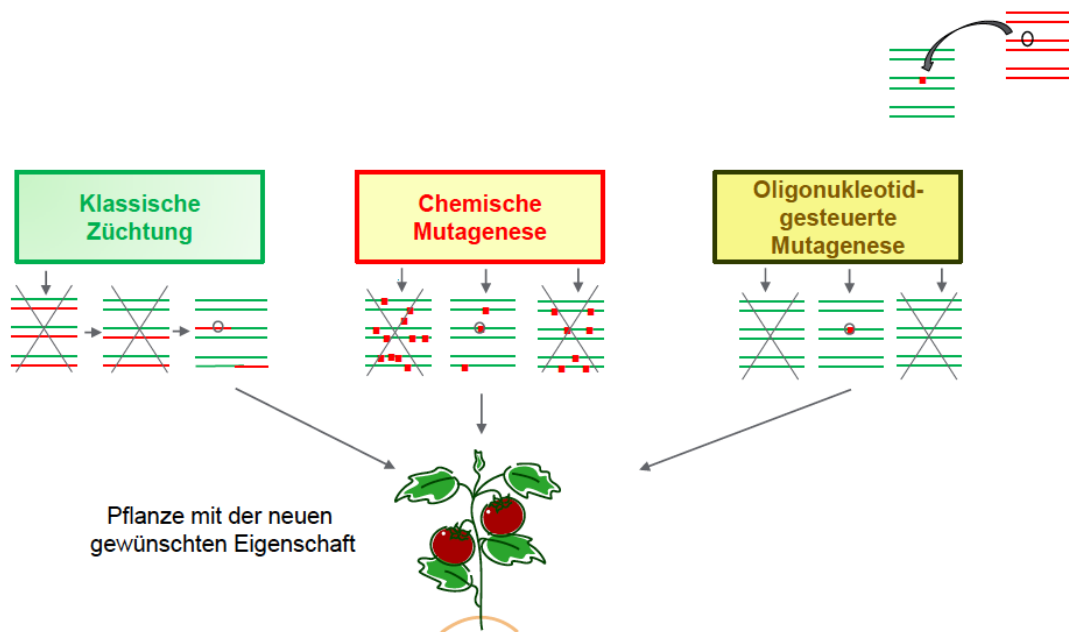


Abbildung 7. Vergleich verschiedener Möglichkeiten, eine Eigenschaft in eine Pflanze einzubringen.

Am Beispiel einer Tomatenpflanze lässt sich illustrieren, wie unterschiedlich die Verfahren sind, die zu einer identischen neuen Sorte führen können (Abbildung 7). Das Ziel könnte etwa darin bestehen, einer auf dem Markt etablierten und auf den Massengeschmack abgestimmten Pflanze eine Mutation an einer bestimmten Stelle des Genoms (d.h. auf einem bestimmten Allel) einzufügen, damit sie tolerant für ein Virus wird. In der konventionellen Züchtung wird die auf dem Markt beliebte Sorte (im Bild grün dargestellt) mit einer virentoleranten Pflanze (rot), die diese Mutation natürlicherweise enthält, gekreuzt. Das Produkt wird dann über mehrere Generationen mit der grünen Sorte rückgekreuzt. Dazu werden nach jeder Generation diejenigen Pflanzen für die weitere Rückkreuzung selektiert, die der grünen Pflanze am ähnlichsten sind, aber auch die Virustoleranz besitzen. Schliesslich liegt eine Pflanze vor, die sowohl alle wesentlichen Merkmale der beliebten «grünen» Tomate als auch das neue Gen für die Virentoleranz besitzt. Das gleiche Ziel lässt sich indes auch durch Mutagenese erreichen. Dabei werden chemische Substanzen oder Strahlung eingesetzt, die Mutationen in der DNA verursachen. Bei diesem Verfahren spielt aber der Zufall eine grosse Rolle, denn es werden zahlreiche Veränderungen an verschiedenen Stellen des Genoms verursacht. Anschliessend werden die Pflanzen identifiziert, bei denen eine Mutation per Zufall die erwünschte Virustoleranz verursacht hat. Wie oben muss diese Pflanze danach wieder über mehrere Generationen rückgekreuzt werden, um alle unerwünschten Mutationen zu entfernen. Eine dritte Möglichkeit bietet die Oligonukleotid-gesteuerte Mutagenese, ein neues Verfahren, das eine sehr gezielte Veränderung an der gewünschten Stelle ermöglicht (vgl. Seite 18). Mit allen drei Ansätzen kann das identische Endprodukt hergestellt werden. Es stellt sich die Frage, ob nun diese neue Sorte auf ihre Sicherheit hin speziell überprüft werden muss. Im Fall der klassischen Züchtung und der chemischen Mutagenese ist das nicht erforderlich – bei jener, die mit der Oligonukleotid-gesteuerten Mutagenese erzeugt wurde, ist es heute noch nicht klar.

Auch wenn bei der Entwicklung von neuen Sorten keine Gentechnik angewendet wird, wird Wissen aus der Gentechnik eingesetzt, etwa bei der Charakterisierung der Pflanzen. Im Vorfeld der Züchtung sind diese Techniken somit unverzichtbar.

Syngenta ist der Ansicht, dass die Risikoprüfung verhältnismässig und dem Risiko angepasst sein sollte

und sich auf wissenschaftliche Erkenntnisse stützen sollte. Um eine Diskriminierung für spezifische Techniken zu vermeiden, sollte das Endprodukt reguliert werden und nicht das Verfahren, das zur Herstellung eingesetzt wurde. Denn es ist die Sicherheit dieses Endproduktes, das am Ende auf dem Feld angebaut und später verarbeitet und konsumiert wird, das für die Zulassung ausschlaggebend sein sollte, und nicht die streng überwachte Entwicklung und Herstellung beim Saatgutproduzenten. Regulatorische Bestimmungen werden einen grossen Einfluss darauf haben, ob die neuen Technologien angewendet werden. Sind die Hürden zu hoch oder ist der Entscheid beim Zulassungsprozess nicht mit hoher Wahrscheinlichkeit abschätzbar, könnte auf die neuen Verfahren verzichtet werden. Da der Umgang mit den Methoden in verschiedenen Ländern unterschiedlich reguliert ist, führt dies zu nicht harmonisierten regulatorischen Anforderungen. Dies zieht nicht nur einen wesentlichen Mehraufwand für die Saatgutproduzenten nach sich, sondern könnte zudem Probleme im internationalen Warenverkehr aufwerfen und das Vertrauen der Konsumentinnen und Konsumenten untergraben.

Aus dem Publikum wurde die Frage gestellt, inwieweit Syngenta in Europa Gentechnik in der vorangehenden Forschung einsetzt, beispielsweise zur Charakterisierung von Genen. V. Spamer antwortet, dass beim Raps auch auf dieser Stufe in Europa keine Gentechnik verwendet wird. Auch aus den Forschungskollaborationen, wo Partner durchaus Gentechnik einsetzten, wird nur das resultierende Wissen verwendet, jedoch kein Material.

Neue Methoden der Pflanzenzüchtung im Licht der europäischen Sicherheitsdiskussion

Joachim Schiemann, Institut für die Sicherheit biotechnologischer Verfahren bei Pflanzen, Julius Kühn-Institut Quedlinburg

Wie mit den neuen Pflanzenzüchtungsverfahren umgegangen werden soll, ist noch offen, und die verantwortlichen Stellen weltweit tun sich schwer mit einer Entscheidung. Dabei ist diese Entscheidung massgebend für die künftige Sicherheitsbewertung dieser Technologien, denn GV-Pflanzen unterliegen heute einer spezifischen gesetzlichen Regulierung und umfangreichen Sicherheitsprüfungen, während dies für konventionelle Pflanzen nicht der Fall ist. Nach geltendem EU-Recht ist ein gentechnisch veränderter Organismus (GVO) definiert als ein Organismus mit Ausnahme des Menschen, dessen genetisches Material in einer Weise verändert worden ist, wie es unter natürlichen Bedingungen durch Kreuzen oder natürliche Rekombination nicht vorkommt. Daneben sind im Anhang der Freisetzungsverordnung Verfahren aufgelistet, die zu GV-Pflanzen, respektive nicht zu GV-Pflanzen führen. Aus Sicht von J. Schiemann ist die Fokussierung auf die verwendete Technik jedoch überholt. Vielmehr sollten die verschiedenen Züchtungstechnologien im Zusammenhang gesehen werden.

Die Europäische Kommission hatte bereits 2007 eine Experten-Kommission zu dieser Thematik ins Leben gerufen, die 2012 ihren abschliessenden Bericht vorgelegt hat. Das europäische Zentrum für Forschung, das Joint Research Center, verfasste eine Bewertung der neuen Techniken mit Blick auf die GVO-Gesetzgebung der Länder (Lusser & Rodriguez-Cerezo 2012). Zudem hat es ausgeleuchtet, welche neuen Techniken heute bereits angewendet werden, welche ökonomischen Auswirkungen sie haben und welche Techniken zurzeit in der Pipeline stecken (Lusser et al. 2011). In diesem Bericht wurden acht neue Pflanzenzüchtungstechniken definiert:

- 1) Zinkfinger-Nukleasen (diese Kategorie wurde unterdessen erweitert und beinhaltet alle Nukleasen-basierten Verfahren, inkl. TALEN: vgl. Seite 11)
- 2) Oligonukleotid-gesteuerte Mutagenese: Erlaubt die Verursachung von Punktmutationen an bestimmten Stellen. Diese Technik wird schon breit angewendet.
- 3) Cisgenese / Intragenese: Funktioniert analog zur «klassischen» gentechnischen Veränderung bei transgenen Pflanzen. Im Gegensatz zu dieser wird jedoch ein Gen derselben oder einer nah

- verwandten, kreuzungskompatiblen Art eingeführt. Bei der Cisgenese wird das Gen inklusive Intron und regulatorische Elemente unverändert eingeführt. Bei der Intragenese können die DNA-Fragmente zur Optimierung der Genfunktion neu zusammengesetzt werden. Produkte der Cisgenese könnten auch durch Kreuzung entstehen, solche der Intragenese hingegen nicht.
- 4) RNA-gesteuerte DNA-Methylierung: Mit einem RNA-Fragment wird die Methylierung eines Gen-Abschnitts verursacht, was eine Abschaltung des Gens zur Folge hat. Das veränderte Methylierungsmuster wird an die nächste Generation vererbt. Dieses Verfahren fällt ins Gebiet der Epigenetik, d.h. nur die Genregulierung ist betroffen, die DNA-Sequenz wird jedoch nicht verändert.
 - 5) Pfropfen auf transgene Unterlagen (Grafting): Auf einen transgenen Wurzelstock wird ein nicht transgener Pfropfreis aufgepfropft. Dieser kann dadurch Eigenschaften vom transgenen Wurzelstock erhalten, ohne dass die eingeführten Gene selber im Spross und damit den Früchten und Samen vorhanden sind.
 - 6) Rückwärts-Züchtung (Reverse Breeding): Kehrt den Züchtungsprozess um, indem von einer selektierten erwünschten Hybridpflanze ausgegangen wird und daraus über Zwischenschritte die homozygoten Eltern hergestellt werden. Werden die beiden Elternlinien gekreuzt, entsteht immer die erwünschte Hybridpflanze. In einem der Zwischenschritte wird ein Transgen eingeführt, um die Rekombination während der Meiose zu unterdrücken. Dieses Transgen wird jedoch später wieder herausgezüchtet.
 - 7) Agro-Infiltration: Wie bei der *Agrobacterium*-basierten Transformation (vgl. Seite 10) wird das gewünschte Gen in dieses Bakterium eingefügt. Danach wird eine Bakterien-Suspension in einen Teil der Pflanze (typischerweise in ein Blatt) eingebracht. Dies hat eine transiente, d. h. zeitlich begrenzte, Expression des eingeführten Gens zur Folge. Das Gen wird jedoch nicht stabil ins Pflanzengenom eingebaut, sondern wieder abgebaut. Wegen der Einfachheit, Geschwindigkeit und der hohen resultierenden Expressionsrate wird diese Technik oft in der Forschung eingesetzt, um die Auswirkungen der Ausprägung der transient eingeführten Gene zu testen. Zudem werden auf diese Weise bereits heute hochwertige Substanzen kommerziell im Gewächshaus produziert («Plant Molecular Farming»).
 - 8) Synthetische Biologie: Herstellung von Genen, Gengruppen, neuartigen Genkombinationen und ganzen Genomen im Labor. Auch das Erzeugen neuer Stoffwechselfade fällt in diese Kategorie. Die Möglichkeiten sind umfassender als bei allen anderen Methoden, aber das Gebiet ist noch weit von Anwendungen bei Pflanzen entfernt.

Die von der EU-Kommission eingesetzte Expertenkommission folgert in ihrem Abschluss-Bericht, dass folgende Techniken von der GVO-Regulierung ausgeschlossen werden sollten:

- Oligonukleotid-gesteuerte Mutagenese
- Zinkfinger Nukleasen (aktuell: alle Nukleasen-basierte Verfahren) ohne Einführung rekombinanter DNA
- Nachkommen und Produkte aus Pfropfungen mit nicht gentechnisch verändertem Pfropfreis
- Nachkommen von Pflanzen, bei denen eine transiente Agro-Infiltration angewendet wurde
- RNA-gesteuerte DNA-Methylierung
- Nachkommen aus der Rückwärts-Züchtung

Folgende Verfahren könnten gemäss der aktuellen europäischen Gesetzgebung der GVO-Regulierung unterstehen:

- Zinkfinger Nukleasen, wenn rekombinante DNA eingeführt wird
- Cis- und Intragenese
- Nachkommen und Produkte aus Pfropfungen, wenn GV- Pfropfreis eingesetzt wird
- Agro-Infiltration, wenn Pflanzen entstehen, die stabil transformiert wurden und rekombinante DNA enthalten
- RNA-gesteuerte DNA-Methylierung, wenn die Pflanze auch rekombinante DNA enthält
- grundsätzlich alle Pflanzen, die rekombinante DNA enthalten (inklusive aller intermediären Pflanzen bei der Züchtung, die solche enthalten)

Allenfalls wäre es möglich, Pflanzen und Produkte aus Intra- und Cisgenese oder aus Zinkfinger Nukleasen von der GVO-Regulierung auszunehmen, sofern das identische Produkt mit konventionellen Methoden erzeugt werden könnte. Offen ist zudem die Frage, wie mit Pflanzen umgegangen werden soll, bei denen während der Entwicklung ein Gen eingefügt wurde, dieses aber wieder herausgekreuzt wurde und in der resultierenden Pflanze nachweislich nicht mehr vorhanden ist. Die Situation wird zusätzlich erschwert durch die Tatsache, dass die EU-Kommission die oben erwähnte Liste zwar erstellen und im Kreis der entsprechenden Fachbehörden der EU-Mitgliedstaaten zirkulieren liess, sie aber nie offiziell publizierte. Dadurch sind keine offiziellen Bezüge auf diese Liste möglich. In Deutschland ist die Situation insofern besser als in anderen EU-Ländern, als die Zentrale Kommission für Biologische Sicherheit ZKBS basierend auf den Schlüssen der EU-Kommission eine Stellungnahme veröffentlichte, die weitestgehend zu denselben Schlüssen gelangt (ZKBS 2012).

Regelungen für den Umgang mit den neuen Züchtungstechnologien können somit bis zu einem gewissen Grad von bestehenden Direktiven der ZKBS abgeleitet werden. Aber es mangelt sowohl der EU als auch der Europäischen Kommission an einer klaren Position. Und wann sich letztere des heiklen Themas annehmen und zu Sicherheitsbewertung und Regulierung der neuen Züchtungstechniken verbindlich äussern wird, ist unklar. Interessanterweise befand Vytenis Andriukaitis, der zu diesem Zeitpunkt amtierende EU-Kommissar für Gesundheit und Lebensmittelsicherheit, noch vor seinem Amtsantritt, die zurzeit geltenden Regeln für GVO würden zu Konflikten führen und die Haltung der einzelnen Staaten würde ignoriert. Unterdessen wurde für GV-Pflanzen eine «Opt-out»-Lösung beschlossen: In Zukunft werden die einzelnen EU-Staaten für ihr Land ein Anbauverbot von in der EU zugelassenen GV-Pflanzen aufgrund nicht wissenschaftlicher Argumente verfügen können. Dadurch soll sich der Konflikt zwischen EU-Ländern, die dem Anbau von GVO grundsätzlich offen gegenüber stehen, und denen, die diesen ablehnen, entschärfen.

Anders als die politischen Akteure haben die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler in der EU durchaus eine Position, die beispielsweise in den entsprechenden Berichten von EFSA, ZKBS oder dem JRC festgehalten ist. Die Europäische Lebensmittelbehörde EFSA beschäftigte sich intensiv mit Cis- und Intragenese sowie Zinkfinger Nukleasen und kam für diese zum Schluss, die bestehende GVO-Reglementierung und die Methoden der Sicherheitsbewertung reichten auch für diese aus (EFSA 2012a,b). Dieses Verdikt kann im Prinzip auf die anderen neuen Verfahren ausgeweitet werden. Auf der Grundlage einer Fall-für-Fall-Beurteilung wäre es gar möglich, dass für mit diesen Techniken entwickelte Pflanzen unter Umständen sogar weniger Daten als für transgene Sorten erforderlich sein könnten.

Wichtig ist auch der im Jahr 2013 erschienene Bericht «Planting The Future» des Dachverbandes der Europäischen Akademien EASAC (EASAC 2013). Zentrale Elemente dieser Arbeit sind die Definition des Begriffs «Crop Genetic Improvement Technologies», der sowohl die klassischen Züchtungsmethoden, die Transgenese und die neuen Züchtungstechniken umfasst, sowie die Aussage, dass in Zukunft das Produkt – d.h. die Pflanze und ihre Eigenschaften – im Zentrum der Sicherheitsprüfung stehen soll und nicht das Verfahren, das zur Herstellung des Produktes verwendet wurde. Auch die ehemalige wissenschaftliche Beraterin der EU-Kommission, Anne Glover, hat sich für diese Position und gegen eine «zu Tode-Regulierung» der neuen Techniken ausgesprochen; ihre Stelle wurde allerdings von Jean-Claude Juncker bei dessen Amtsantritt als neuer Kommissionspräsident abgeschafft.

In der Schweiz kam das vom Schweizerischen Nationalfonds finanzierte Nationale Forschungsprojekt «Nutzen und Risiken der Freisetzung gentechnisch veränderter Pflanzen» zum Schluss, dass es keine Gentechnik-spezifischen Risiken für Gesundheit und Umwelt gebe und eine gesonderte Behandlung von GVO wissenschaftlich fragwürdig sei (NFP 59 2012). Auch ein neues Positionspapier der Europäischen Organisation für Pflanzenwissenschaften EPSO kommt zum Schluss, dass alle verfügbaren Technologien genutzt werden sollten, um die Pflanzenzüchtung in Europa voranzubringen (EPSO 2015). Sollte ein Paradigmenwechsel hin zu einer produktbasierten Sicherheitsbewertung und Regulierung stattfinden, ist es für die Pflanzenzüchtung essentiell, dass eine Überregulierung vermieden und ganz klar definiert wird, was genau eine neue Eigenschaft in einer Pflanze ausmacht, um Rechtssicherheit zu schaffen. Das ist vor

allein für kleinere Unternehmen wichtig, für die Investitionen in Forschung und Entwicklung ein grösseres Risiko darstellen. Dies könnte auch dazu beitragen, die Dominanz weniger Grosskonzerne zu reduzieren.

Sicherheitsbeurteilung aus behördlicher Sicht

Helmut Gaugitsch, Umweltbundesamt Österreich

Lange Zeit waren Biosicherheitsfragen der neuen Züchtungstechniken in Europa kaum Thema. Wenn doch, dann im Hinblick auf regulatorische Aspekte und die Frage, ob bestimmte Techniken unter den Rechtsrahmen des Gentechnikgesetzes fallen. Andere Länder sind diesbezüglich schon wesentlich weiter. Beispielsweise steht in Kanada bei der Zulassung von Pflanzen bereits heute die neue Eigenschaft im Zentrum der Evaluation der Umweltsicherheit.

Dabei gibt es mit Blick auf Produkte der neuen Züchtungstechniken durchaus sicherheitsrelevante Fragen, etwa im Hinblick auf Pflanzen für den Einsatz in Herbizidtoleranz-Systemen, mit veränderter Zusammensetzung oder mit verbesserter Umweltfitness (z.B. Krankheitsresistenz oder Toleranz gegen Hitze, Dürre, Salz). Dies sind allerdings keine neuen Fragen, vielmehr wurden sie bereits im Zusammenhang mit der Gentechnik behandelt.

Cell / Protoplast fusion	Vegetable breeding programmes (cytoplasmic male sterility in cabbage)
Marker Assisted Selection	Widely used in conventional breeding
Oligonucleotide-directed mutagenesis	Herbicide tolerant oilseed rape / flax
Nuclease-mediated site-directed mutagenesis	Improved nutritional quality maize, higher yield tomatoes, disease resistant wheat, improved nutritional quality canola, starch modified potatoes
<u>Cisgenesis & Intragenesis</u>	Apple scab resistance, potato late blight resistance, drought/cold tolerant maize, fungal resistant papaya, improved forage ryegrass
Grafting (<u>Transcrafting</u>)	E.g. citrus trees with transgenic rootstock
Techniques to support breeding	Hybrid seed Maize/Rice with Seed Production Technology (GM-Maintainer), Accelerated breeding tested e.g. with fruit trees (apple, plum)
<u>Agroinfiltration</u>	E.g. screening of pathogenicity factors and disease-resistance in potato

Abbildung 8. Beispiele für NPBT-Anwendungen in der Pflanzenzüchtung (Schaart & Visser 2014; Rudgers & Sastry-Dent 2014).

Ein wichtiger Aspekt der neuen Züchtungsverfahren für die Regulation ist, dass sie typischerweise in Kombination eingesetzt werden, auch zusammen mit Methoden aus der konventionellen Züchtung und älteren Verfahren aus der Gentechnik. Auch sind die einzelnen Verfahren unterschiedlich weit fortgeschritten. Die meisten stecken noch in einem Stadium, in dem ihre Möglichkeiten und Zuverlässigkeit evaluiert werden. Kurzfristig sind nur wenige kommerziell anwendbare Techniken

abzusehen – allerdings sind diese wirtschaftlich von erheblicher Bedeutung (Abbildung 8).

Eine Herausforderung für die Regulierung besteht darin, dass mit verschiedenen Techniken Pflanzen mit ähnlichen oder gleichen Merkmalen erzeugt werden können. Das lässt sich am Beispiel des «Clearfield»-Systems der Firma BASF aufzeigen, das aus konventionell gezüchtetem herbizidtolerantem Raps und dem entsprechenden Herbizid besteht. Ähnliche Pflanzen mit Herbizidtoleranz könnten mit Mutagenese (also konventioneller Züchtung), Gentechnik oder eben mit neuen Züchtungsverfahren (beispielsweise mit der Oligonukleotid-gesteuerte Mutagenese) erzeugt werden. Hier lautet aus behördlicher Sicht die zentrale Biosicherheitsfrage, ob das neue Produkt Umwelteffekte hervor ruft, weil es zu Veränderungen im landwirtschaftlichen Management führt.

Die zweite Herausforderung liegt darin, dass mit der gleichen Züchtungstechnik verschiedene Merkmale erzeugt werden können, die gegebenenfalls unterschiedliche Risiken nach sich ziehen. Es ist daher zu diskutieren, ob es sinnvoll ist, dass für die Risikoabschätzung die verwendete Technik massgebend ist, wenn das Risiko in erster Linie von der neuen Eigenschaft der Pflanze abhängig ist. Allerdings muss auch das Risiko durch unbeabsichtigte Folgen berücksichtigt werden, und auf dieses hat die angewandte Methode durchaus einen Einfluss. Allerdings ist dieses Risiko schwer einschätzbar. Im Vergleich der heute angewandten Techniken ist es aber bei der Mutagenese am grössten, also einer Technik, die in der konventionellen Züchtung seit Jahrzehnten angewendet wird (Abbildung 9). Aufgrund der Präzision der neuen Techniken dürfte bei diesen das Risiko für unbeabsichtigte Folgen relativ gering sein.

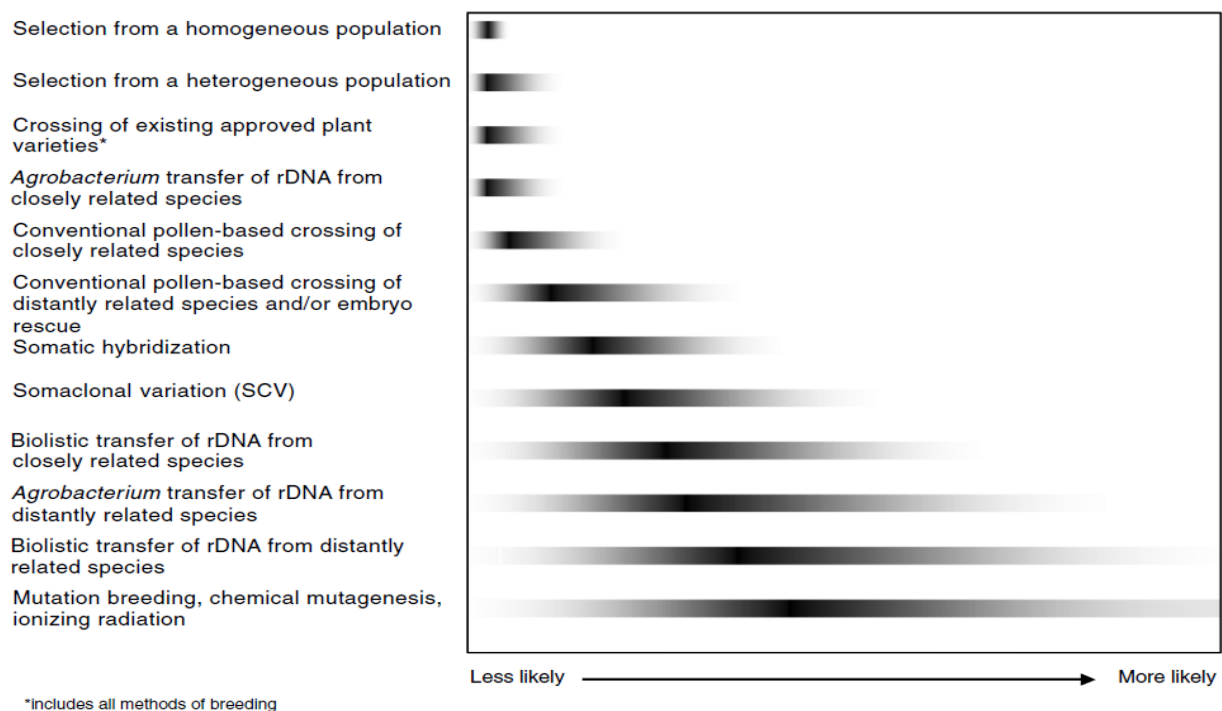


Abbildung 9. Herausforderungen der Risikoabschätzung (NRC, 2004).

Diese beiden Herausforderungen zeigen die Wichtigkeit einer Evaluation von Fall zu Fall. Aus behördlicher Sicht wird weder eine rein prozess- noch eine rein produktbasierte Evaluation den Ansprüchen einer umfassenden Risikoabschätzung gerecht. Das Umweltbundesamt Österreich hat im Auftrag der Eidgenössischen Ethikkommission für die Biotechnologie im Ausserhumanbereich EKAH eine Studie zu den Risiken neuer Verfahren in der Pflanzenzüchtung verfasst (Eckerstorfer et al. 2014). Im Rahmen

dieser Arbeit wurden die auf den Seiten 17-18 aufgeführten Methoden hinsichtlich ihrer Risiken analysiert. Aus den Ergebnissen wurden grundsätzliche Kriterien für die Risikoabschätzung abgeleitet (Abbildung 10). Weiter wurden die regulatorischen Rahmenbedingungen für den Umgang mit der Gentechnik in der EU, einzelnen EU-Staaten, Kanada und gemäss Cartagena-Protokoll über die biologische Sicherheit analysiert und offene Fragen zu den neuen Verfahren herausgearbeitet. Im Wesentlichen sind die Kriterien jedoch ähnlich wie für die GV-Pflanzen.

Intended modification by NPBT	<ol style="list-style-type: none"> 1) Is a genetic modification intentionally introduced? <ol style="list-style-type: none"> 1.1) What kind of genetic modification? 1.2) How stable are the introduced genetic modifications? 2) Are epigenetic modifications intentionally introduced? <ol style="list-style-type: none"> 2.1) What kind of epigenetic modification? 2.2) Is a genetic modification necessary to establish the epigenetic effect?
Potential unintended effects of the used NPBT	<ol style="list-style-type: none"> 1) Are unintended genomic changes introduced? 2) Are non-plant sequences introduced? 3) Are (epigenetic) effects on gene regulation induced? 4) Which other uncertainties may be associated?
Characteristics of the targeted traits	<ol style="list-style-type: none"> 1) Source of trait 2) Function of trait(s) 3) Mode of action of trait 4) Type of trait 5) Stability of the trait

Abbildung 10. Identifikation von «Risk Relevant Issues» (Eckerstorfer et al. 2014).

Die Studie schlägt für die Risikoanalyse der neuen Verfahren folgende Kriterien vor, die eine Charakterisierung der Pflanze und die existierenden Erfahrungswerte berücksichtigt:

- Art der genomischen Modifikationen
- Vorhandensein artfremder Sequenzen
- Modifikation der Genexpression
- Wissen und Erfahrungswerte zu den neuen Merkmalen

Die allgemeinen Prinzipien, die den bereits existierenden Biosicherheits-Regelungen – seien es die europäischen Gesetze, das Cartagena-Protokoll über Biosicherheit oder die kanadische, merkmalsbasierte Gesetzgebung – zugrunde liegen, sind auch für die Risikoabschätzung neuer Züchtungstechnologien relevant. Dies beinhaltet die wissenschaftliche Abschätzung möglicher adverser Effekte und Unsicherheiten («Hazard Assessment») und zwingend auch einen Fall zu Fall-Ansatz. Es sind also keine aussergewöhnlichen Fragestellungen absehbar. Etwaige Besonderheiten der verschiedenen Züchtungstechniken betreffend Methode, Unsicherheit und Möglichkeit der Veränderungen, die damit in den Pflanzen vorgenommen werden können, sollen jedoch gegebenenfalls in die Risikoabschätzung mit einbezogen werden. In anderen Worten: Es braucht generelle, für sämtliche Techniken gültige Rahmenbedingungen, sowie zusätzlich spezifische Rahmenbedingungen für die jeweiligen Methoden.

Dennoch besteht für mehrere Fragen Klärungsbedarf:

- Wann ist eine vertiefte Risikoanalyse notwendig? (Die kanadische Gesetzgebung beispielsweise orientiert sich hierfür an der Neuartigkeit und dem Risikopotenzial der in die Pflanze eingeführten Eigenschaft.)
- Mit welchen Methoden sollen indirekte und Langzeiteffekte erfasst werden?
- Welches sind geeignete Vergleichspflanzen? (Eine Risikoabschätzung gilt nie absolut, sondern bezieht sich auf eine bekannte Grösse.)
- Wie soll mit Unsicherheiten umgegangen werden, insbesondere in Anbetracht des beschränkten Ausmasses an robustem wissenschaftlichem Grundlagenwissen und des Mangels an Studien, die spezifisch auf Risikoanalyse-Aspekte abzielen?

Um diese Punkte zu klären, braucht es eine Zusammenarbeit von Wissenschaft und Behörden. Es ist der Problematik jedoch nicht angemessen, wenn die Diskussion über die adäquate Risikoanalyse auf die beiden Optionen prozess- oder produktbasiert reduziert wird. Aus Sicht von H. Gaugitsch braucht es eine Mischung aus beiden Ansätzen. Die bei der Erzeugung einer Pflanze angewandten Methoden müssen zumindest mitberücksichtigt werden, damit in diesem Schritt geklärt werden kann, ob diese relevant für die Risiken der Pflanze und dadurch für die weitere Risikoanalyse sind oder nicht.

In der Diskussion wurde darauf hingewiesen, dass die sinnvolle Mischung zwischen der prozess- und der produktbasierten Bewertung durch die europäische Gesetzgebung selber behindert werde: Sowohl das Cartagena-Protokoll als auch die Schweizer Regulierung orientieren sich bisher ausschliesslich an der verwendeten Technik, sind also rein Prozess-basiert. Dabei gälte es, in einer umfassenden Betrachtung die Nachteile gegen die Vorteile abzuwägen.

Eine weitere Wortmeldung gab zu bedenken, dass die erwähnte Studie des National Research Council (2004) klare Aussagen zu den nicht beabsichtigten Folgen von Pflanzen aus neuen Züchtungstechnologien enthält. Diese Beurteilung deckt sich mit jener einer neueren Studie (Ladics et al. 2015); beide halten fest, dass sich Produkte aus neuen Züchtungsverfahren hinsichtlich der unbeabsichtigten Folgen nicht von konventionell gezüchteten neuen Pflanzen unterscheiden.

H. Gaugitsch macht hier geltend, dass unbeabsichtigte Folgen nicht einzig aufgrund wissenschaftlicher Ergebnisse zu beurteilen seien, sondern dass auch der gesellschaftlichen Auseinandersetzung und den damit verbundenen Werthaltungen Rechnung zu tragen sei. Ausserdem lässt sich aus den genannten Studien auch ein anderer Schluss ziehen: Die Risikoprüfung neuer Züchtungen wäre demnach nicht jener für konventionell gezüchtete Pflanzen anzugleichen, sondern es sollten vielmehr auch konventionell gezüchtete Pflanzen genauer untersucht werden, wenn sie neu in den Markt eingeführt werden.

Rechtliche Grundlagen für die Pflanzenzüchtung in der Schweiz

Christoph Errass, Law School, Universität St. Gallen

Der Umgang mit Pflanzen in der Schweiz ist grundrechtlich durch die Wissenschaftsfreiheit, die Wirtschaftsfreiheit und die Eigentumsgarantie geregelt. Grundrechte sind aber einschränkbar; Voraussetzung bilden neben der Verhältnismässigkeit öffentliche Interessen, welche sich in Verfassung und Gesetz finden. Relevant für den Umgang mit Pflanzen sind diesbezüglich der Schutz der Umwelt, der Gesundheit, der landwirtschaftlichen Produktion, der Pflanze selber («Würde der Kreatur»), der Umgang zwischen alt und neu, die intellektuelle Leistung (Innovation) und der Schutz des Eigentums Dritter. Diese Kriterien finden sich in diversen Verfassungsbestimmungen, welche in verschiedenen Gesetzeserlassen konkretisiert werden, insbesondere in den Regelungen betreffend pathogene Organismen und nicht-GVO im Umweltschutzgesetz (USG) sowie materielle Anforderungen an Pflanzen aus Sicht der Landwirtschaft und Bewilligungsverfahren im Landwirtschaftsgesetz (LwG). Für gentechnisch veränderte Pflanzen ist zudem das Gentechnikgesetz (GTG) relevant. Dieses gilt sowohl für GVO als auch für Produkte, die solche

enthalten, und stellt materielle (Schutz von Umwelt und Gesundheit, Koexistenz und der Würde der Kreatur) und formelle Anforderungen (Bewilligungsverfahren) und regelt die Frage der Haftpflicht.

Das USG und das GTG weisen Gemeinsamkeiten auf. Zum Schutz von Umwelt und Gesundheit liegt die Messlatte abstrakt gesehen gleich hoch: Umwelt und Gesundheit dürfen weder geschädigt noch beeinträchtigt werden. Auch gelten der Schutz der Würde der Kreatur, das Vorsorgeprinzip und die Notwendigkeit eines Bewilligungsverfahrens für bestimmte Tätigkeiten in beiden Fällen. Zudem sind USG und GTG parallel neben dem LwG anwendbar. Dies bedeutet, dass die Verfahren koordiniert und alle materiellen Anforderungen beider Gesetze erfüllt werden müssen.

Grundrechte und Verfassungsinteressen verfolgen in der Regel verschiedene Interessen, weshalb ein Interessensausgleich zu bewerkstelligen ist. Wie erfolgt dieser Ausgleich? Zunächst erfordert es eine Prognose, die Aufschluss über die möglichen Szenarien gibt; diese ist deskriptiv und Aufgabe der Naturwissenschaften. Ausserdem muss im Hinblick auf den Umgang ein Zulässigkeitsmassstab definiert werden, der festhält, was zulässig ist. Diese Definition ist eine gesellschaftliche Frage, keine naturwissenschaftliche. Bei neuen Technologien sind in der Regel sowohl die Prognose und der Zulässigkeitsmassstab unklar. Wir befinden uns insofern in einer Risikosituation.

Im Fall gentechnisch veränderter bzw. mit neuen Verfahren gezüchteter Pflanzen liegt eine solche Risikosituation vor; trotzdem sind Entscheidungen zu treffen. Die Prognose ist sehr unbestimmt, weil gerade bei neuen Technologien das Nichtwissen relativ gross ist. Ebenfalls sind die Wertungen unklar. Das Nichtwissen muss deshalb in die Entscheidungssituation einbezogen werden. Risikosituationen lassen sich wie folgt strukturieren: in eine Risikoanalyse («was kann passieren?»), in eine Risikobewertung («was soll zulässig sein, was nehmen wir in Kauf?») und ein Risikomanagement («Mit welchen Massnahmen vermindern wir das Risiko?»). Für die Risikoanalyse sind die Naturwissenschaftler zuständig, für die Bewertung die Gesellschaft bzw. der Staat (aufgrund naturwissenschaftlicher Vorleistungen), und das Management arbeiten Staat und Naturwissenschaft bzw. Gesuchsteller/Anwender gemeinsam aus. Die Massnahmen müssen verhältnismässig sein. Anhang 4 der Freisetzungsverordnung, wo die Risikoanalyse, die Risikobewertung und das Risikomanagement gesamthaft dargestellt werden, ist ein gutes Beispiel für den Umgang mit Risiken in einer Situation unvollständigen Wissens.

In Bezug auf die Regulierung neuer Technologien hat der Staat deshalb auf das fehlende Wissen bei der Risikoanalyse einerseits und bei Risikomanagement einschliesslich der Risikobewertung andererseits bereits reagiert oder, im Falle von noch unregulierten Bereichen, hat noch zu reagieren, um den Schutz der Verfassungsinteressen zu verwirklichen. Anerkannte Elemente sind ein umfassendes Bewilligungsverfahren sowie der Einbezug der Öffentlichkeit und Fachkommissionen, um deren Wissen mit zu berücksichtigen. Ausserdem ist ein gestaffeltes Vorgehen vorgesehen, wobei der Umgang auf der nächsten Stufe nur gestattet wird, wenn das auf der vorherigen Stufe gewonnene Wissen ausreicht, um das Risiko auf der anstehenden Stufe zu beurteilen. Dies ist auch zugunsten der Pflanzenzüchtung, da damit zum einen dem Verlust von Investition vorgebeugt werden kann und zum anderen die Erteilung einer Bewilligung besser gewährleistet ist. Im Landwirtschaftsbereich wird diese Strategie deshalb schon länger verfolgt; sie wird auch im USG und im GTG angewendet. Die Sachlage muss zudem periodisch überprüft werden, weil sich im Verlauf der Zeit die sachlichen Umstände und die Technik ändern und neue Erkenntnisse (auch aus Erfahrungen) vorliegen können; aus diesem Grund werden Bewilligungen in der Regel befristet erteilt. Schliesslich muss das Vorsorgeprinzip angewendet werden. Neue Erkenntnisse müssen gemeldet werden; allenfalls ist eine Neubeurteilung ausserhalb der Bewilligungsfrist notwendig. Die Beweislast liegt bei einem Bewilligungsverfahren – wie bei jedem solchen Verfahren – beim Antragsteller. Er muss die notwendigen Daten liefern, um die Wissensanforderungen der jeweiligen Stufe zu befriedigen, und Massnahmen zur Risikominderung vorschlagen. Angesichts der Unwissenheit verwendet das Recht offene Begriffe. In diesem Fall dient der entschiedene Einzelfall als Grundlage für weitere zukünftige Fälle. Aufgrund der offenen Begriffe stehen den Behörden grosse Ermessensspielräume zu. Es können auch Ausnahmen vom Bewilligungsverfahren gewährt werden, wenn aufgrund der Erfahrung und des Standes der Wissenschaft kein Schaden zu erwarten ist. Zudem ist die

Nachbearbeitung für die Generierung von Wissen für zukünftige Verfahren besonders wichtig, welches sowohl für die Behörden als auch die künftigen Antragssteller von Nutzen ist.

Der Umgang mit den neuen Pflanzenzüchtungsverfahren ist anspruchsvoll. Einerseits sind sie sehr komplex; die Techniken sind nicht einheitlich, und eine Kategorisierung scheint nicht sinnvoll. Andererseits ist das Wissen heute noch beschränkt; es wird zurzeit vornehmlich im Labor damit gearbeitet, das Schadenspotenzial für die Umwelt und Gesundheit ist unbekannt; offen sind zudem auch noch die Anforderungen der Landwirtschaft.

Die rechtliche Lösung für den Umgang mit Produkten dieser Verfahren hängt davon ab, ob sie als GVO eingestuft werden oder nicht. Falls ja, sind das GTG und das LwG massgebend. Falls nicht, sollten die oben dargelegten Anforderungen berücksichtigt werden, was aber eine Anpassung bestehender Erlasse bedingt (z.B. im USG und im LwG oder bei einer gewissen Nähe zu GVO im GTG und im LwG). Die Schaffung eines eigenen Gesetzes ist zurzeit wohl noch keine Option.

Ist also das GTG anwendbar? Viele Verfahren verwenden GVO oder Ansätze, die in Anhang 1 der Freisetzungsverordnung aufgezählt sind. Relevant ist zudem der im GTG definierte Begriff eines GVO sowie was diesem gleichgestellt wird. Dies wird in der Freisetzungs- und der Einschliessungsverordnung weiter konkretisiert. Die Definition von GVO umfasst dabei zwei Elemente: Einerseits das genetische Material an sich, andererseits die Veränderung des genetischen Materials, wie sie unter natürlichen Bedingungen durch Kreuzen oder natürliche Rekombination nicht vorkommt. In Bezug auf die gentechnische Veränderung müssen verschiedene Elemente berücksichtigt werden: Rechtlich massgebend ist dabei der Prozess für die Entscheidung GVO/nicht-GVO und nicht das Produkt. Ob bei den Eingriffen in das Erbmaterial mit artfremden oder arteigenen Genen gearbeitet wird, ist aus rechtlicher Sicht irrelevant: Auch Cis-Äpfel sind demzufolge GV-Pflanzen. Rechtlich spielt es ebenfalls keine Rolle, ob die gentechnische Veränderung im Produkt überhaupt noch nachweisbar ist. In der Praxis stellen sich in solchen Fällen allerdings Probleme bei der Beweisführung (allenfalls ist eine Nachweisgrenze zu implementieren).

Eine besondere Konstellation bieten Pflanzen, die GVO enthalten, ohne dass ihr eigenes genetisches Material verändert wurde. Das Einbringen der GVO in die Pflanze unterliegt der Einschliessungsverordnung. Für die Freisetzung und Inverkehrbringung solcher Pflanzen ist relevant, dass Gemische, Gegenstände oder Erzeugnisse, die GVO enthalten, rechtlich mit GVO gleichgestellt werden. Sie unterliegen also dem GTG. Die Anwendung des GTG für weitere Verfahren ist im Einzelnen zu prüfen.

Anschliessend an das Referat kam aus dem Publikum die Frage, ob beim Zulassungsverfahren der Nutzen eines Produktes keine Rolle spiele und falls ja, ob es nur im Bereich der Gentechnik zutreffend sei, dass man sich nur auf die möglichen Risiken konzentriert. Ch. Errass entgegnet, dass der Nutzen durch die Grundrechte geschützt ist (Wissenschaftsfreiheit, Wirtschaftsfreiheit, Eigentumsgarantie). Hier spielt der Nutzen durchaus eine Rolle, kann aber durch das Risiko eingeschränkt werden. Zudem kommt das gestaffelte Vorgehen bei der Zulassung der Innovation des Antragsstellers entgegen. Eine Nutzen-Risiko-Abwägung findet somit nicht im Einzelfall statt, sondern eine solche wurde vom Gesetzgeber aufgrund der Verfassungsvorgaben vorgenommen. Insofern konzentriert sich der Gesetzgeber nicht nur auf die Risiken, sondern er versucht – wie dargestellt – einen Ausgleich zwischen den verschiedenen Interessen zu verwirklichen.

Schlussdiskussion

Hauptdiskussionspunkt war das **Zulassungsverfahren für mit neuen Techniken hergestellte Produkte**. Ist der heute angewandte Technologie-basierte Ansatz sinnvoll oder sollte das Produkt und dessen neue Eigenschaften im Zentrum stehen?

Die Mehrheit der Referentinnen und Referenten vertrat die Ansicht, dass eine zeitgemässe, sinnvolle Regulierung sowohl den Prozess als auch das Produkt berücksichtigen sollte, da die Beurteilung stets im Kontext erfolgt und eine klare Auftrennung der Ansätze praktisch kaum machbar scheint. Grundsätzlich berücksichtigen sowohl der prozessbasierte wie der produktbasierte Ansatz jeweils Komponenten des anderen; der Prozess wird also auch bei einem produktbasierten Ansatz berücksichtigt und umgekehrt. Betreffend geltender Regulierung wurde betont, dass die Schweizer Verfassung und das GTG auf den Prozess (= gentechnische Methode) abstellen, das Bewilligungsverfahren aber produktbasiert abläuft. Insofern werden sowohl Prozess als auch Produkt berücksichtigt, schliesslich richten sich die einzelnen Massnahmen am Produkt aus. Dass die Gentechnik etwas Gefährliches sei und speziell reguliert werden solle, war eine gesellschaftliche Entscheidung. Gesetze können aber jederzeit geändert werden. Der Wechsel von einem prozess- zu einem produktbasierten Ansatz wäre ebenfalls ein gesellschaftlicher Entscheid. Es ist an der Wissenschaftsgemeinschaft, die Gesellschaft mit fachlichen Argumenten für diesen Schritt zu überzeugen. Es wurde auch daran erinnert, dass bei der Ausarbeitung des prozessbasierten Überprüfungsverfahrens durch die OECD Anfangs der 1970er-Jahre nur Naturwissenschaftler involviert waren. Spezielle Regulierungen gibt es neben der Gentechnik auch für andere Bereiche, wo ein potentiell Risiko für Mensch und Umwelt besteht, beispielsweise für pathogene Organismen, Pflanzenschutzmittel, Biozide oder allgemein Chemikalien.

Dass sich die heute geltende Regulierung an der verwendeten Technik orientiert, um zu entscheiden, ob ein Produkt unter das GTG fällt oder nicht, machte vor 25 Jahren durchaus Sinn, da die Gentechnik noch neu und die Folgen unbekannt waren. Heute kann man sich auf die Erfahrung aus 35 Jahren wissenschaftlicher Forschung und 25 Jahren kommerziellen Anbaus stützen. Die neuen Erkenntnisse in der Gentechnologie, die durch Forschung und Entwicklung stetig dazugewonnen werden und es erlauben, Genome gezielter zu verändern und Nebeneffekte zu minimieren, sollten beim Beurteilungsprozess berücksichtigt werden. Zudem sollte die zeitliche Komponente, also die Geschichte und Entwicklung eines Züchtungsverfahrens und dessen Anwendungen, miteinbezogen werden. Denn viele der neuen Techniken sind Weiterentwicklungen oder Varianten bestehender Verfahren. Eine solche Neuorientierung würde es unter Umständen erlauben, die Detailtiefe der Begutachtung dort, wo ausreichend Wissen vorhanden ist, zu reduzieren. Eine gesonderte Betrachtung für bestimmte Technologien scheint folglich nur dann gerechtfertigt, wenn von diesen ein spezifisches Risiko ausgeht. Eine Folge könnte jedoch sein, dass bisher nicht speziell regulierte Methoden wie die Mutagenese, die viele unerwünschte Veränderungen verursacht, in Zukunft strenger reguliert werden.

Die Neuorientierung würde einen Paradigmenwechsel beim Rechtsrahmen bedingen, der die neuen Eigenschaften einer Pflanze ins Zentrum stellt. Da die Sicherheit letztlich vom Produkt abhängt, das im Feld angebaut wird, scheint ein solches Vorgehen aus wissenschaftlicher Sicht gerechtfertigt. Nötig dafür wäre eine Kategorisierung und Gruppierung von Eigenschaften und Technologien; ein schwieriger, aber wichtiger Prozess, der es gestatten würde, neue Kombinationen von unabhängig voneinander bereits geprüften Eigenschaften und Sorten vereinfacht zuzulassen. Beispielsweise führt heute in Europa jedes Einführen eines bestimmten Bt-Gens in eine neue Pflanze zu einem neuen Event und jeder neue Event muss in derselben Detailtiefe geprüft werden. Dieser Ansatz ignoriert, dass über ein in einer Pflanze bereits zugelassenes Gen schon sehr viel bekannt ist und dieses Wissen für weitere Sorten mit dem identischen Gen berücksichtigt werden könnte. Das führt zu einem unverhältnismässig hohen Aufwand bei der Zulassung, ohne eine höhere Sicherheit zu bieten.

Es wurde aber auch zu bedenken gegeben, dass bei der Veränderung eines Organismus, unabhängig von der angewandten Technologie, epigenetische Effekte oder Interaktionen zwischen Genen oder mit der

Umwelt auftreten können. Auf diese Effekte und Interaktionen muss eine neue GV-Sorte ebenfalls geprüft werden. Insgesamt wären sowohl für konventionelle als auch mit neuen Züchtungstechniken hergestellte Sorten umfangreichere ökologische Analysen im Zulassungsverfahren denkbar, um die Auswirkungen auf die Umwelt besser abschätzen zu können. Allerdings sind solche Faktoren im Feld schwierig zu messen und zu evaluieren. Weiter müssen auch Probleme berücksichtigt werden, die durch die Anwendung einer Pflanze mit neuen Eigenschaften entstehen. Als Beispiel wurde die Resistenzbildung durch Anwendung von Herbiziden bei herbizidtoleranten GV-Pflanzen genannt.

Weiter wurde angemerkt, dass für die Regulierung in einem rechtlich-politischen Ansatz eindeutige Kategorien und Trigger festgelegt werden müssen, die manchmal im Widerspruch zur naturwissenschaftlichen Sichtweise stehen. Zudem sei die naturwissenschaftliche Sichtweise bezüglich Risiken verschiedener Züchtungstechniken keinesfalls einheitlich und könne ebenfalls zu Widersprüchen und Schwierigkeiten führen. Dem wurde entgegnet, dass die heutige Regulierung ebenfalls zu absurden Situationen geführt hat, was an folgendem Beispiel illustriert wurde: In der Forschung werden mittels Gentechnik die Funktionen von Genen beschrieben. Die Pflanzenzüchtung nutzt dann dieses Wissen, um mit unregulierten Methoden wie Tilling Pflanzen mit entsprechenden Mutationen zu erzeugen. Diese Lösung bringt keine höhere Sicherheit mit sich. Vielmehr sind damit längere Entwicklungsdauer, höhere Kosten und mehr unerwünschte Veränderungen verbunden. Sinnvoller wäre eine gezielte Veränderung mit präzisen Techniken, was aber an der strengen Regulierung scheitert.

Aus dem Publikum kamen zwei weitere Voten zum Zulassungsverfahren. Das Erste betraf die unerwünschten Veränderungen. Sämtliche neu entwickelten Pflanzen – egal ob konventionell, mit klassischer Gentechnik oder den neuen Techniken hergestellt – werden während des Selektionsprozesses und der Prüfung 10 bis 15 Jahre im Feld angebaut. Es werden dadurch praktisch alle dieser unerwünschten Änderungen bereits vor der Zulassung für den kommerziellen Anbau erkannt, und es sind auch umfassende Informationen über die Pflanze und ihr Verhalten unter den relevanten Umweltbedingungen verfügbar. Diese beiden Faktoren sprechen klar dafür, dass das Produkt im Zentrum des Zulassungsverfahrens stehen sollte. Der zweite Votant wies darauf hin, dass bei der kanadischen Regulierung, die in den Vorträgen als Beispiel eines produktbasierten Ansatzes genannt wurde, der Prozess ebenfalls eine Rolle spielt. Zudem folgen auch die USA und Australien grundsätzlich einem produktbasierten Ansatz. Auch sei die oft gehörte Aussage, es mangle an Feldstudien, falsch. Es gebe alleine zu Bt-Mais tausende wissenschaftliche Studien, und die Mehrheit davon sei umweltorientiert.

Ein weiterer Schwerpunkt der Diskussion betraf den **Nutzen der neuen Züchtungsverfahren und die Bedeutung des Nutzens eines Produktes im Zulassungsverfahren**. Verschiedene Teilnehmende waren der Meinung, dass der Nutzen bei den Zulassungsverfahren stärker zu bewerten sei und auch evaluiert werden sollte, welche Probleme mit dem neuen Produkt gelöst werden könnten. In der Schweiz sind Feuerbrand bei Kernobstgewächsen und Krautfäule bei Kartoffeln zwei schwer wiegende Probleme, für die die neuen Technologien Lösungen bieten könnten. Leider werde im europäischen Rechtsrahmen nur das Risiko berücksichtigt. Auch beschränke sich in der Debatte über den Nutzen die Sicht auf Europa. Dabei profitieren laut sozioökonomischen Studien alleine in Indien sieben Millionen Kleinbauern von der Bt-Baumwolle. Dem wurde entgegnet, dass diese Handhabung den Prinzipien eines liberalen Rechtsstaats entspricht: Der Nutzen ist grundrechtlich geschützt, kann aber im Fall potentieller Risiken eingeschränkt werden. Daraus ergibt sich die Situation, dass beim Verfahren nur das Risiko evaluiert wird. Bei unsicheren Handlungen schreiben Verfassung und Gesetzgeber vor, eine Interessenabwägung vorzunehmen. Das juristische Verfahren verhindert jedoch nicht, dass GV-Produkte auf den Markt gelangen können, sobald gezeigt wurde, dass kein untolerierbares Risiko besteht. Dabei werden die Toleranzgrenzen durch die Gesellschaft definiert.

Es wurde auch bemerkt, dass die letzten grossen Ertragssteigerungen durch die Hybridzüchtung erzielt wurden und trotz Einführung neuer Techniken seither keine Effekte bei den Ertragszahlen ersichtlich sind. Der Grund dafür dürfte eine Kombination von Überregulierung und zu hohen Erwartungen sein. Es gibt jedoch durchaus Erfolgsgeschichten, die dank Gentechnik, Marker-gestützter Selektion und jüngst auch

genomischer Selektion möglich wurden und sich mit Zahlen belegen lassen.

Weitere Wortmeldungen betrafen die **Akzeptanz von Produkten aus neuen Techniken durch die Konsumierenden**. Zum einen wurde festgehalten, dass Konsumentinnen und Konsumenten von Bioprodukten keine Produkte wollen, die mit neuen Züchtungstechniken hergestellt worden sind. Die bestehenden Alternativen zu den neuen Züchtungstechniken sollen besser genutzt und weiterentwickelt werden, um Variabilität in den Sorten zu erzeugen. Zum anderen wurde angemerkt, dass mit einer sorgfältigeren Kommunikation, die die Unterschiede zwischen den verschiedenen neuen Züchtungsmethoden erklärt und den Fokus auf die Vorteile gegenüber dem Istzustand legt, die Akzeptanz bei den Konsumierenden gesteigert und Vorurteile vermieden werden könnten.

Thema der Diskussion waren zudem **ganzheitliche, nachhaltige Ansätze in Züchtung, Landwirtschaft und Konsum**. Es wurde kritisiert, dass sehr viele Mittel für die Forschung und Entwicklung neuer Verfahren verwendet würden, obwohl es Forschungsbereiche gebe, von deren Resultaten nicht nur Grosskonzerne, sondern alle Züchter profitieren könnten. Als Beispiele dafür wurden die Genomsequenzierung, die Epigenetik oder die Pflanzenkommunikation genannt. Die Arbeit kleiner Züchter, oft in Zusammenarbeit mit Kooperativen, erzeuge Variabilität und Breite, während die Gentechnik die Ödnis auf dem Feld und bei den Züchtern fördere. Dem wurde angefügt, dass es wichtig sei, nicht in Boxen zu denken und sich zu stark auf die «genomische Box» zu fokussieren. Das Genom der Pflanze stehe in stetem Kontakt mit dem Mikrobiom und dem Epigenom. Forschung und Züchtung müssen die Pflanze als System verstehen, sonst gehe tatsächlich viel Wissen verloren.

Zudem wurde darauf hingewiesen, dass mit Ertragssteigerungen zwar landwirtschaftliche Flächen eingespart werden können, eine nachhaltige Landwirtschaft schliesse aber viel mehr ein als den Ertrag. So ist es von Bedeutung, ob die landwirtschaftlichen Flächen für den Anbau von Futtermitteln und Treibstoffpflanzen oder Lebensmitteln genutzt werden. Konsumverhalten und Lebensstil der Gesellschaft beeinflussen den Grad der Nachhaltigkeit der Landwirtschaft massgeblich, unabhängig von den Methoden der Züchtung. Bei einer umfassenden Diskussion sollten auch solche Fragen und Themen berücksichtigt werden.

Letzter Diskussionspunkt waren die **Sortenschutzrechte**. Hier wurde kritisiert, dass die Grosskonzerne bezüglich Sicherheit fordern, dass vom Produkt ausgegangen werden soll. Geht es aber um die Patentierbarkeit, argumentieren sie genau umgekehrt. Da in der konventionellen Züchtung keine Patente möglich sind, fordern sie mit Verweis auf die angewendeten Techniken Patente an, um Sortenschutz und Landwirteprivileg zu umgehen. Das sei inkonsequent und ungerecht. Dem wurde entgegnet, dass Sicherheit und Patentierbarkeit zwei unterschiedliche Themen seien und der Vergleich nicht korrekt sei. Zwei identische Produkte stellen für die Umwelt ein identisches Risiko dar, eine unterschiedliche Regulierung sei daher nicht gerechtfertigt. Patente stellen hingegen einen Innovations- und Investitionsschutz dar. Wer in eine Züchtungsmethode und ein innovatives Produkt investiere, soll auch die Möglichkeit haben, davon zu profitieren. Andernfalls werde dadurch die Innovation gebremst.

Zuletzt äusserte sich Bettina Hitzfeld – Leiterin der Abteilung Boden und Biotechnologie beim Bundesamt für Umwelt (BAFU) – zum aktuellen Stand der Dinge bei den Schweizer Behörden. Ihr Amt ist zuständig für die Prüfung, ob die neuen Methoden unter das GTG fallen oder nicht. Dieser Prozess wurde bereits initiiert und ein im Auftrag der EKAH verfasster technischer Bericht publiziert (Eckerstorfer et al. 2014). An der Tagung wurde nun zum ersten Mal eine breitere Öffentlichkeit in die Diskussion einbezogen. Als wichtigste Erkenntnis der Tagung betrachte sie, dass die Technologien bereits da sind: zwar existieren erst wenige Produkte, aber es gebe viele Studien zu den verschiedenen Methoden. Da dieses Thema den Konsumenten und Konsumentinnen sehr wichtig sei, müsse nun verstärkt wissenschaftlich und juristisch abgeklärt werden, wie in der Schweiz mit den neuen Technologien umgegangen werden soll.

Referenzen

- Boch J, Scholze H, Schornack S, Landgraf A, Hahn S, Kay S, Lahaye T, Nickstadt A, Bonas U (2009) Breaking the code of DNA binding specificity of TAL-Type III effectors. *Science* 326: 1509-1512. DOI: 10.1126/science.1178811
- Budhagatapalli N, Rutten T, Gurushidze M, Kumlehn J, Hensel G (2015) Targeted modification of gene function exploiting homology-directed repair of TALEN-mediated double strand breaks in barley. *G3: Genes|Genomes|Genetics*, early online. DOI: 10.1534/g3.115.018762
- Crisp A, Boschetti C, Perry M, Tunnacliffe A, Micklem G (2015) Expression of multiple horizontally acquired genes is a hallmark of both vertebrate and invertebrate genomes. *Genome Biology* 16: 50. DOI: 10.1186/s13059-015-0607-3
- EASAC Policy report 21 (2013) Planting the future: opportunities and challenges for using crop genetic improvement technologies for sustainable agriculture. European Academies Science Advisory Council (EASAC). www.easac.eu/fileadmin/Reports/Planting_the_Future/EASAC_Planting_the_Future_FULL_REPORT.pdf
- EFSA Panel on Genetically Modified Organisms (GMO) (2012a) Scientific opinion addressing the safety assessment of plants developed through cisgenesis and intragenesis. European Food Safety Authority (EFSA). *EFSA Journal* 10 (2): 2561. DOI: 10.2903/j.efsa.2012.2561
- EFSA Panel on Genetically modified organisms (GMO) (2012b) Scientific opinion addressing the safety assessment of plants developed using Zinc Finger Nuclease 3 and other Site-Directed Nucleases with similar function. European Food Safety Authority (EFSA). *EFSA Journal* 10 (10): 2943. DOI: 10.2903/j.efsa.2012.2943
- EPSO (2015) Statement on crop genetic improvement technologies. European Plant Science Organisation (EPSO). www.epsoweb.org/file/2038
- Gelvin SB (2005) Agricultural biotechnology: Gene exchange by design. *Nature* 433: 583-584. DOI: 10.1038/433583a
- Gurushidze M, Hensel G, Hiekel S, Schedel S, Valkov V, Kumlehn J (2014) True-breeding targeted gene knock-out in barley using designer TALE-nuclease in haploid cells. *PLOS One* 9 (3), e92046. DOI: 10.1371/journal.pone.0092046
- ISAAA (2014) Global status of commercialized biotech/GM crops: 2014. International Service for the Acquisition of Agri-biotech Applications (ISAAA). www.isaaa.org/resources/publications/briefs/44/pptslides/Brief44slides.pdf
- Ladics GS, Bartholomaeus A, Bregitzer P, Doerrner NG, Gray A, Holzhauser T, Jordan M, Keese P, Kok E, Macdonald P, Parrott W, Privalle L, Raybould A, Rhee SY, Rice E, Romeis J, Vaughn J, Wal JM, Glenn K (2015) Genetic basis and detection of unintended effects in genetically modified crop plants. *Transgenic Research* 24: 9867. DOI: 10.1007/s11248-015-9867-7
- Leitungsgruppe des NFP 59 (2012) Nutzen und Risiken der Freisetzung gentechnisch veränderter Pflanzen. Programmsynthese des Nationalen Forschungsprogramms 59. vdf Hochschulverlag. www.vdf.ethz.ch/service/3483/3484_Nutzen-und-Risiken-der-Freisetzung-gentechnisch-veraenderter-Pflanzen_OA.pdf
- Lusser M, Parisi C, Plan D, Rodriguez-Cerezo E (2011) New plant breeding techniques. State-of-the-art and prospects for commercial development. JRC Scientific and Technical Reports 63971. DOI: 10.2791/54761
- Lusser, M, Rodriguez-Cerezo E (2012) Comparative regulatory approaches for new plant breeding techniques. JRC Scientific and Technical Reports 68986. DOI: 10.2791/73498

- Nino-Liu DO, Roland PC, Bogdanove AJ (2006) *Xanthomonas oryzae* pathovars: model pathogens of a model crop. *Molecular Plant Pathology* 7: 303-324. DOI: 10.1111/j.1364-3703.2006.00344.x
- National Research Council (2004) The safety of genetically engineered foods: Approaches to assessing unintended health effects. The National Academies Press.
www.nap.edu/openbook.php?record_id=10977&page=R1
- Puchta H, Fauser F (2014) Synthetic nucleases for genome engineering in plants: prospects for a bright future. *The Plant Journal* 78 (5): 727-741. DOI: 10.1111/tpj.12338
- Rudgers G, Sastry-Dent L (2014) EXZACT precision technology: Scientific and regulatory advancements in plant-genome editing with ZFNs. NABC Reports 26: New DNA-Editing Approaches: Methods, Applications and Policy for Agriculture.
http://nabc.cals.cornell.edu/Publications/Reports/nabc_26/26_3_1_Rudgers.pdf
- Eckerstorfer M, Miklau M, Gaugitsch H (2014) New plant breeding techniques and risks associated with their application. Umweltbundesamt Österreich Report 0477.
www.umweltbundesamt.at/fileadmin/site/publikationen/REP0477.pdf
- Schaart JG, Visser RGF (2009) Novel plant breeding techniques. Consequences of new genetic modification-based plant breeding techniques in comparison to conventional plant breeding. COGEM Research Report number 2009-02. The Netherlands Commission on Genetic Modification.
www.cogem.net/showdownload.cfm?objectId=FFFC4ADF-1517-64D9-CC8E2170C5A3034D&objectType=mark.apps.cogem.contentobjects.publication.download.pdf
- The 3'000 Rice Genomes Project (2014) The 3'000 rice genomes project. *Giga Science* 3:7. DOI: 10.1186/2047-217X-3-7
- Waigmann E, Paoletti C, Davies H, Perry J, Kärenlampi S, Kuiper H (2012) Risk assessment of Genetically Modified Organisms (GMOs) *EFSA Journal* 10 (10): 1008. DOI: 10.2903/j.efsa.2012.s1008
- Walter A, Grieder C, Last L, Keller B, Hund A, Studer B (2014) Die Schweizer Pflanzenzüchtung – eine räumliche, zeitliche und thematische Analyse des Umfeldes. *Agrarforschung Schweiz* 5 (9): 366-373.
www.agrarforschungschweiz.ch/archiv_11de.php?id_artikel=2006
- Walter A, Studer B, Kölliker R (2012) Advanced phenotyping for improved breeding of forage and turf species. *Annals of Botany* 110: 1271-1279. DOI: 10.1093/aob/mcs026
- ZKBS (2012) Stellungnahme der ZKBS zu neuen Techniken für die Pflanzenzüchtung. Zentrale Kommission für die Biologische Sicherheit (ZKBS).
www.bvl.bund.de/SharedDocs/Downloads/06_Gentechnik/ZKBS/01_Allgemeine_Stellungnahmen_d_utsch/04_Pflanzen/Neue_Techniken_Pflanzenzuechtung.pdf?__blob=publicationFile&v=3

Weitere relevante Literatur zum Thema

- EFBS (2015) Bericht der EFBS zu Neuen Pflanzenzüchtungsverfahren. Eidgenössische Fachkommission für biologische Sicherheit (EFBS). www.efbs.admin.ch/fileadmin/efbs-dateien/dokumentation/Ansichten/D_Bericht_EFBS_Neue_Pflanzenzuchtverfahren.pdf
- FiBL (2012) Techniken der Pflanzenzüchtung. Eine Einschätzung für den ökologischen Landbau. Forschungsinstitut für Biologischen Landbau (FiBL).
www.fibl.org/fileadmin/documents/shop/1200-pflanzenzuechtung.pdf
- Vogel B (2012) Neue Pflanzenzuchtverfahren. Grundlagen für die Klärung offener Fragen bei der rechtlichen Regulierung neuern Pflanzenzuchtverfahren. Bericht im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt.
http://www.bafu.admin.ch/biotechnologie/01760/08936/index.html?lang=de&download=NHzLpZeg7t,lnp6i0NTU042l2Z6ln1acy4Zn4Z2qZpnO2Yuq2Z6gpJCHdnt_hGym162epYbg2c_JjKbNoKSn6A--