Grüne Gentechnik

WILEY-VCH

DFG

Deutsche Forschungsgemeinschaft
Kennedyallee 40 · 53175 Bonn
Postanschrift: 53170 Bonn
Telefon: + 49 228 885-1
Telefax: + 49 228 885-2777
postmaster@dfg.de
www.dfg.de

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek
Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über ‹http://dnb.d-nb.de› abrufbar.
ISBN: 978-3-527-32857-4

© korrigierte Auflage 2011 WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim

Alle Rechte, insbesondere die der Übersetzung in andere Sprachen, vorbehalten. Kein Teil dieses Buches darf ohne schriftliche Genehmigung des Verlages in irgendeiner Form – durch Fotokopie, Mikroverfilmung oder irgendein anderes Verfahren – reproduziert oder in eine von Maschinen, insbesondere von Datenverarbeitungsmaschinen, verwendbare Sprache übertragen oder übersetzt werden. Die Wiedergabe von Warenbezeichnungen, Handelsnamen oder sonstigen Kennzeichen in diesem Buch berechtigt nicht zu der Annahme, dass diese von jedermann frei benutzt werden dürfen. Vielmehr kann es sich auch dann um eingetragene Warenzeichen oder sonstige gesetzlich geschützte Kennzeichen handeln, wenn sie nicht eigens als solche markiert sind.

Lektorat: Angela Kügler-Seifert, DFG
Grundlayout: besscom, Berlin
Bildredaktion, Gestaltung und Grafik: Bosse und Meinhard Wissenschaftskommunikation, Bonn
Druck: Druckerei Brandt, Bonn

Gedruckt auf FSC-zertifiziertem Papier
Printed in the Federal Republic of Germany

Deutsche Forschungsgemeinschaft
Kennedyallee 40 · 53175 Bonn
Postanschrift: 53170 Bonn
Telefon: + 49 228 885-1
Telefax: + 49 228 885-2777
postmaster@dfg.de
www.dfg.de

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek
Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über ‹http://dnb.d-nb.de› abrufbar.
ISBN: 978-3-527-32857-4

© korrigierte Auflage 2010 WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim

Alle Rechte, insbesondere die der Übersetzung in andere Sprachen, vorbehalten. Kein Teil dieses Buches darf ohne schriftliche Genehmigung des Verlages in irgendeiner Form – durch Fotokopie, Mikroverfilmung oder irgendein anderes Verfahren – reproduziert oder in eine von Maschinen, insbesondere von Datenverarbeitungsmaschinen, verwendbare Sprache übertragen oder übersetzt werden. Die Wiedergabe von Warenbezeichnungen, Handelsnamen oder sonstigen Kennzeichen in diesem Buch berechtigt nicht zu der Annahme, dass diese von jedermann frei benutzt werden dürfen. Vielmehr kann es sich auch dann um eingetragene Warenzeichen oder sonstige gesetzlich geschützte Kennzeichen handeln, wenn sie nicht eigens als solche markiert sind.

Lektorat: Angela Kügler-Seifert, DFG
Grundlayout: besscom, Berlin
Bildredaktion, Gestaltung und Grafik: Bosse und Meinhard Wissenschaftskommunikation, Bonn
Druck: Druckerei Brandt, Bonn

Gedruckt auf FSC-zertifiziertem Papier
Printed in the Federal Republic of Germany

Inhalt

Vorwort 4

Pflanzenzüchtung und Grüne Gentechnik 8

Aus der Geschichte der Pflanzenzüchtung
– oder: Von den Grundlagen unseres Wohlstandes 9

Systematische Pflanzenzüchtung
– oder: Mendels erfolgreiche Erben 13

Schaffen genetischer Variationen
– oder: Gut geplante Zufälle 19

Klassische Verfahren der Pflanzenzüchtung
– oder: Geduld ist eine Tugend 22

Biotechnologie in der Pflanzenzüchtung
– oder: Fortschritt mit Turbo-Effekt 22

Neue Möglichkeiten durch molekulargenetische Verfahren
– oder: Der aufschlussreiche Blick ins Erbgut 23

Molekulare Marker zur Beschleunigung der Züchtung
– oder: Auf der Suche nach der Nadel im Heuhaufen 26

Erzeugung transgener Pflanzen
– oder: Alles scheint möglich 28

Selektion transgener Pflanzen
– oder: Der zweite Schritt der künstlichen Evolution 31

Auswirkungen der Genomforschung auf die Pflanzenzüchtung
– oder: Über gläserne Pflanzen und Wunschpflanzen 34

Potenziale gentechnisch veränderter Pflanzen 38

Toleranz gegen biotischen und abiotischen Stress
– oder: Aufrüstung für den Kampf ums Dasein 39

Toleranz gegen Herbizide
– oder: Befreit von aller Konkurrenz 44

Qualität pflanzlicher Nahrungs- und Futtermittel
– oder: Auf den Inhalt kommt es an 45

Pharmazeutisch relevante Inhaltsstoffe
– oder: Hightech im Heilkraut 49

Nachwachsende Rohstoffe
– oder: Plastik frisch vom Feld? 52

Mögliche Auswirkungen auf Mensch und Umwelt 58

Mögliche ökologische Vorteile
– oder: Biologie statt Chemie auf dem Acker 59

Mögliche ökologische Risiken
– oder: Berechtigte und überflüssige Sorgen 61

Mögliche Auswirkungen auf den Verbraucher
– oder: Am Besten nichts Neues 68

Ökonomische, soziale und rechtliche Fragen 70

Betriebswirtschaftliche Aspekte
– oder: Wenn Zahlen sprechen 71

Soziale Aspekte
– oder: Differenzierung tut not 76

Volkswirtschaftliche Aspekte
– oder: Gewinn für alle? 79

Politische und institutionelle Rahmenbedingungen
– oder: Anreize und Hürden für Innovation und Vielfalt 80

Rechtliche Regelungen
– oder: Von Abständen, Grenzen und Koexistenz 83

Zur Diskussion der Grünen Gentechnik
– oder: Kommunikation in der Sackgasse? 87

Weder Teufelszeug noch Wundermittel – Resümee und Ausblick 90

Anhang 95

Glossar 96

Literatur 100

Weiterführende Informationen 101

Autorinnen und Autoren 102

Bildnachweis 103

Vorwort

Nur wenige Themen der Naturwissenschaften haben die öffentliche Diskussion in Deutschland in den letzten Jahren so sehr geprägt wie die Grüne Gentechnik. Was ist unter Grüner Gentechnik zu verstehen? Der Begriff umreißt die Übertragung isolierter Gene im System „Pflanze“. Die Gentechnik selbst stellt seit den siebziger Jahren des vorigen Jahrhunderts Methoden zur Verfügung, um Erbmaterial eines Organismus im Labor zu isolieren und es dann in einen anderen Empfängerorganismus zu überführen. Werden nun Pflanzen als Empfänger für sogenannte „artfremde Gene“ verwendet, kommt es zur Ausbildung „transgener“ Pflanzen. Transgene Pflanzen sind also Organismen, in deren Erbgut mittels gentechnischer Verfahren Gene anderer Arten eingebaut wurden. Interessanterweise benutzt man zur Herstellung transgener Pflanzen bestimmte Bakterien, die natürlicherweise in der Lage sind, bakterielle Gene in das Pflanzengenom zu übertragen – die Schlüsselmethode der Grünen Gentechnik ist also gleichsam „der Natur abgeschaut“.

Dieses Vorgehen wird gegenwärtig auch in der Öffentlichkeit intensiv und kontrovers diskutiert. In der letzten Zeit sind zahlreiche Publikationen zur Grünen Gentechnik sowohl in Deutschland als auch im Ausland erschienen. Deshalb erhebt sich die Frage nach den Gründen für eine weitere Schrift zu diesem Thema. Warum also eine Veröffentlichung der Deutschen Forschungsgemeinschaft zur Grünen Gentechnik? Zunächst ist festzustellen, dass die Methoden der Grünen Gentechnik Eingang in die Grundlagenforschung gefunden haben. So lassen sich etwa Fragen nach der Entwicklung von Pflanzen von einem Samen hin zu einem ausgereiften Organismus, Probleme der Regulation der Gene in einer Pflanze oder Studien zur Resistenz oder Empfänglichkeit gegenüber Krankheitserregern mit Hilfe der Grünen Gentechnik hervorragend studieren. In der vorliegenden Publikation wird eine Reihe von Beispielen zu ihrem Einsatz in der Grundlagenforschung gegeben.

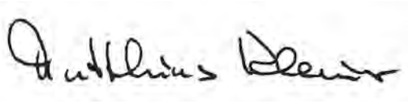
Seit mehr als einem Jahrhundert werden bestimmte Verfahren der Züchtung für die Entwicklung neuer Sorten von Nutzpflanzen angewandt. Das Methodenarsenal der Grünen Gentechnik wird, wenn auch erst seit kurzem, zur Züchtung neuer Sorten eingesetzt. Hier kommt es vor allem darauf an, Sorten zu entwickeln, die beispielsweise resistent gegen bestimmte Krankheiten und Schaderreger oder auch gegen Herbizide sind, die ungünstigen Umweltbedingungen wie verstärkter Trockenheit oder hohem Salzgehalt trotzen. Aber auch in der pharmazeutischen Industrie und in vielen Bereichen der Biotechnologie werden Methoden der Grünen Gentechnik verwendet, etwa um neue Arzneistoffe zu produzieren oder nach-

wachsende Rohstoffe zu generieren. Diese neuen Entwicklungen bei der praktischen Anwendung der Grünen Gentechnik werden in der Veröffentlichung ebenso diskutiert wie ihre Konsequenzen bei Freisetzung. So wird im Rahmen der „Biosicherheitsforschung“ zu neuen, gentechnisch hergestellten Pflanzensorten die Ausbreitung der Pflanzen im Freiland untersucht und das Konkurrenzverhalten analysiert. Auch dieser Aspekt wird in der vorliegenden Schrift beleuchtet.

Weiterhin ergeben sich mit der Nutzung von neuen Pflanzensorten, die mit Hilfe der Grünen Gentechnik entstanden sind, ganz spezifische wirtschaftliche und soziale Fragen. Im Zusammenhang mit dieser Problematik ist auch die Vermittlung des Wissens zur Grünen Gentechnik in die Öffentlichkeit hinein zu sehen. So stellt sich die Frage nach der Akzeptanz dieser neuen Methode, angefangen von Forschungen im Freiland bis hin zum Verbraucherschutz. Und letztlich gibt es, wie bei allen neuen Entwicklungen in der Wissenschaft, offene Fragen, wie das Problem der Markergene oder der Kontrolle der Genaktivität in Pflanzen. Eine weitere wichtige Frage ist die nach den rechtlichen Rahmenbedingungen, auch hier ergeben sich immer neue Zusammenhänge und Probleme, die bedacht werden müssen. Die jüngsten politischen Entscheidungen zum Anbauverbot von gentechnisch verändertem Mais und der Genehmigung des Freilandanbaus von gentechnisch veränderten Kartoffeln haben die öffentliche Diskussion über die Grüne Gentechnik erneut entfacht. Die Wissenschaft ist hier in einer besonderen Verantwortung, wenn es um die Aufklärung der interessierten Öffentlichkeit geht.

Die Schrift selbst ist entstanden aus einer gemeinsamen Initiative zweier Senatskommissionen der Deutschen Forschungsgemeinschaft, der Kommission „Stoffe und Ressourcen in der Landwirtschaft“ und der Kommission „Grundsatzfragen der Genforschung“. Allen Kolleginnen und Kollegen, die an der Erstellung der Texte beteiligt waren, insbesondere den beiden Vorsitzenden der Kommissionen, Frau Professor Bärbel Friedrich und Frau Professor Ingrid Kögel-Knabner, möchten wir dabei ganz herzlich danken. Dank schulden wir vor allem der Arbeitsgruppe „Grüne Gentechnik“ sowie den Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern der Geschäftsstelle der Deutschen Forschungsgemeinschaft, die an der Entstehung dieser Publikation mitgewirkt haben.

„Die Wissenschaft ist hier in einer besonderen Verantwortung, wenn es um die Aufklärung der interessierten Öffentlichkeit geht.“



Matthias Kleiner

Präsident der Deutschen Forschungsgemeinschaft

Jörg Hacker

Vizepräsident der Deutschen Forschungsgemeinschaft von 2003 bis 2009

Pflanzenzüchtung und Grüne Gentechnik

Der Mensch schafft Pflanzen nach seinen Bedürfnissen. Er tut dies seit rund 13 000 Jahren – und hat damit die Grundlage dafür gelegt, dass auf der Erde heute mehr als sechseinhalb Milliarden Menschen leben können.

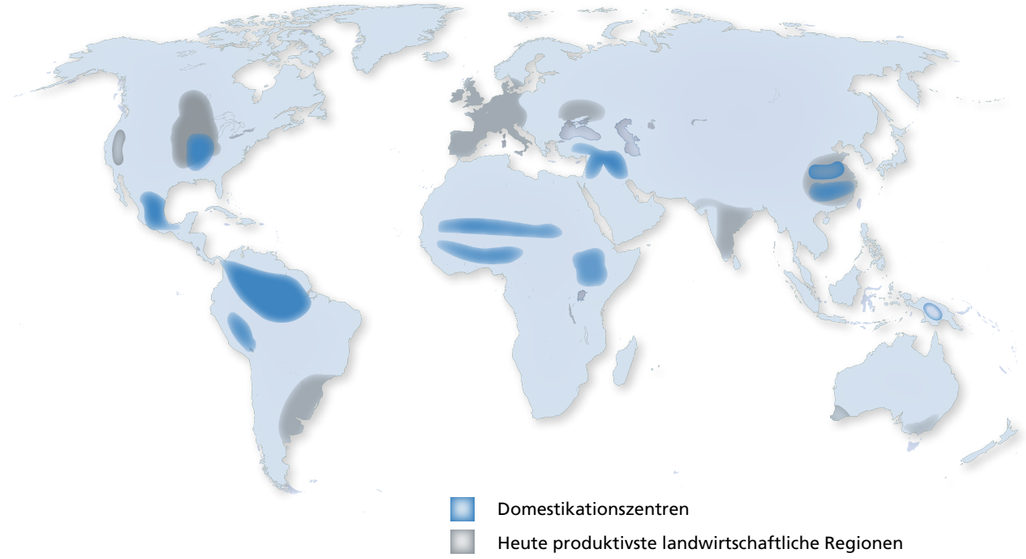
Aus der Geschichte der Pflanzenzüchtung

– oder: Von den Grundlagen unseres Wohlstandes

Etwa drei Millionen Menschen, so schätzt man, gab es vor 13 000 Jahren auf der Erde. Sie lebten wie seit vielen Jahrtausenden als Jäger und Sammler von dem, was die Natur ihnen bot. Rund zwanzig Quadratkilometer Land benötigt ein Jäger und Sammler für seine Ernährung – heute reicht eine solche Fläche, um mehr als 9000 Menschen satt zu machen. Die menschliche Population begann zu steigen, als der Mensch lernte, Pflanzen und Tiere für seine Zwecke zu nutzen und ihre Eigenschaften in seinem Sinne zu verändern, sie zu domestizieren. Einen der Ursprünge dieser Entwicklung vermutet man im Bereich des fruchtbaren Halbmondes, wo die Vorfahren von acht der bedeutendsten Kulturpflanzen des Neolithikums zu Hause sind: Emmer, Einkorn, Gerste, Lein, Erbse, Kichererbse, Linse und Wicklinse. Später wurden in den Anden Kartoffeln angebaut und in Ostasien Reis kultiviert. Mais entstand vor etwa 7000 Jahren in Mexiko aus Teosinte.

Die Domestikation der Pflanzen, ihre Überführung von Wildformen in Kulturformen, ist mit Veränderungen ihres Erbguts verbunden. Das Erzeugen und Nutzen solcher genetischen Variation bezeichnen wir heute als Pflanzenzüchtung. Als eine Grundvoraussetzung für jedwede Art von Landwirtschaft und Gartenbau ist sie aufs Engste mit der Menschheitsgeschichte verknüpft und hat Nutzpflanzen hervorgebracht, die vielfach nur noch wenig mit ihren wilden Verwandten gemein haben.

Tatsächlich haben viele Kulturpflanzen durch die einseitige und gezielte Auslese auf Eigenschaften, die für die Praxis des Ackerbaus oder die Qualität des Erntegutes von Bedeutung sind, ganz oder teilweise ihre Fähigkeit verloren, sich unter natürlichen Bedingungen fortzupflanzen und auszubreiten. In ihren heutigen Anbauregionen sind sie in aller Regel überhaupt nur noch unter dem Schutz des Menschen überlebensfähig. Unter naturnahen Bedingungen hingegen verschwinden sie schon nach wenigen Generationen aus der Landschaft, weil sie sich nicht gegen Konkurrenten durchsetzen können, die an eben diese Bedingungen gut angepasst sind. Das liegt beispielsweise daran, dass



Zentren der Pflanzendomestikation (dunkelblau) und heute produktivste landwirtschaftliche Regionen (grau) der Erde (nach Diamond, 2002)

Kulturpflanzen extrem vergrößerte Ertragsorgane wie Rüben oder Früchte bilden, keine toxischen Inhaltsstoffe mehr besitzen oder ihre natürliche Fähigkeit zur Reproduktion und Ausbreitung auf andere Weise eingeschränkt wurde.

Die Wildformen unserer Getreide etwa besitzen brüchige Ähren, eine Eigenschaft, die für die Vermehrung in der natürlichen Umwelt höchst bedeutsam ist. Denn nur wenn die Ähren mit der Reife zerbrechen, können sich ihre Samen weit verbreiten. Eine der ersten züchterischen Tätigkeiten der Menschen bestand darin, Getreideformen zu selektieren, deren reife Ähren nicht zerbrechen – und sich deshalb überhaupt erst ernten lassen. Heute weiß man, dass dieses Merkmal bei vielen Kulturarten auf natürlich auftretende Mutationen in nur wenigen Genen zurückzuführen ist; bei Weizen und Gerste beispielsweise hat man die entsprechenden Erbanlagen inzwischen auf einem Chromosom genau lokalisieren können.

Die Wildformen der Gräserartigen, zu denen unsere Getreide gehören, verfügen zudem über eine ausgeprägte Keimruhe. Das erweist sich unter den natürlichen Standortbedingungen der gemäßigten Zone als vorteilhaft, weil den empfindlichen Jungpflanzen die ungünstigen Bedingungen des Winters erspart bleiben, wenn die Samen nicht sofort nach der Reife austreiben. In Regionen mit regelmäßigen Flächenbränden stellt sich die Lage vergleichbar dar: Dort ist es überlebensnotwendig, dass die Samen erst nach dem Verlöschen der Feuer aufgehen, weil die Keimlinge erst dann ideale Bedingungen für ihr Wachstum vorfinden.

So keimen viele Samen erst nach dem Einwirken extremer Temperaturen oder nach einer langen Ruheperiode. Für die Nutzung durch den Menschen indes sind solche Eigenschaften höchst unerwünscht. Schnell und gleichmäßig soll das Getreide auflaufen, sobald man es gesät hat. Von Beginn der Domestikation an hat es deshalb intensive Bemühungen gegeben, die Keimruhe der Getreide auszuschalten.

Ein weiteres Beispiel ist die Änderung von Ansprüchen an den Rhythmus der Tageszeiten. So reifen etwa die Wildformen von Kartoffeln oder Mais, die aus tropischen Regionen stammen, hierzulande nicht, weil sie an kurze Tage angepasst sind. Die Pflanzen wachsen zwar vegetativ, für die Nutzung interessante Organe, wie Knollen oder Körner, bilden sie jedoch nur stark verspätet oder gar nicht. Tatsächlich hegte man Kartoffelpflanzen, die im sechzehnten Jahrhundert aus Südamerika eingeführt wurden, zunächst wegen ihrer schönen Blüten und des üppigen Laubes als

Spindelbrüchige Wildform der Gerste (Hordeum spontaneum, A) sowie zwei- und mehrzeilige Kulturgerste (Hordeum vulgare, B, C)

Zierpflanzen. Erst zwei Jahrhunderte später wurden Varianten entdeckt, die auch in den gemäßigten Breiten Knollen bilden – die landwirtschaftliche Nutzung der Kartoffel in Europa begann. Heute weiß man: Sie beruht auf Mutationen in jenen Genen, welche die Reaktion auf die Tageslänge steuern.

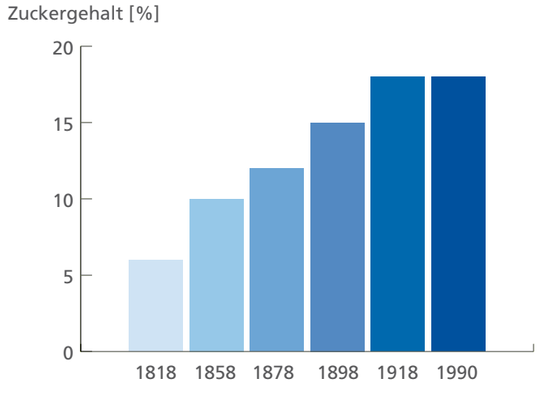
Der Prozess der Domestikation der Pflanzen ist noch keineswegs abgeschlossen. Zu den jüngeren Beispielen zählt die Zuckerrübe, die erst seit 200 Jahren landwirtschaftlich genutzt wird. Bis dahin gab es keine Möglichkeit, Zucker in nennenswertem Maße in Europa herzustellen. Gewonnen wurde er vielmehr ausschließlich aus dem tropischen Zuckerrohr und erreichte Europa

Wildformen (*) und heutige Kulturformen von Mais, Kartoffel und Weizen (von links nach rechts)

nur per Schiff. Die Geschichte der Zuckerrübe beginnt im Jahr 1747, in dem der Berliner Apotheker Andreas Sigismund Marggraf entdeckte, dass auch Runkelrüben und ihre Verwandten wie der schon lange bekannte Gartenmangold Rohrzucker (Saccharose) enthalten. Rund 80 Jahre später fing man an, Zuckerrüben zu züchten und so Form und Gewicht der Rüben zu verbessern. Um 1870 lag ihr Gehalt an Saccharose durch einfache Auslese bei fünf Prozent, um 1900 dann schon bei mehr als 15 Prozent. In dieser Zeit machten die Züchter aber auch die Erfahrung, dass die weitere Steigerung des Zuckergehalts mit einem Rückgang der Erträge verbunden war. Heutige Zuckerrüben speichern 17 bis 18 Prozent Zucker in extrem verdickten Wurzeln.

Daneben wurden andere Merkmale züchterisch so verändert, dass sich der Arbeitsaufwand beim Anbau der Rüben deutlich verringerte. So bilden moderne Zuckerrüben nicht mehr drei, sondern nur noch einen Embryo pro Samen aus. Zudem wurde ihre Fähigkeit zur Blütenbildung soweit reduziert, dass sie unter mitteleuropäischen Bedingungen im ersten Jahr überhaupt nicht mehr blühen. Schließlich hat man eine männliche Sterilität eingeführt, die verhindert, dass die Pflanzen Pollen ausbilden können, und zahlreiche agronomische Eigenschaften wie Krankheitsresistenz und Qualität verbessert. Die Zuckerrübe gehört damit zu den Arten mit dem größten Züchtungsfortschritt.

Das jüngste Beispiel für eine neuartige Kulturpflanze ist Triticale, eine Getreideart, die erst in den vergangenen hundert Jahren durch Züchtung entwickelt wurde. Der Name deutet es schon an: Triticale ist ein Gattungsbastard aus Weizen (*Triticum spp.*) als weiblichem und Roggen (*Secale cereale*) als männlichem Kreuzungspartner, mit dem man erwünschte Eigenschaften beider Eltern zu kombinieren sucht. Im Jahr 1888 hatte Wilhelm von Rimpau in Deutschland die ersten Triticale erzeugt, die Samen bilden konnten. Auf



Die Entwicklung des Zuckergehalts von Zuckerrüben (nach Jung)

seinen Erkenntnissen aufbauend begann man sechzig Jahre später mit der systematischen Züchtung. Im Jahr 1968 wurde dann die erste leistungsfähige Sorte zugelassen. Wiederum vierzig Jahre später, im Jahr 2008, wurden in Deutschland auf mehr als 370 000 Hektar über 20 Triticale-Sorten angebaut.

Systematische Pflanzenzüchtung

– oder: Mendels erfolgreiche Erben

Die längste Zeit der Menschheitsgeschichte hatte sich die Domestikation und Züchtung von Pflanzen auf die Auslese der von der Natur bereitgestellten Variationen beschränkt. Dabei verliefen die Ausleseprozesse oft so langsam, dass sie der jeweils lebenden

Die Entstehung der Zuckerrübe (von links nach rechts): Wildrübe (Beta vulgaris ssp. maritima), Gartenmangold (Beta vulgaris ssp. vulgaris) und moderne Zuckerrübe (Beta vulgaris ssp. vulgaris)

bäuerlichen Generation vielfach wohl gar nicht bewusst waren. Eine systematische Pflanzenzüchtung setzte erst mit dem Zeitalter der Industrialisierung ein, mit dem auch die Ansprüche an Menge und Qualität der Erzeugnisse wuchsen. Jetzt erst erkannte man die Notwendigkeit gezielten züchterischen Handelns und begann, die Ergebnisse mit einer neuen anspruchsvollen Anbautechnik und Verarbeitung zu kombinieren.

Systematische Pflanzenzüchtung ist angewandte Genetik unter Einschluss pflanzenbaulicher Techniken. Als grundlegende Entdeckung für eine gerichtete pflanzenzüchterische Tätigkeit gilt die Aufklärung der Gesetzmäßigkeiten der Vererbung durch den Brünner Mönch Gregor Mendel in der Mitte des 19. Jahrhunderts.

Zu Beginn des 20. Jahrhunderts mussten die „Mendel'schen Regeln" allerdings erst durch die Botaniker Carl Erich Correns, Hugo de Vries und Erich Tschermak von Seysenegg wiederentdeckt werden. Bei einfach vererbten Merkmalen – wie der Farbe von Samen oder Blüten oder zum Beispiel auch Resistenzen – sind diese Regeln leicht zu erkennen. Bei anderen Merkmalen, die – wie der Ertrag – von einer Vielzahl von Genen bestimmt werden, lassen sich die Gesetzmäßigkeiten jedoch nur mit großer Mühe nachvollziehen. Die Züchtung auf einfach vererbte (qualitative) Merkmale ist naturgemäß wesentlich einfacher als die züchterische Veränderung von komplex vererbten (quantitativen) Merkmalen, deren Ausprägung zudem häufig von den Einflüssen der Umwelt modifiziert wird. Seit Beginn des 20. Jahrhunderts hat die systematische Pflanzenzüchtung bemer-

Weizen, Roggen und Triticale (von links nach rechts)

kenswerte Erfolge zu verzeichnen, zum Beispiel bei den Weizenerträgen: Um das Jahr 1800 lag der mittlere Weizenertrag in Deutschland bei rund einer Tonne pro Hektar (1,03 t/ha, gemessen meist in Dezitonnen oder Doppelzentnern, also 10,3 dt/ha), stieg dann in 130 Jahren ganz allmählich auf durchschnittlich 1,84 Tonnen Weizen pro Hektar an. Seit den 1930er-Jahren wuchs der Ertrag dann rasch und kontinuierlich. Im Mittel der Jahre 2000 bis 2007 lag der Winterweizenertrag in Deutschland bereits bei 7,34 t/ha; dabei sind Spitzenerträge von mehr als 12 t/ha keine Seltenheit mehr.

Gewiss, die Steigerung der Erträge geht mit deutlichen Verbesserungen ackerbaulicher Produktionstechniken wie Bodenbearbeitung, Düngung oder Pflanzenschutz einher. Hohe Erträge sind jedoch nur mit modernen leistungsfähigen Sorten zu erzielen. 25 bis 35 Prozent, so schätzt man heute, hat die Züchtung zum Ertragsfortschritt aller Kulturarten beigetragen. Die Erfolge der Weizenzüchtung sind freilich nicht auf den Ertrag beschränkt. Vielmehr konnte auch die Qualität des Weizens und das Zusammenwirken von Qualität und Ertrag erheblich verbessert werden. Backweizen etwa, der einen hohen Anteil an sogenanntem Kleber enthalten muss, konnte noch in den

Grundlagen der Genetik

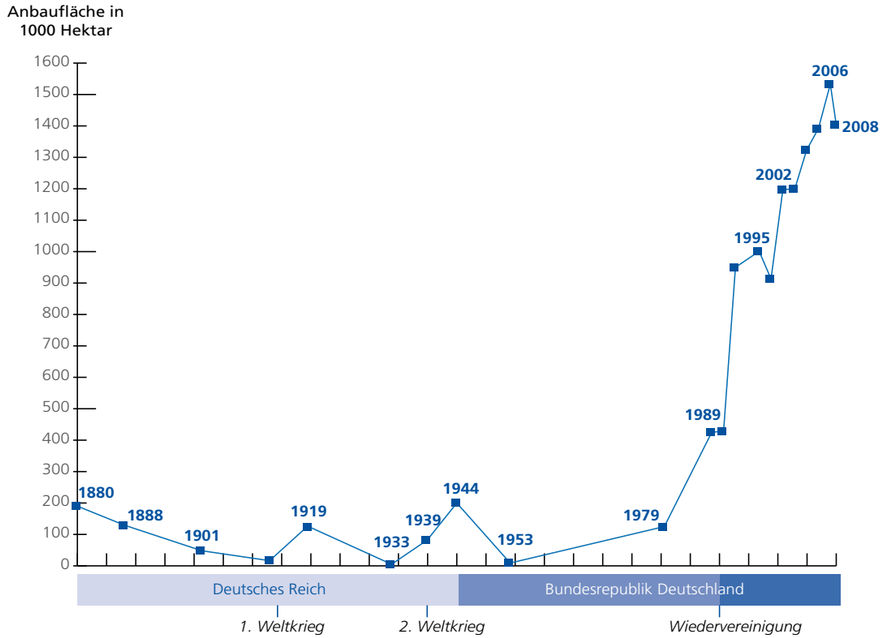
Jedes Lebewesen enthält eine Vielzahl von Erbinformationen, die sein Aussehen bestimmen, seinen Stoffwechsel steuern und sein Verhalten beeinflussen. Diese Informationen sind unterteilt in einzelne Abschnitte, die Gene. Jedes Gen ist verantwortlich für eine bestimmte Eigenschaft – je komplexer ein Lebewesen gebaut ist, umso größer ist die Zahl seiner Gene. Nach dem heutigen Stand des Wissens besitzen einfache Mikroorganismen wie Bakterien meist zwischen 500 und 5000 Gene, der Mensch rund 25 000 Gene und Kulturpflanzen wie der Reis rund 40 000 Gene.

Bei allen Pflanzen und Tieren und auch beim Menschen befindet sich der größte Teil des Erbguts im Zellkern, der durch eine Membran vom Rest der Zelle abgegrenzt ist. Dort ist es in eine bestimmte Zahl von Verpackungseinheiten, die Chromosomen, aufgeteilt, die sich schon unter dem Lichtmikroskop erkennen lassen. Bei Bakterien, die keinen Zellkern besitzen, liegt das Erbgut dagegen im Zellplasma. In den meisten Pflanzen kommen die Chromosomen paarweise vor. Dieser Zustand wird als Diploidie bezeichnet. Daneben gibt es auch Pflanzen mit mehr als zwei Kopien eines jeden Chromosoms – sie sind polyploid. In einer diploiden Pflanze gibt es von jedem Gen zwei Kopien, die man Allele nennt. Sind diese Allele identisch, spricht man von Homozygotie. Unterscheiden sich die Allele hingegen, wird dieser Zustand heterozygot genannt.

Bei der geschlechtlichen Fortpflanzung werden durch Aufspaltung der Chromosomensätze auf zwei Tochterzellen zunächst haploide Keimzellen mit nur einem Chromosomensatz gebildet. Ihr Erbgut wird durch das Verschmelzen zweier Keimzellen zu einem neuen diploiden Organismus gemischt. Diesen Vorgang nutzen Züchter seit alters her, um Pflanzen oder Tiere mit neuartigen Kombinationen erwünschter Eigenschaften zu erzeugen.

Der Zustand der Allele an einem Genort oder Locus wird als Genotyp bezeichnet, ihre Ausprägung in einem bestimmten Erscheinungsbild als Phänotyp. Da an einem Locus in der Regel mindestens zwei Allele vorhanden sind, wird der Phänotyp durch das Zusammenwirken der Allele und den entsprechenden Wechselwirkungen mit der Umwelt bestimmt. Dieses Zusammenwirken kann auf verschiedene Art und Weise geschehen. Die Allele können beide einen gleichen Beitrag zum Phänotyp leisten; man spricht dann von additiver Genwirkung. Es kann aber auch ein Allel allein den Phänotyp bestimmen, während das andere gleichsam still bleibt; dann ist das eine Allel dominant, das andere rezessiv.

Neben den Eigenschaften, die nur durch ein Gen, also monogen vererbt werden, gibt es zahlreiche Eigenschaften, die erst durch das Zusammenwirken vieler Gene ausgeprägt werden. Dann spricht man von polygener Vererbung.



Entwicklung der Rapsanbaufläche seit 1880 (Quellen: i-Bio Information Biowissenschaften; Raps-Förderungsfonds)

1970er-Jahren in Deutschland nicht in ausreichender Menge erzeugt werden. In der „Beschreibenden Sortenliste 2008“ sind nun 114 zugelassene Sorten Winterweizen eingetragen, von denen mehr als die Hälfte als Backweizen taugt: 52 von ihnen sind als Qualitätsweizen, 15 gar als Eliteweizen eingestuft und weisen zugleich oft hervorragende Ertragseigenschaften auf.

Ein anderer Erfolg qualitätsverbessernder Züchtung wird allenthalben in der Landschaft sichtbar: Dass die Anbauflächen für Raps in nur 25 Jahren von 180 000 auf mehr als 1 400 000 Hektar gewachsen sind, geht letztlich auf Fortschritte der Pflanzenzüchtung zurück. Von Natur sind die Fettsäuren des Rapsöls nämlich für die menschliche Ernährung unvorteilhaft zusammengesetzt: Sie bestehen zu mehr als der Hälfte aus Erucasäure, einer Fettsäure, die im Tierversuch Veränderungen des Herzmuskels, Herzverfettung und Wachstumsverzögerungen verursacht. Wegen des hohen Gehaltes dieser schädlichen Fettsäure, die zudem einen kratzigen Geschmack besitzt, eigneten sich die alten Rapssorten nicht oder nur bedingt zur Gewinnung von Speiseöl.

In verschiedenen Sorten fand man dann Mutanten, mit denen sich die unerwünschte Erucasäure der Rapssamen deutlich reduzieren ließ. In einer kanadischen Sommerrapssorte fand man zum Beispiel eine Mutante, die nur geringe Mengen Erucasäure enthielt und Ausgangspunkt für die Züchtung von sogenanntem 0-Raps war, der nur noch 0,1 bis 1,5 Prozent Erucasäure enthält. Dies machte es möglich, Raps auch für die Herstellung von Speiseöl und das Schrot als Tierfutter zu verwenden. Nötig für die Nutzung des Schrots war allerdings noch ein zweiter Schritt: Die Reduktion seines Gehaltes an Glucosinolaten, die manchen Pflanzen als Abwehrstoffe gegen Tierfraß dienen und Gemüsen wie Rettich, Senf, Kresse und Kohl den bitteren Geschmack verleihen. Rapssamen enthält davon heute nur noch weniger als ein Zehntel der ursprünglichen Menge.

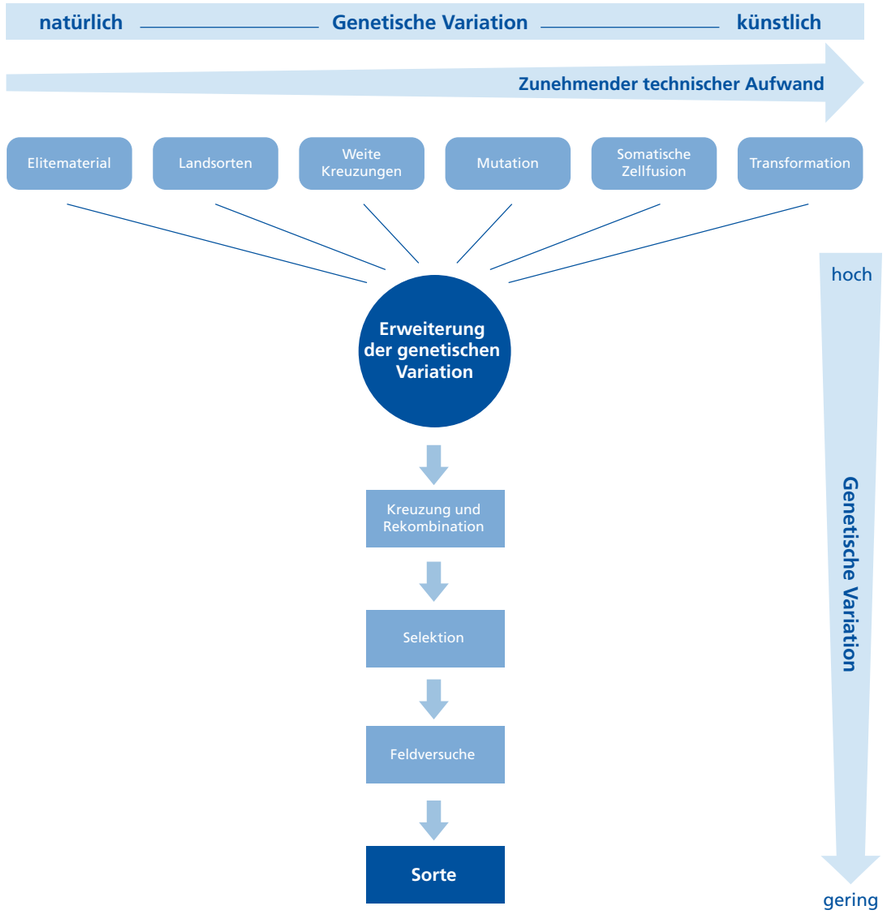
Auch mit Blick auf die Resistenz gegen Schaderreger und die Kombination von derartigen Resistenzen mit hervorragenden Qualitätseigenschaften konnte die Pflanzenzüchtung bahnbrechende Erfolge erzielen, die zu einer umweltfreundlichen und nachhaltigen Landwirtschaft ebenso beitragen wie zum Gesundheitsschutz der Verbraucher und der Schonung der natürlichen Ressourcen Boden, Wasser und Biodiversität. Bei der Wintergerste beispielsweise waren noch im Jahr 1985 nur drei von 38 zugelassenen Sorten hinreichend resistent gegen Mehltau. Und: diese resistenten Sorten brachten nur relativ geringe Erträge. Im

Mehltauanfällige Gerste (links) und mehltauresistente Gerste (rechts)

Jahr 2008 dagegen waren 32 von 68 zugelassenen Sorten als resistent eingestuft; 23 von ihnen zählten zu den ertragsstärksten Sorten.

All diese Erfolge der systematischen Pflanzenzüchtung sind letztlich das Ergebnis genetischer Veränderungen der Nutzpflanzen. Stark vereinfacht lässt sich der moderne Züchtungsprozess in drei Phasen einteilen:

- Am Anfang steht immer das Schaffen genetischer Variationen. Nur wenn ausreichend variables Material zur Verfügung steht, kann die Züchtung erfolgreich sein. Waren zu Beginn natürliche Populationen Ausgangspunkt der Züchtung, so werden genetische Variationen



Methoden zur Erweiterung der genetischen Variation (nach Jung)

heute in der Regel gezielt erzeugt, zum Beispiel durch Kreuzung.

- Es folgt ein in der Regel mehrjähriger intensiver Selektionsprozess, der zu Nachkommenschaften mit verbesserten Eigenschaften führt. Im Extremfall stehen am Ende der Züchtung vollkommen homogene Populationen, die nur noch aus einem einzigen Genotyp bestehen, der die erwünschten Eigenschaften stabil und verlässlich ausprägt.
- Die ausgelesenen Genotypen werden entweder auf ihre Eigenleistung hin geprüft oder es wird die Leistung ihrer Hybridnachkommenschaften (vgl. Grafik S. 20) bestimmt. Dazu werden sie mehrere Jahre lang an verschiedenen Standorten getestet. Die besten werden schließlich zur Sortenzulassung angemeldet.

Moderne Sorten sind heute Grundlage jeglicher Art von Landwirtschaft, ganz gleich ob im ökologischen Landbau umweltorientiert oder im konventionellen Landbau ertragsorientiert gewirtschaftet wird.

Schaffen genetischer Variationen

– oder: Gut geplante Zufälle

Genetische Vielfalt ist eine Grundvoraussetzung für jede Art von züchterischer Verbesserung von Pflanzen. Um die genetische Vielfalt zu erhöhen, werden in der Pflanzenzüchtung verschiedenste Techniken angewandt.

Durch Kreuzungen zwischen unterschiedlichen Genotypen einer Art oder – bei den sogenannten weiten Kreuzungen – auch verschiedener Arten bzw. Gattungen lassen sich neue Kombinationen von Allelen erzeugen. Bei diesem klassischen Verfahren werden die Gene der gekreuzten Pflanzen neu gemischt; mütterliche und väterliche Eigenschaften verteilen sich nach den Regeln des Zufalls auf die Nachkommen. In den folgenden Jahren liest der Züchter dann in einem sehr zeitaufwendigen Prozess die Pflanzen mit erwünschten Eigenschaften aus.

Seit vielen Jahren verändert der Mensch das Erbgut von Pflanzen freilich auch auf andere Weise: Durch Bestrahlen oder den Einsatz bestimmter Chemikalien lassen sich Veränderungen im Erbgut hervorrufen (Mutationen), die zu neuer Variation führen. Die Fusion zellwandloser isolierter Zellen (Protoplasten) ermöglicht es zudem, die Gene nicht kreuzbarer Arten zu kombinieren. All diese Verfahren stellen Eingriffe in das Genom einer Pflanze dar.

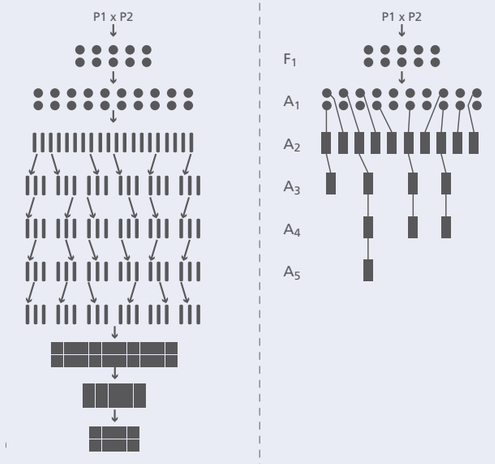
Die Gentechnik ist nur ein weiteres Verfahren zur Veränderung des Erbguts einer Pflanze, mit dessen Hilfe sich gezielt genetische Variation erzeugen lässt. So können vor allem monogen vererbte Eigenschaften zielgerichtet übertragen werden – ohne die Begleitung durch unerwünschte Nebeneffekte. Grundsätzlich neu ist zudem, dass mit gentechnischen Verfahren auch Erbgut von nicht verwandten Organismen in Pflanzen eingeführt werden kann. Zwar zeigen neueste Erkenntnisse der Genomforschung, dass Pflanzen auch in der Natur gelegentlich Sequenzen aus anderen Organismen und Viren aufgenommen haben, mit anderen Züchtungsverfahren lässt sich dies jedoch nicht erreichen.

Liniensorten: die Selbstbefruchterzüchtung

Das Endprodukt der Selbstbefruchterzüchtung ist eine reine Linie, die sich durch ein hohes Maß an Homozygotie und Homogenität auszeichnet. Sie entsteht durch fortgesetzte Selbstbefruchtung dafür geeigneter Pflanzen.

Bei der Selbstbefruchterzüchtung wird die genetische Variation in der Regel durch Kreuzung zweier homozygoter Elternlinien erzeugt, sodass die erste Generation der Nachkommen (F_1) gemäß den Mendel'schen Regeln uniform ist. Erst in der zweiten Generation (F_2) kann die Selektion mit einer Einzelpflanzenauslese beginnen. In der dritten Generation (F_3) werden die Nachkommen dann in Reihen angebaut; es findet zunächst eine Selektion zwischen den Einzelreihen statt, gefolgt von einer Selektion der besten Einzelpflanze in den selektierten Einzelreihen. Selektiert wird also sowohl zwischen als auch innerhalb der Nachkommenschaften von Einzelpflanzen. Dies wiederholt man so lange, wie eine Aufspaltung zu beobachten ist. Wenn ein ausreichender Grad an Homozygotie erreicht ist – in der Regel in der sechsten oder siebten Generation – , wird die Nachkommenschaft einer Einzelpflanze gemeinsam geerntet und wiederholten Leistungsprüfungen an verschiedenen Orten unterzogen.

Wird in den ersten Generationen vornehmlich auf einfach vererbte (monogene) Merkmale selektiert, so tritt mit zunehmender Homozygotie die Selektion auf quantitativ (polygen) vererbte Merkmale in den Vordergrund. Weil sich quantitative Merkmale erst durch die Rückkehr zur Homozygotie sicher erfassen lassen, ist die Linienzüchtung ein sehr langwieriger Prozess: 10 bis 15 Jahre dauert es in der Regel von der Kreuzung bis zur zugelassenen Sorte. Um diesen Prozess abzukürzen, hat man Verfahren entwickelt, mit denen sich schon nach einer Generation vollständig homozygote Pflanzen erzeugen lassen. Dazu werden aus den unreifen Pollen (Mikrosporen) von Pflanzen der ersten Kreuzungsgeneration (F_1) haploide Sprosse regeneriert, die nach Verdoppelung ihrer Chromosomen vollständig homozygot sind und als Doppelhaploide (DH) bezeichnet werden. Anschließend beginnt ein mehrjähriger Selektionsprozess, bei dem die besten Doppelhaploiden ausgelesen und vermehrt werden, sodass schließlich eine verbesserte DH-Linie als neue Sorte zur Verfügung steht.



(Modifiziert nach Ordon und Friedt, 1998)

Hybridsorten: die Hybridzüchtung

Die Hybridzüchtung geht auf die Entdeckung des Heterosis-Effekts durch die amerikanischen Botaniker Georg Harrison Shull und Edward Murray East zu Beginn des zwanzigsten Jahrhunderts zurück. Unter Heterosis oder Hybridwüchsigkeit versteht man das Phänomen, dass Hybride, also Kreuzungsprodukte verschiedener Zuchtlinien, mitunter eine deutlich höhere Leistung zeigen als ihre aus Inzuchtlinien hervorgegangenen Eltern.

Diesen Effekt, der etwa bei Mais und Zuckerrüben besonders stark ausgeprägt ist, macht man sich bei der Hybridzüchtung zunutze. Gekennzeichnet ist sie durch drei aufeinanderfolgende Phasen: die Erstellung von Inzuchtlinien mit möglichst guter Eigenleistung, die Identifizierung von Linien mit maximaler Kombinationseignung und die gelenkte Kreuzung durch gezielte Bestäubung zur Erzeugung von Hybridsaatgut.

Wie bei der Selbstbefruchterzüchtung werden zunächst homozygote Inzuchtlinien mit möglichst unterschiedlichem genetischem Material erstellt, da die Heterosis in der Regel umso höher ist, je weniger verwandt die Ausgangslinien sind und je höher der Grad ihrer Homozygotie ist. So verwendet man für die Züchtung neuer Mais-Hybriden in Europa zum Beispiel meist einen hier schon lange heimischen früh reifenden und kältetoleranten Hartmais (Flint) und einen eher spät reifenden, wenig kälteverträglichen Zahnmais (Dent) aus Amerika.

Bei Fremdbefruchtern kann jedoch bereits das Erstellen der Inzuchtlinien mit erheblichen Schwierigkeiten verbunden sein, da sie Strategien entwickelt haben, die eine Selbstbestäubung verhindern, und die Inzuchtlinien zudem nur geringe Erträge bringen. Der Wert dieser Inzuchtlinien liegt jedoch nicht in ihrer Eigenleistung, sondern in ihrer Eignung zur Kombination, die man durch verschiedene Kreuzungstests zu erfassen sucht.

Die Inzuchtlinien mit der höchsten spezifischen Kombinationseignung werden schließlich zur Erzeugung von Hybridsaatgut herangezogen. Da der erwünschte Heterosis-Effekt jedoch nur auftritt, wenn das Saatgut tatsächlich von unterschiedlichen Eltern abstammt, muss die Bestäubung perfekt gelenkt und eine Selbstbefruchtung ausgeschlossen werden.

Dies gestaltet sich bei Kulturarten mit zwittrigem Blütenaufbau wie Roggen, Sonnenblume oder Raps sehr schwierig. Deshalb werden Sameneltern genutzt, die aufgrund einer Mutation im Kerngenom und in den Mitochondrien nicht mehr in der Lage sind, männliche Blütenorgane zu bilden; sie sind männlich steril (cytoplasmatisch-männliche Sterilität, CMS). Solche CMS-Pflanzen haben in der Hybridzüchtung eine überragende Bedeutung.

Die zweifellos sehr aufwendige Hybridzüchtung erfreut sich nicht nur wegen ihrer hohen Erträge wachsender Beliebtheit. Bei Fremdbefruchtern bietet sie die einzige Möglichkeit, homogene Pflanzenbestände zu erzeugen. Und sie hat für die Züchter eine auch wirtschaftlich erwünschte Komponente: Da der Heterosis-Effekt schon in der nächsten Generation durch genetische Spaltung teilweise verloren geht, lassen sich Hybridsorten nicht nachbauen und gewährleisten somit einen weitgehenden Schutz des geistigen Eigentums ihres Züchters.

Heterosis führt bei Mais in der F_1-Hybride (Mitte) zu einem mehr als doppelt so hohen Ertrag als bei den Elternlinien (außen)

Klassische Verfahren der Pflanzenzüchtung

– oder: Geduld ist eine Tugend

Langjährig bewährte konventionelle Verfahren sind nach wie vor das Rückgrat der Pflanzenzüchtung. Ihr Ziel ist es, noch bessere Sorten hervorzubringen, die unter verschiedenen Umwelt- und Anbaubedingungen sowohl hohe und stabile Erträge als auch gute Qualitäten gewährleisten. Zwei Beispiele für solche klassischen Verfahren sind die Züchtung von Liniensorten und von Hybridsorten. Welche Methode sinnvoll ist, hängt zu allererst von den Eigenschaften der betrachteten Art ab, etwa von ihrer Vermehrungsweise.

Es gibt Pflanzen, die sich generativ (sexuell) vermehren, indem sie Samen bilden, und solche, die sich überwiegend vegetativ (klonal) vermehren, etwa durch Knollen, Zwiebeln oder Sprossausläufer. Die sexuelle Vermehrung kann wiederum auf zwei verschiedene Weisen geschehen: als Selbstbefruchtung durch Pollen derselben Pflanze bzw. Blüte oder als Fremdbefruchtung durch Pollen eines anderen Individuums derselben Art. Beide sind in der Natur weit verbreitet – und erfordern unterschiedliche Zuchtverfahren.

Biotechnologie in der Pflanzenzüchtung

– oder: Fortschritt mit Turbo-Effekt

Die konventionelle Pflanzenzüchtung ist ein ebenso aufwendiges wie langwieriges Geschäft. Nicht selten vergehen mehr als 15 Jahre von der ersten Kreuzung bis zum Beginn der Vermarktung einer Sorte, ein langer Zeitraum, in dem der Züchter erhebliche Kosten zu tragen hat. So wundert es nicht, dass man alle Möglichkeiten des technischen Fortschritts nutzt, um Sorten schneller und effizienter zu züchten. Zu eben diesem Zweck wurden in den letzten 30 Jahren zahlreiche molekularbiologische Techniken sowie Methoden der Zell- und Gewebekultur entwickelt und in der Pflanzenzüchtung eingesetzt.

Durch den Einsatz biotechnologischer Verfahren wird das prinzipielle Vorgehen in der Sortenzüchtung nicht verändert. Neue Sorten entstehen auch weiterhin durch Schaffen von Ausgangsvarianten, Selektion von Sortenkandidaten und deren Prüfung unter praxisnahen Bedingungen, also im Freiland. In allen Phasen der Sortenzüchtung eröffnen biotechnologische Verfahren dem Züchter jedoch neuartige Wege, die die Züchtung beschleunigen und effizienter gestalten.

Zu diesen Verfahren zählen beispielsweise die Regeneration ganzer Pflanzen aus isolierten Pflanzenteilen und einzelnen Zellen oder die Verschmelzung von Protoplasten, jenen wandlosen Zellen, die sich aus fast allen Teilen einer Pflanze gewinnen lassen. Sie ermöglichen neue Kombinationen von Genen, die sich auf konventionellem Wege nicht erzeugen lassen, zum Beispiel weil Kreuzungsbarrieren die Übertragung von Genen nicht-verwandter Arten verhindern. Rein theoretisch eröffnen diese Verfahren neue Kombinationsmöglichkeiten in unbegrenzter Zahl und erhöhen damit die Variabilität des Ausgangsmaterials in zuvor unvorstellbarer Weise. Sinnvoll nutzbar sind jedoch nur wenige dieser Kombinationen.

Neben der Zellfusion schaffen die Verfahren zur künstlichen Auslösung von Mutationen weitere Möglichkeiten zur Verbreiterung der genetischen Basis von Nutzpflanzen (vgl. S. 18). Auch die bereits erwähnte Erzeugung haploider und doppelhaploider Pflanzen, mit der man die Linienzüchtung beschleunigt und perfektioniert, zählt zu den erfolgreich angewandten biotechnologischen Methoden. Tatsächlich sind heute viele Sorten, die in der Landwirtschaft angebaut werden, mit Hilfe biotechnologischer Verfahren gezüchtet worden. Die klassischen Methoden der Selektion freilich werden auch in Zukunft erhalten bleiben. Eine Züchtung nur im Labor kann und wird es niemals geben.

Neue Möglichkeiten durch molekulargenetische Verfahren

– oder: Der aufschlussreiche Blick ins Erbgut

Nicht nur die Zellen und ihre Strukturen, sondern auch das Erbgut von Pflanzen und Tieren sucht die Wissenschaft immer besser zu verstehen – und solche Erkenntnis auch zu nutzen. All jene Verfahren, mit denen sich Gene identifizieren, charakterisieren, vermehren oder auch in andere Organismen übertragen lassen, werden heute unter dem Begriff Gentechnik zusammengefasst. Sie alle beruhen letztlich auf den bahnbrechenden Entdeckungen des universellen genetischen Codes und seiner Wirkungsweise, die die Biologie in der zweiten Hälfte des vergangenen Jahrhunderts revolutionierten.

Viele molekulargenetische Verfahren werden seit geraumer Zeit in der Pflanzenzüchtung eingesetzt. Die Diskussion in der Öffentlichkeit entzündet sich jedoch nur an einem von ihnen: der künstlichen Übertragung von Genen. Andere

Die universelle Sprache der Gene

Die stoffliche Grundlage der Vererbung ist bei allen Lebewesen gleich: Sie beruht auf den langen Kettenmolekülen der Desoxyribonukleinsäure (desoxyribonucleic acid, DNA). Diese fadenförmigen Moleküle sind aus einer Vielzahl von Einzelstücken, den sogenannten Nukleotiden, zusammengesetzt. Sie bestehen chemisch jeweils aus einem Phosphat-Rest, einem Zucker und einer von vier organischen Basen, die mit den Kürzeln A, T, G und C (für Adenin, Thymin, Guanin und Cytosin) beschrieben werden. Sie gelten als die vier Buchstaben des universellen genetischen Alphabets, denn ihre Abfolge in der DNA legt die Abfolge der Aminosäuren innerhalb der Proteine fest. Tatsächlich stimmt die Sprache der Gene bei allen Lebewesen prinzipiell überein. Deshalb versteht eine Pflanzenzelle beispielsweise auch die Information eines Gens, das aus einem Bakterium stammt.

Vor jeder Zellteilung wird die DNA verdoppelt, indem ihre charakteristische Doppelhelix durch Enzyme entspiralisiert und in zwei Einzelstränge gespalten wird, die dann gleichsam als Matrizen für die Ergänzung durch einen neuen komplementären Strang dienen. Nach dieser identischen Replikation kann das Erbgut bei der Zellteilung gleichmäßig auf beide Tochterzellen verteilt werden.

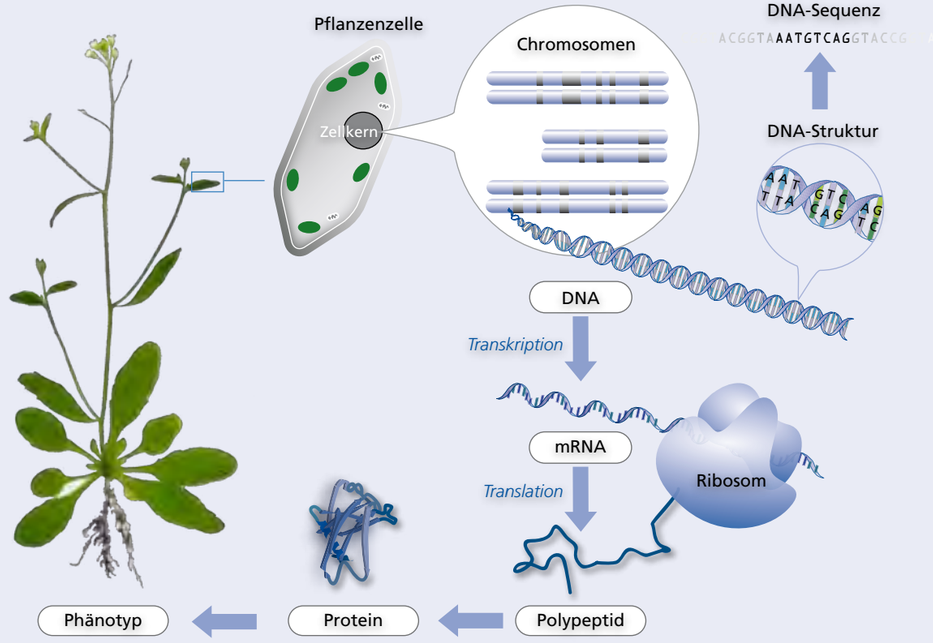
Seine Wirkung entfaltet das Erbgut nicht im Zellkern, sondern im Cytoplasma der Zellen. Dazu muss die genetische Information zunächst einmal zu den Orten der Proteinbiosynthese, den Ribosomen im Cytoplasma, gelangen. Zu diesem Zweck wird die Doppelhelix wiederum an bestimmten Stellen geöffnet und entspiralisiert, die Basenabfolge der DNA dann in eine entsprechende Basensequenz einer Boten-Nukleinsäure umgesetzt (messenger RNA oder mRNA). Im chemischen Aufbau unterscheidet sich die Ribonukleinsäure leicht von der DNA: Sie ist überwiegend einzelsträngig und nicht doppelsträngig wie die DNA, sie besitzt die Base Uracil (U) anstatt Thymin (T) und den Zucker Ribose anstatt Desoxyribose. Mit Proteinen assoziiert wird diese mRNA schließlich aus dem Zellkern exportiert und gelangt zu den Ribosomen.

Dort wird ihre Basenfolge in eine Aminosäure-Sequenz übersetzt, wobei jeweils drei Nukleotide (Codons) für eine Aminosäure stehen. Bei vier verschiedenen Basen ergeben sich somit insgesamt 64 Möglichkeiten der Verschlüsselung. Da bei der Eiweißsynthese jedoch nur 20 sogenannte kanonische Aminosäuren vorkommen, werden die meisten von ihnen durch mehr als ein Basentriplett codiert. Drei der 64 Tripletts bilden als sogenannte Stop-Codons zudem ein Signal für den Abbruch der Proteinsynthese, eines fungiert als Start-Codon und steht für die Aminosäure Methionin, mit der jede Proteinbiosynthese beginnt.

Für jede der Aminosäuren ist wiederum eine spezifische Transfer-Nukleinsäure (tRNA) in der Zelle vorhanden. Jede von ihnen besteht aus etwa 80 Nukleotiden sowie einer Erkennungsregion, dem sogenannten Anticodon, und trägt an ihrem Ende eine spezifische Aminosäure. Auf solche Weise wird durch die Verknüpfung von Aminosäuren ein Peptid gebildet, dessen Aufbau der Triplett-Abfolge der Boten-RNA entspricht. Weitere Modifikationen wie etwa die Faltung führen schließlich zum „reifen" Protein. Stark vereinfacht ist also die Realisierung der genetischen Information, der Weg vom Gen zum Protein, so zu beschreiben:

DNA ▶ Transkription ▶ mRNA ▶ Translation ▶ Protein

Unterschiede im Phänotyp haben also, wenn sie nicht eine ausschließlich umweltbedingte Variation darstellen, ihren Ursprung in der Nukleotidsequenz der DNA. Auf dieser Tatsache basieren letztlich alle molekulargenetischen Verfahren. Neuere Erkenntnisse über die Wirkungsweise der RNA zeigen, dass ihr über das oben gezeigte Schema hinaus wichtige Funktionen bei der Regulation der Gene zukommen.



(nach Jung)

molekulargenetische Methoden wie die Markierung von Genen zur schnelleren Selektion der erwünschten Pflanzen hingegen haben die Pflanzenzüchtung inzwischen entscheidend verändert, ohne dass die Öffentlichkeit daran Anstoß genommen hätte.

Molekulare Marker zur Beschleunigung der Züchtung

– oder: Auf der Suche nach der Nadel im Heuhaufen

Mit modernen Verfahren der Biotechnologie lassen sich Gene gleichsam sichtbar machen und genetische Fingerabdrücke oder Genkarten erstellen, die zeigen, auf welchem Chromosom und an welcher Stelle sich ein Gen befindet. Man kann mit molekularbiologischen Verfahren auch bestimmte Abschnitte des Erbguts gezielt markieren und erkennbar machen. Dadurch wird es beispielsweise möglich, frühzeitig festzustellen, ob Pflanzen ein erwünschtes Allel tatsächlich enthalten oder nicht. Zu eben diesem Zweck werden seit Anfang der 1990er-Jahre sogenannte molekulare Marker in der Pflanzenzüchtung genutzt.

Spargel ist nur ein Beispiel. Es ist eine zweigeschlechtliche Pflanze – männliche und weibliche Blüten werden auf verschiedenen Pflanzen gebildet. Das Geschlecht der Blüten wird durch ein Gen M bestimmt. Für den Spargelanbau sind nur männliche Pflanzen erwünscht, weil sie höhere Erträge bringen. Spargelpflanzen blühen allerdings erst nach mehreren Jahren. So lange würde der Züchter brauchen, um den Phänotyp bestimmen zu können. Mit Hilfe eines molekularen Markers lassen sich männliche Pflanzen, die entweder homozygot (MM) oder heterozygot (Mm) sind, jetzt jedoch schon als Keimlinge sicher von weiblichen (mm) unterscheiden. Damit beschleunigt sich das Selektionsverfahren drastisch. Inzwischen sind mehrere Sorten auf dem Markt, die mit Hilfe molekularer Marker gezüchtet wurden.

Molekulargenetische Marker werden heute in der Pflanzenzüchtung in drei Bereichen eingesetzt:

- Man nutzt sie, um die verwandtschaftlichen Verhältnisse zwischen verschiedenen Herkünften einer Art zu bestimmen. Dies ist wichtig für die Zusammenstellung von Kreuzungskombinationen und die Erzeugung von Hybriden.
- In Nachkommenschaften aus der Kreuzung unterschiedlicher Eltern können mit Hilfe molekularer Marker die Genomanteile des jeweiligen Elters genau bestimmt werden. So können in frühen Generationen Pflanzen selektiert werden, die einen möglichst hohen Anteil eines Eliteelters besitzen.
- Molekulare Marker werden schließlich für die Selektion auf einfach oder komplex vererbte Merkmale eingesetzt, dienen also als Selektionshilfen, um den Züchtungsprozess zu beschleunigen und Kosten zu sparen.

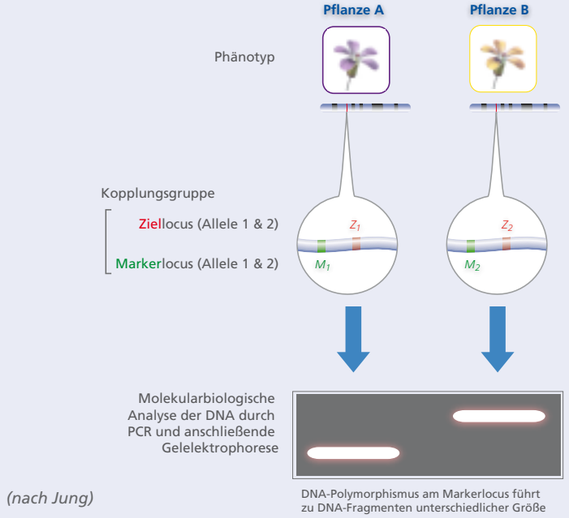
Zur Selektion eignen sich molekulare Marker nur, wenn die Kopplung an das Zielgen eindeutig nachgewiesen ist. Für die Selektion auf einfach vererbte Merkmale werden sie in der Regel vor

Molekulare Marker

Unter molekularen Markern versteht man bestimmte Sequenzen oder Abschnitte der DNA, die gemeinsam mit landwirtschaftlich bedeutenden Merkmalen vererbt werden und die sich mit molekularbiologischen Methoden eindeutig nachweisen lassen. Um sie sichtbar zu machen, wird das Erbgut bei einigen Techniken in kleine Abschnitte zerlegt. Dann vermehrt man die DNA-Fragmente und trennt sie nach ihrer Länge auf. Kürzere Fragmente wandern schneller und sammeln sich im unteren Bereich des Gels, auf das man die DNA aufgebracht hat. Je länger die Abschnitte sind, umso langsamer bewegen sie sich. Durch Anfärbung der DNA kann man die Fragmente sichtbar machen und so bestimmen, welches Allel eine Pflanze besitzt.

Zwei Pflanzen A und B unterscheiden sich durch ihre Anfälligkeit für eine bestimmte Krankheit: Die Pflanzen mit dem Allel Z1 sind anfällig, die mit dem Allel Z2 sind dagegen resistent. Genetisch eng benachbart zu dem Gen Z liegt das Gen M, in dem die Pflanzen sich ebenfalls unterscheiden.

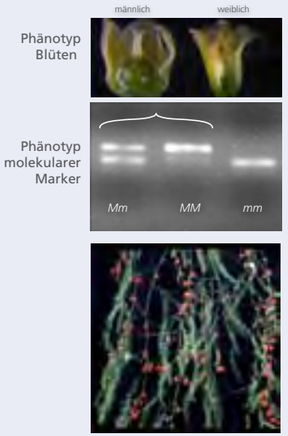
Aufgrund der Nähe von M und Z lässt sich durch die Bestimmung des Markers M auf den Genotyp am Ziellocus schließen – die Selektion resistenter Pflanzen kann also allein durch den Marker M erfolgen. Voraussetzung dafür ist die Nähe zwischen beiden Loci, die als genetische Kopplung bezeichnet wird. Diese Kopplung muss exakt nachgewiesen sein, bevor man einen Marker tatsächlich in der Züchtung nutzen kann.



DNA-Polymorphismus am Markerlocus führt zu DNA-Fragmenten unterschiedlicher Größe

(nach Jung)

Beispiel: Markergestützte Selektion männlicher Spargelpflanzen



Weibliche Spargelpflanze mit Früchten

allem dann eingesetzt, wenn sich ein Merkmal sonst nur schwer bestimmen lässt. Dies gilt zum Beispiel für Resistenzen gegen bestimmte Krankheiten oder Schädlinge oder für Merkmale, die sich – wie etwa die Blütenmerkmale – erst spät im Leben einer Pflanze ausprägen.

Molekulare Marker können aber auch für die Selektion polygen vererbter Merkmale eingesetzt werden. Anders als bei einfach vererbten Merkmalen gelingt die Selektion aber nicht hundertprozentig, weil bei diesen Merkmalen ein Teil des Phänotyps durch die Umwelt beeinflusst wird. Da sich polygen bedingte Merkmale aber sonst nur durch aufwendige Tests unter verschiedenen Umweltbedingungen bestimmen lassen, bietet die markergestützte Selektion auch hier wesentliche Vorteile.

Erzeugung transgener Pflanzen

– oder: Alles scheint möglich

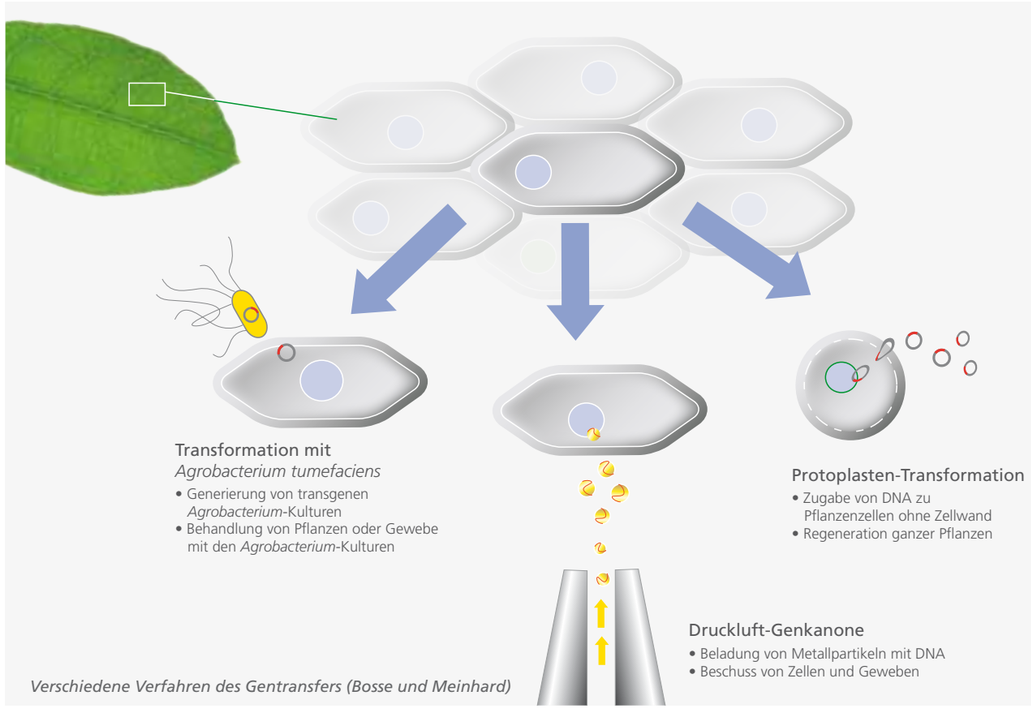
Besonders kontrovers diskutiert wird das Erzeugen transgener Pflanzen durch Einschleusen fremder Gene. Für diesen Gentransfer stehen eine Reihe unterschiedlicher Verfahren zur Verfügung.

Biolistik oder Partikelbombardement nennt sich eines der beiden Verfahren, die sich zur Übertragung von fremdem Erbgut in Pflanzenzellen mit ihren starren Zellwänden durchgesetzt haben. Dazu wird DNA an winzige Gold- oder Wolframpartikel gekoppelt, mit deren Hilfe sie die Zellwände pflanzlicher Zellen durchdringen kann. Die so beladenen Mikroprojektile werden mit hohem Druck in die Zielzellen geschossen (daher auch der Name „Genkanone“), in deren Genom sie nach dem Zufallsprinzip integriert werden können. Nach der Integration der DNA in das Erbgut der Zielzelle lassen sich mit geeigneten Verfahren der Zell- und Gewebekultur transformierte Pflanzen selektieren und ganze Pflanzen regenerieren. Zu den Nachteilen dieses Verfahrens gehört indes, dass häufig mehrere ganze oder auch fragmentierte Genabschnitte in eine komplette einzelne Zelle gelangen und zu unerwünschten Mutationen und instabiler Expression des fremden Gens führen können.

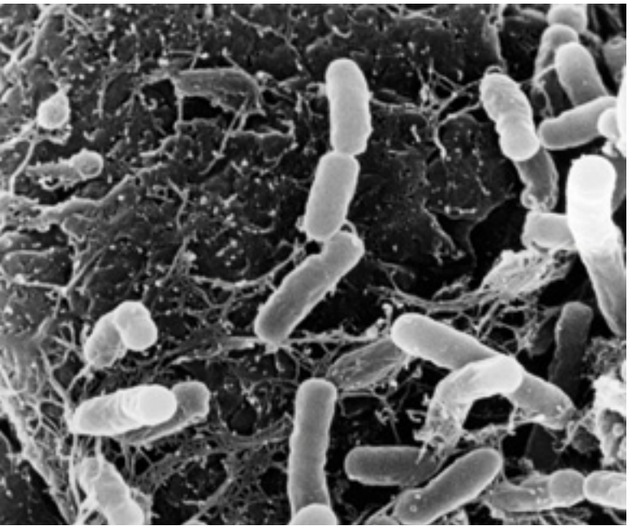
Der Gentransfer mit Hilfe von Agrobakterien ist derweil das am häufigsten eingesetzte Verfahren zur Erzeugung transgener Pflanzen. Dabei wird das natürliche System dieser Bakterien zur Übertragung von Genen genutzt. *Agrobacterium tumefaciens* kommt fast überall in der Natur vor und gelangt durch Verwundungen in pflanzliches Gewebe. Dort übertragen die Bakterien einen definierten Abschnitt ihres Erbguts in das Genom der Wirtspflanzen, wodurch die Vermehrung und Wucherung von Zellen angeregt und der Stoffwechsel des Wirtes so umgesteuert wird, dass er neuartige Aminosäuren wie Nopaline oder Octopin produziert.

Die Entwicklung der Grünen Gentechnik ist eng mit der Geschichte von *Agrobacterium tumefaciens* verbunden. Sie beginnt 1907 mit der Entdeckung, dass *Agrobacterium tumefaciens* der Verursacher der Wurzelhalsgallen ist. 1974 gelang dann der Nachweis, dass die Tumorinduktion an die Anwesenheit eines bestimmten Plasmids gekoppelt ist, eines jener kleinen, in der Regel zirkulären und sich selbst vermehrenden DNA-Moleküle, die in Bakterien vorkommen können, aber nicht zum Bakterienchromosom zählen. Drei Jahre später stellte man fest, dass Teile dieses Tumor-induzierenden Plasmids (Ti-Plasmids), die T-DNA (Transfer-DNA), in das Genom der Pflanze integriert werden.

Nach der Entschlüsselung der molekularen Grundlagen des Gentransfers konnte im Jahr 1983 durch gezielte Veränderung der T-DNA die erste transgene Tabakpflanze hergestellt werden. Dazu musste man die Gene für die Tumorbildung und für die Synthese der fremden Aminosäuren entfernen und durch jene Gene ersetzen, die man übertragen wollte.



Verschiedene Verfahren des Gentransfers (Bosse und Meinhard)



Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme von Agrobacterium- tumefaciens-Bakterien auf pflanzlichem Gewebe

Inzwischen hat sich der Gentransfer mit der bakteriellen Genfähre für die meisten Kulturpflanzen zu einem Routineverfahren entwickelt. Nur bei den Getreidearten wird vorwiegend die „Genkanone“ angewandt, doch auch hier setzt sich der Gentransfer mit Hilfe der Agrobakterien immer mehr durch. Da die Effizienz der Transformation allerdings recht gering ist, werden die Zielgene in aller Regel zusammen mit einem Selektionsmarker in die Pflanzenzelle eingeführt.

Bei allen Verfahren wird die fremde DNA in der Regel durch nicht-homologe (illegitime) Rekombination in das pflanzliche Genom integriert: Das Transgen wird an nicht vorhersagbaren Stellen des pflanzlichen Erbguts eingebaut. Dies kann die Ausprägung der gewünschten Eigenschaft nachteilig beeinflussen und darüber hinaus unerwünschte Mutationen auslösen. Diesen eventuellen negativen Auswirkungen versucht man derzeit dadurch zu begegnen, dass man eine Vielzahl von Transformanden durchmustert und selektiert bis ein „elite event“ isoliert werden kann. Eine Alternative liegt in der Entwicklung von Verfahren zur homologen Rekombination.

Homologe Rekombination

Unter homologer Rekombination versteht man den Austausch von sehr ähnlichen Sequenzen, die auf unterschiedlichen Chromosomen lokalisiert sind. Bei Bakterien, Pilzen und Tieren stellt dies einen wichtigen Mechanismus zur Reparatur von Fehlern bei der Verdopplung des Erbguts während der Zellteilung dar – und ermöglicht zugleich eine Variation im Erbgut, die eine wesentliche Voraussetzung für die Evolution ist. Bei Pflanzen hingegen kommt die homologe Rekombination kaum vor. Sie verfügen über die größten bekannten Genome – eine Zwiebelzelle beispielsweise enthält zehnmal mehr DNA als eine menschliche Zelle.

Der größte Teil dieser DNA besteht aus Wiederholungen von Sequenzen, die nicht zur Bildung von Eiweißen in der Zelle beitragen. Möglicherweise würde die homologe Rekombination in einer solchen Umgebung bewirken, dass zu viele schädliche Variationen entstehen. Bisher ist nur ein Moos (*Physcomitrella patens*) bekannt, das eine deutlich erhöhte Frequenz für homologe Rekombinationen aufweist.

Da die homologe Rekombination aber eine ausgezeichnete Möglichkeit darstellt, Gene gezielt in das Genom der Pflanze zu integrieren, werden große Anstrengungen unternommen, sie auch bei Kulturarten nutzbar zu machen. So sucht man herauszufinden, welche genetischen Unterschiede zu höheren Pflanzen es dem Moos erlauben, homologe Rekombinationen durchzuführen.

Mit Hilfe der Gentechnik wird zudem versucht, die Frequenzen für eine homologe Rekombination in Pflanzen zu erhöhen, zum Beispiel durch die Expression von Enzymen, die an wenigen Stellen des pflanzlichen Genoms Schnitte einfügen, um dort die homologe Rekombination zu induzieren. Ein besonders viel versprechender Ansatz ist die Integration von Schnittstellen für eine Rekombinase, wie sie auch für die Eliminierung von Markergenen genutzt wird. Das gleiche System ist auch für die gezielte Integration von Genen denkbar. Da es hier viele unterschiedliche Schnittstellen mit den dazugehörigen Enzymen gibt, ist auch die Integration von mehreren Genen an einem Locus möglich.

Plastidentransformation

All diese Ansätze dienen der Erzeugung transgener Pflanzen, bei denen die neue Erbinformation stabil im Kerngenom verankert wird. Pflanzenzellen besitzen allerdings Erbinformationen nicht nur in ihrem Zellkern, sondern auch in Plastiden und Mitochondrien. Mitochondrien haben sich bisher einer Transformation zwar weitestgehend entzogen, je nach Fragestellung kann man die Zielgene jedoch entweder in das Kerngenom oder das Plastom, das Genom der Plastiden, integrieren. Die Transformation von Plastiden weist einige Besonderheiten auf: Da sie in den meisten Nutzpflanzen nur mütterlich vererbt werden, wird die Ausbreitung des Transgens über Pollen minimiert. Außerdem bietet sich hier die Möglichkeit, komplette Stoffwechselwege zu integrieren und nicht zuletzt ist die Produktionsrate biotechnologisch relevanter Proteine sehr hoch. Allerdings besitzt dieses Verfahren auch Nachteile: Bisher ist es nur für die Herstellung von Proteinen geeignet, die in Plastiden ihre Wirkung entfalten. Zudem wurde auch ein Gentransfer zwischen Plastiden und Kern beobachtet, der zu einer unerwünschten Übertragung des Transgens in das Kerngenom führen könnte.

Neben der stabilen Transformation zur Herstellung transgener Pflanzen wurden Systeme entwickelt, die eine zeitlich befristete Expression fremder Gene in Pflanzen erlauben. Hierfür werden Virusgenome gentechnisch so verändert, dass sie die gewünschten Proteine kodieren. Die so veränderten Viren werden zur Infektion von Wirtspflanzen verwendet, aus denen man dann das Protein gewinnen kann.

Selektion transgener Pflanzen

– oder: Der zweite Schritt der künstlichen Evolution

In aller Regel wird ein fremdes Gen – auf welchem Wege auch immer – nur in einzelne Zellen oder kleine Gewebeteile einer Pflanze eingeführt, aus denen dann mit biotechnischen Verfahren

wieder vollständige Pflanzen herangezogen werden. Um nach einer Genübertragung aus einer Vielzahl von Zellen diejenigen herauszufinden, die das fremde Gen tatsächlich in ihr Erbgut aufgenommen haben, überträgt man gleichzeitig ein zusätzliches Markergen. Derzeit sind etwa fünfzig solcher Markergene bekannt, die sich zur relativ bequemen und schnellen Selektion transformierter Zellen eignen. Visuelle Marker zählen dazu, fluoreszierende Proteine zum Beispiel, die im Mikroskop beobachtet werden können. Als positive Selektionsmarker bezeichnet man solche, die es der transformierten Zelle ermöglichen, auf Medien zu wachsen, die für unveränderte Zellen keine hinreichende Nährstoffversorgung bieten oder toxische Substanzen wie Antibiotika oder Herbizide enthalten. Tatsächlich werden Markergene, die eine Resistenz gegen Antibiotika oder Herbizide vermitteln, besonders häufig verwendet. Unter ihnen hat ein Gen mit Namen Neomycinphosphotransferase (nptII-Gen) derzeit mit Abstand die größte Bedeutung (vgl. S. 67).

Die Tatsache, dass Selektionsmarker in den transformierten Pflanzen verbleiben, wird sowohl von Wissenschaftlern als auch von der Öffentlichkeit kritisch betrachtet – allerdings aus verschiedenen Gründen. Die Öffentlichkeit fürchtet eine mögliche Ausbreitung der Antibiotika-Resistenzgene. Dies wird in der Wissenschaft zwar diskutiert, aber nicht als relevant angesehen (vgl. S. 65 ff.). Die Wissenschaft sieht es indes als nachteilig an, dass die Markergene bei mehrfachen Transformationen nur einmal genutzt werden können. So sucht man nach Möglichkeiten, entweder ganz auf Selektionsmarker zu verzichten oder sie nach der Transformation wieder aus der pflanzlichen Zelle zu entfernen.

Der völlige Verzicht auf Markergene hat sich indes als außerordentlich aufwendig erwiesen. Denn wenn alle Zellen in einem Gewebeverband die Möglichkeit haben, zu einer Pflanze heranzuwachsen, nutzen zuerst die unbeeinträchtigten Zellen diese Chance und hemmen zugleich die Regeneration benachbarter Zellen. Offenbar geht die Aufnahme eines Transgens mit einer Einschränkung des Regenerationsvermögens einher – in aller Regel jedenfalls regenerieren ohne ein Selektionsverfahren nur die unveränderten Zellen. Diese Schwierigkeit lässt sich entweder durch eine große Zahl von Regenerationsversuchen oder durch die Erhöhung der Anzahl und die Markierung transgener Zellen und deren anschließende Separation in einem Gewebeverband beheben. Dies ist – allerdings mit großem Aufwand und nur bei wenigen Kulturarten – durch Mikroinjektion möglich.

Eine weitere Möglichkeit ist es, Markergene nach erfolgreicher Selektion der transgenen Zellen zu eliminieren. Dies wird zum Beispiel durch Selektion in den folgenden Generationen möglich, wenn es gelingt, das Markergen in einem anderen Chromosom zu integrieren als das eigentliche Zielgen. Da die Chromosomen unterschiedlich auf die Keimzellen verteilt werden und die neu integrierten Gene immer nur in einem der beiden Geschwisterchromosomen vorkommen, sind – gemäß den Mendel'schen Regeln – Nachkommen zu erwarten, die nur das Zielgen, und andere, die nur das Markergen tragen. Dazu hat man spezielle

Selektion von Arabidopsis-Keimlingen auf selektivem Nährmedium

Methoden entwickelt wie eine Kotransformation mit unterschiedlichen Stämmen von Agrobakterien oder die Transformation mit Ti-Plasmiden, die zwei T-DNAs enthalten.

Man kann das Markergen aber auch zwischen den Schnittstellen eines Enzyms anordnen, einer Rekombinase, die gezielt DNA-Sequenzen aus einem Chromosom herausschneidet. Zu diesem Zweck sind bereits unterschiedliche Rekombinationssysteme genutzt worden, die auf verschiedenen Enzymen basieren. Durch die Infektion der transgenen Pflanzen mit einem Virus, welches das Gen für die Rekombinase trägt, kann dann ein nicht mehr benötigter Selektionsmarker, der von enzymspezifischen Schnittstellen flankiert wird, eliminiert werden. Dabei ermöglicht die Infektion mit dem Virus den Einsatz des Rekombinase-Enzyms zu einem gewünschten Zeitpunkt nach der Selektion in allen Zellen, aus denen sich die künftige Pflanze regeneriert. An der Integrationsstelle bleibt nur die kurze Erkennungsstelle für die Rekombinase zurück. Anschließend wird auch das Virus mit Hilfe einer Thermo- oder Chemotherapie wieder aus dem Gewebe entfernt.

All diese Verfahren beziehen sich auf die erste Stufe der Selektion, noch vor dem Heranziehen der Pflanzen in Labor und Gewächshaus. Ein großer Teil der züchterischen Arbeit und Prüfungen schließt sich daran allerdings noch an – wie bei allen anderen Zuchtverfahren auch. Der einzige

Unterschied in den folgenden Schritten liegt darin, dass an die gentechnisch veränderten Pflanzen erhöhte Sicherheitsanforderungen gestellt werden.

Auswirkungen der Genomforschung auf die Pflanzenzüchtung

– oder: Über gläserne Pflanzen und Wunschpflanzen

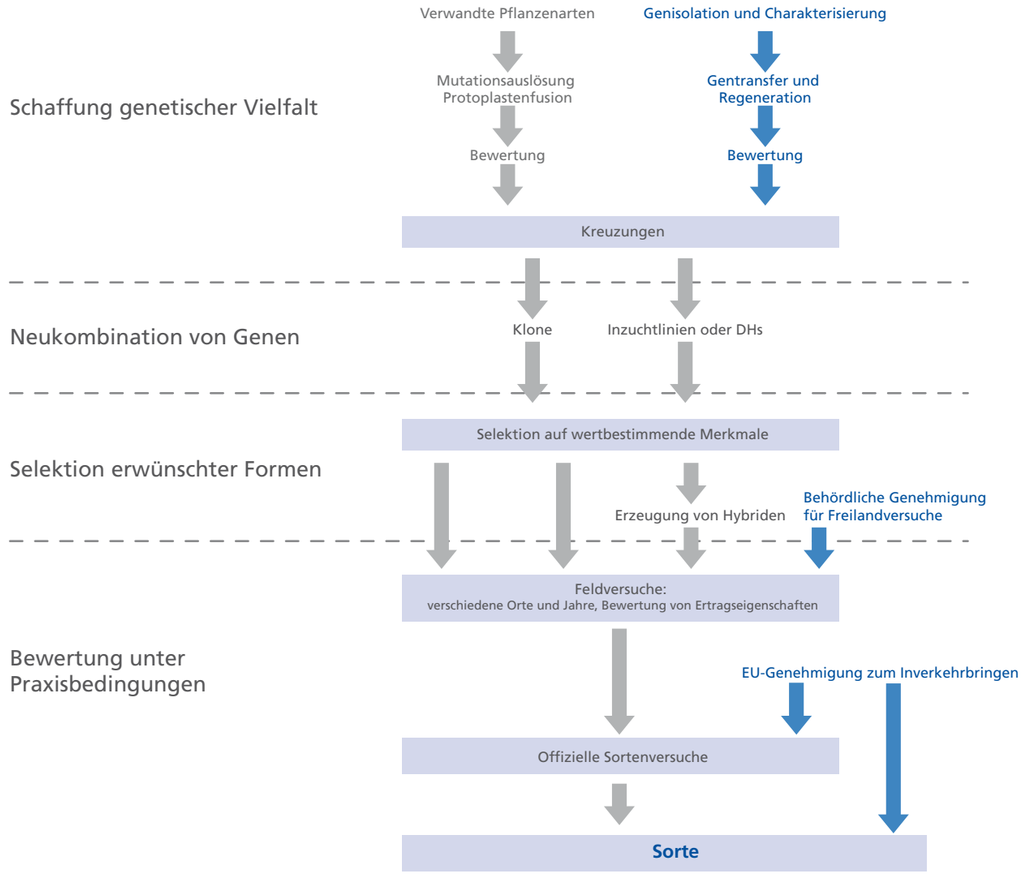
Pflanzliche Genome werden seit Mitte der 1990er-Jahre systematisch erforscht. Die vollständige Entschlüsselung des Genoms der als Modellpflanze beliebten Ackerschmalwand *Arabidopsis thaliana* im Jahr 2000 stellte einen wichtigen Meilenstein dar. Ihr gingen zahlreiche methodische Entwicklungen voraus, die das Erfassen der Erbinformationen von Pflanzen erst möglich machen. Die wesentlichen Ziele der Genomforschung an Nutzpflanzen sind heute:

- das Erstellen genomweiter genetischer Karten mit molekularen Markern und züchterisch wertvollen Genen
- das Erstellen genomweiter physischer Karten zur Bestimmung der tatsächlichen Abstände zwischen den Genen (in Nukleotiden)
- die systematische Sequenzierung transkribierter Genombereiche (expressed sequence tags, ESTs) und die globale Erfassung von Transkriptomprofilen (DNA-MicroArrays)
- die Sequenzierung ganzer Genome mittels „Next Generation"-DNA-Sequenzierung (u.a. 454- oder Solexa-Sequenziertechnologien)
- die funktionelle Charakterisierung von Genen, die an der Ausprägung züchterisch wertvoller Eigenschaften wie Stressresistenz oder Qualität beteiligt sind
- die Fahndung nach den Ursachen quantitativer phänotypischer Variationen und den Ursachen der Heterosis
- die Erzeugung von Mutantenkollektionen zur Identifizierung von Genen, die an der Ausprägung züchterisch wertvoller Merkmale beteiligt sind.

Entschlüsseltes Modell

Das neue Jahrtausend markiert auch für die pflanzengenetische Forschung ein neues Zeitalter: Im Jahr 2000 wurde erstmals das Genom einer Pflanze, das der Ackerschmalwand *Arabidopsis thaliana*, vollständig entschlüsselt. Schon lange zählt diese unscheinbare Pflanze, die für die Landwirtschaft keinerlei Bedeutung hat, zu den Lieblingsgewächsen der Genetiker, denn sie weist eine ganze Reihe Eigenschaften auf, die sie zur Modellpflanze geradezu prädestinieren: Sie hat einen kurzen Generationszyklus – nur acht Wochen dauert es von der Keimung des Samens bis zur Reife der nächsten Samen – und lässt sich auf relativ kleinem Raum leicht kultivieren, verfügt zugleich aber über viele Eigenschaften höherer Pflanzen.

Inzwischen sind zahlreiche Mutanten bekannt, die man aus Samenbanken beziehen kann. Vor allem aber hat die Pflanze ein sehr kleines Genom von nur 125 Millionen Basenpaaren, die auf fünf Chromosomen verteilt sind und vorwiegend aus kodierenden DNA-Sequenzen bestehen. Das ist bei höheren Pflanzen keineswegs selbstverständlich.



Pflanzenzüchtung ohne und mit (blaue Pfeile) gentechnisch veränderten Pflanzen (nach Jung)

Die DNA kann vielmehr in verschiedene Klassen eingeteilt werden: Es gibt Sequenzen, die nur in einer oder wenigen Kopien in einem haploiden Genom vorkommen. Dies sind in den meisten Fällen die züchterisch interessanten Sequenzen, weil sie jene Gene darstellen, die transkribiert und schließlich in ein funktionelles Protein umgesetzt werden. Dazu zählt in der Regel aber nur ein geringer Teil des Genoms – je nach Größe des Erbguts etwa fünf Prozent der DNA. Der Rest besteht aus repetitiven Sequenzen, deren Wiederholungsgrad von einigen Hundert bis zu mehreren Millionen Kopien betragen kann. Sie tragen zur Aufblähung der Genome bei, ihre Funktion ist allerdings noch nicht vollständig verstanden.

Diese repetitiven Sequenzen sind auch ein Grund dafür, dass die Genome der Kulturpflanzen – gemessen in Nukleotiden – sehr unterschiedlich groß sind. Nach dem bisherigen Wissensstand hat der Reis das kleinste Genom aller wichtigen Nutzpflanzen. Es hat eine Größe von rund 430 Millionen Nukleotiden und wurde im Jahr 2001 ebenfalls vollständig entschlüsselt. Der Weizen dagegen besitzt eines der größten Genome unserer Kulturpflanzen mit rund 15 Milliarden Nukleotiden.

In Deutschland existiert seit 1998 ein nationales Pflanzen-Genomforschungsprogramm namens GABI (Genomanalyse im biologischen System Pflanze), das durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung und die private Wirtschaft unterstützt wird. Auch die DFG fördert die Erforschung pflanzlicher Genome in erheblichem Umfang. Dies geschieht in einer Vielzahl von Einzelprojekten, aber auch im Rahmen koordinierter Vorhaben. Seit dem Jahr 2001 arbeiten Wissenschaftler zum Beispiel im AFGN (Arabidopsis Functional Genomics Network) an der funktionellen Analyse von Genfamilien der Modellpflanze *Arabidopsis thaliana*. Aus ihren Ergebnissen sollten sich auch wichtige Erkenntnisse für die Züchtung ableiten lassen. Im Rahmen des Europäischen Forschungsförderungsnetzwerks „Plant Genomics“ (ERA-PG) unterstützt die DFG zudem internationale Projekte zur Genomforschung an Modell- und Kulturpflanzen und leistet damit einen Beitrag zur Internationalisierung der deutschen Forschung.

In einem Schwerpunktprogramm fahndet man nach den Ursachen der Heterosis (vgl. S. 21). Hier konnten Wissenschaftler mit Hilfe modernster Verfahren wie QTL-Kartierungsstudien, Analysen von Genexpression und Metaboliten sowie physiologischen Untersuchungen an Arabidopsis, Mais und Reis erstmals eindeutig nachweisen, dass der Heterosis-Effekt auf polyfaktorieller Vererbung beruht und neben Dominanzeffekten einzelner Genloci auch epistatische Interaktionen in Gen-Netzwerken eine wichtige Rolle spielen, also Wechselwirkungen, bei denen ein Gen die Ausprägung eines anderen unterdrückt. Neben dieser Kausalanalyse konnten auch Methoden zur Vorhersage der Heterosis mit Werkzeugen der modernen Genomforschung entwickelt werden, die einen erheblichen Effizienzgewinn in der Hybridzüchtung versprechen.

Die Ergebnisse zahlreicher Projekte, die in diesem Rahmen gefördert wurden, nutzen die Pflanzenzüchter bereits auf vielfältige Weise. Zu ihnen zählen etwa die bereits erwähnten molekularen Marker, die heute bei der Züchtung von Kulturpflanzen eingesetzt werden. Darüber hinaus hat die Genomforschung zur molekularen Identifizierung vieler züchterisch wertvoller Gene und ihrer Regelelemente (Promotoren) geführt. Die entsprechenden Sequenzen können zum einen als Marker eingesetzt werden, zum anderen dienen sie der gezielten Veränderung von Merkmalen und damit der Erhöhung der genetischen Variation.

In Zukunft werden in zunehmendem Maße auch Mutanten aus sogenannten TILLING-Projekten (*Targeting Induced Local Lesions IN Genomes*) Einzug in die Pflanzenzüchtung halten. Dabei handelt es sich um Pflanzen mit neuartigen Eigenschaften, die durch künstlich ausgelöste Mutationen erzeugt worden sind. Zur Identifizierung der Mutanten analysiert und vergleicht man die betreffenden Gensequenzen. Auch für diese Methode zur Erweiterung der genetischen Variabilität ist die Kenntnis der DNA-Sequenzen eine entscheidende Voraussetzung.

Potenziale gentechnisch veränderter Pflanzen

Die Eigenschaften von Pflanzen zu verbessern, ist und bleibt das Ziel aller Züchtung. Höhere Erträge sollen sie liefern und bessere Qualitäten, gegen Krankheiten und Schädlinge sollen sie stärker gefeit sein und robuster gegenüber widrigen Bedingungen wie Hitze, Kälte oder Trockenheit. Vieles hat die traditionelle Pflanzenzüchtung schon erreicht – dennoch geht bis heute weltweit rund ein Drittel der Ernte durch Krankheiten, Schädlinge und Unkräuter verloren. Der Bedarf an Nahrungsmitteln aber steigt. Hohe und hochwertige Erträge zu sichern und zugleich die landwirtschaftliche Produktion umweltfreundlicher zu gestalten, ist eine der großen Herausforderungen für die Zukunft. Dazu kann die Gentechnik einen wichtigen Beitrag liefern.

Das Streben der Forscher geht dabei in fünf Richtungen: Zum einen versucht man, Pflanzen besser zu wappnen gegen Krankheiten oder Schädlinge, Hitze oder Kälte, Trockenheit oder salzige Böden, kurz gegen Stressfaktoren der unterschiedlichsten Art. Um die unliebsame Konkurrenz der Unkräuter auszuschalten und damit die Erträge zu sichern, werden Nutzpflanzen zudem mit gentechnischen Verfahren widerstandsfähig gegenüber bestimmten Herbiziden gemacht. Zum dritten will man Pflanzen so ausstatten, dass sie besonders hochwertige Nahrungs- und Futtermittel liefern und dazu beitragen, mangelhafte Ernährung zu vermeiden. Pflanzen dienen indes nicht nur zur Ernährung, sondern seit alter Zeit auch als Heilpflanzen; nun will man sie gezielt dazu anregen, pharmazeutisch interessante Substanzen, zum Beispiel pflanzliche Impfstoffe, zu erzeugen. Nicht zuletzt produzieren Pflanzen auch andere Rohstoffe verschiedenster Art – und auch diese Fähigkeit lässt sich mit Hilfe der Gentechnik steigern, abwandeln und optimieren.

Toleranz gegen biotischen und abiotischen Stress

– oder: Aufrüstung für den Kampf ums Dasein

Pflanzen haben es nicht leicht. Zeit ihres Lebens sind sie vielmehr immer wieder Stress ausgesetzt, widrigen Umständen, denen sie nicht entkommen können. Sind Lebewesen oder Viren die Ursache, spricht man von biotischem Stress. Alle anderen Faktoren wie Hitze oder Kälte oder der Mangel an Wasser, Nährstoffen oder Licht werden unter dem Begriff abiotischer Stress zusammengefasst. Im Laufe der Evolution haben die verschiedenen Pflanzenarten sehr unterschiedliche Strategien entwickelt, mit ungünstigen Lebensbedingungen zurechtzukommen, und Toleranzen oder Resistenzen gegenüber verschiedenen Stressfaktoren erworben.

Toleranz und Resistenz gegenüber Stress:

Unter **Toleranz** versteht man die Fähigkeit einer Pflanze, sich in Gegenwart eines Stressfaktors entwickeln zu können, ohne nennenswerte Reaktionen zu zeigen – zum Beispiel auf Böden mit hohem Salzgehalt. Die Gerste etwa hat eine relativ hohe Salztoleranz, während der Weizen sehr empfindlich gegenüber salzigen Böden ist. Ein anderes Beispiel ist der Befall durch Fadenwürmer (Nematoden), die die Wurzeln vieler Pflanzen schädigen. Während Raps selbst einen starken Befall durch Nematoden noch toleriert, reagiert die Zuckerrübe darauf mit erheblichen Ertragseinbußen.

Als **Resistenz** bezeichnet man hingegen die Fähigkeit einer Pflanze, einen biotischen Stressfaktor zu erkennen und gegen ihn vorzugehen. So kann sie zum Beispiel die Vermehrung eines Schaderregers so beeinträchtigen, dass er nur noch wenige oder gar keine Nachkommen mehr bilden kann. Pflanzen erreichen das etwa, indem sie antimikrobielle Substanzen bilden oder befallene Gewebe selektiv absterben lassen und damit dem Erreger die Nahrungsgrundlage entziehen.

Von Krankheiten und Schädlingen werden Pflanzen überall auf der Erde heimgesucht. In der Natur hat sich jedoch ein Gleichgewicht zwischen Pflanze und Erreger eingestellt. Schaderreger vermehren sich in der Regel auf ihren Wirtspflanzen, ohne dass es zu Schädigungen kommt, die den Bestand einer ganzen Pflanzenpopulation gefährden. In der Landwirtschaft freilich werden Pflanzen meist in Monokultur angebaut. So können sich Erreger, die an diese Pflanzenart angepasst sind, rasant vermehren und erhebliche Schäden hervorrufen. Mit chemischen Pflanzenschutzmitteln versucht man, derlei zu verhindern. Weniger belastend für die Umwelt, aber oftmals weit aufwendiger sind biologische Verfahren, mit denen etwa die Schädlinge gezielt abgefangen, ihre Sinne verwirrt oder Organismen gefördert werden, die man Nützlinge nennt, weil sie den Schädlingen schaden. Eine weitere Alternative zum chemischen Pflanzenschutz stellt die Züchtung widerstandsfähiger Sorten dar, die Toleranzen oder Resistenzen gegen Schaderreger besitzen. Zu diesem Zweck setzt man heute neben konventionellen Züchtungsmethoden auch gentechnische Verfahren ein. Inzwischen gibt es zahlreiche Nutzpflanzen, die auf solche Weise für den Kampf gegen Schaderreger, vor allem gegen Viren und Insekten, gestärkt wurden.

Für die Abwehr gefräßiger Insekten nutzt man ein Prinzip, das seit mehr als dreißig Jahren schon im biologischen Pflanzenschutz und dem ökologischen Landbau Verwendung findet: die toxische Wirkung von *Bacillus thuringiensis (Bt)*. Dieses Bakterium ist in der Natur weit verbreitet und hat sich auf Insektenlarven spezialisiert, die an Pflanzen parasitieren. Es produziert ein Eiweiß, das sogenannte Bt-Toxin, das für einige parasitische Insektenlarven giftig ist, andere Lebewesen jedoch nicht schädigt. Wegen dieser spezifischen Wirkung werden Bt-Präparate im biologischen Pflanzenschutz eingesetzt. Da das Bt-Toxin aber rasch abgebaut und unwirksam wird, ist der richtige Zeitpunkt für die Behandlung oft nur schwer abzupassen. So lag der Gedanke nahe, die Pflanzen selbst mit dem Gen auszustatten, das für das Bt-Toxin zuständig ist. Tatsächlich hat man es isoliert und mit gentechnischen Verfahren in Nutzpflanzen wie den Mais eingeführt. Diese bilden nun selbst den Wirkstoff in Blättern und Stängeln und schützen sich so vor dem Raupenfraß. Durch die geschickte Wahl eines Genschalters lässt sich die Produktion des Bt-Toxins zudem auf die Teile der Pflanze beschränken, von denen sich der Schädling üblicherweise ernährt.

Seit 1998 die ersten Pflanzen mit der neu erworbenen Resistenz für den Anbau zugelassen wurden, werden Bt-resistente Pflanzen – vor allem Baumwolle und Mais – weltweit auf vielen Millionen Hektar angebaut. Dabei zeigen die so geschützten Pflanzen weitere Vorteile gegenüber ihren Artgenossen: Sie werden zum Beispiel seltener von Sekundärparasiten befallen, welche die Fraßstellen der Insektenlarven als Eintrittspforten in die Pflanze nutzen. Bt-Mais beispielsweise wird unter natürlichen Bedingungen weniger mit Fusarium-Pilzen befallen, die für Menschen hochgiftige Mykotoxine produzieren. Dies führt zu einer geringeren Toxinbelastung des Maisfutters – und reduziert damit auch die Belastung tierischer Produkte mit diesen Substanzen.

Larve des Maiszünslers im Stängel einer Maispflanze (oben) sowie erwachsener Falter (unten)

Weltweit wird zudem mit Hochdruck daran gearbeitet, Pflanzen widerstandsfähiger gegen abiotischen Stress zu machen, auf dass sie auch an ungünstigeren Standorten gedeihen können. Denn in vielen Regionen der Erde erschweren widrige Umweltbedingungen wie Trockenheit oder salzige Böden den Anbau von Kulturpflanzen erheblich oder verhindern ihn ganz. Schon die konventionelle Pflanzenzüchtung war durchaus erfolgreich beim Schaffen stresstoleranter Sorten.

Nun eröffnet die Gentechnik völlig neuartige Möglichkeiten, solche Toleranzen zu erzeugen. Dazu muss man freilich zunächst verstehen, wie es bestimmten Pflanzen gelingt, sich extremen Bedingungen anzupassen. Warum überleben manche Pflanzen zum Beispiel selbst dann, wenn sie zwischendurch fast vollständig austrocknen? Aus der Tatsache, dass solche Pflanzen während des Austrocknens deutlich mehr Zucker bilden, schließt man, dass dieser Zucker eine Schutzfunktion in der Pflanzenzelle übernimmt. Erkenntnisse über die dafür zuständigen Gene, so hofft man, könnten schließlich zu Kulturpflanzen führen, die auch in trockenen Gebieten gedeihen.

Eine denkbare Strategie besteht zudem darin, Stress zu vermeiden. So kann eine Pflanze beispielsweise dem Trockenstress dadurch entgehen, dass ihre Samen oder Früchte frühzeitig reifen. Die Beschleunigung der Reife ist deshalb eines der Themen, das die Wissenschaft bewegt. Hier kommen nicht zuletzt durch den Klimawandel neue Herausforderungen auf die Pflanzenzüchtung zu, bei deren Bewältigung auch gentechnische Verfahren einen Beitrag leisten können.

Während die Gentechnik bei der Resistenz gegen Schadinsekten und Viren schon bedeutende Erfolge zu verzeichnen hat, haben sich die hohen Erwartungen, die man an die Erzeugung von Resistenzen gegenüber Pilzen oder abiotischem Stress knüpfte, bislang nicht erfüllt. Das liegt vor allem daran, dass die Wechselwirkungen zwischen diesen Stressfaktoren und den Pflanzen sehr komplex sind. Dies ist ein Forschungsfeld, dem sich Grundlagenforscher in vielen Ländern der Erde intensiv widmen. Sie untersuchen unter anderem mit Hilfe gentechnischer Verfahren komplexe Beziehungen zwischen Wirt und Pathogenen oder pflanzliche Abwehrmechanismen gegen Viren, Pilze und Insekten. Kürzlich wurden bedeutsame Fortschritte bei der gentechnischen Verbesserung der Trockenheitstoleranz beschrieben, die einen universell einsetzbaren Mechanismus – ähnlich wie bei *Bacillus thuringiensis* – vermuten lassen. Die starken Aktivitäten zur Verbesserung der Stresstoleranz, die weltweit unternommen werden, spiegeln sich nicht zuletzt in zahlreichen Freilandversuchen mit gentechnisch veränderten Pflanzen wider.

Ackerbau in den Trockenzonen der Erde, wie hier in Mali, ist bis heute ein extrem mühsames Geschäft

Toleranz gegen Herbizide

– oder: Befreit von aller Konkurrenz

Kulturpflanzen brauchen Unterstützung. Denn Wildformen erweisen sich vielfach als konkurrenzstärker, bedrängen oder überwuchern die ertragreichen Sorten auf den Feldern. Solch ungeliebte Konkurrenz bekämpfen die Landwirte heute in der Regel mit Herbiziden, die häufig jedoch nicht nur die unerwünschten Gräser und Kräuter, sondern auch die Kulturpflanzen schädigen. Dies gilt besonders für einige relativ schnell abbaubare und damit vergleichsweise umweltverträgliche Wirkstoffe, die als sogenannte Totalherbizide zentrale Stoffwechselwege aller Pflanzen blockieren. So ist man auf den Gedanken gekommen, Kulturpflanzen ganz gezielt gegen diese Wirkstoffe tolerant zu machen. Dann nämlich kann man die Äcker flächendeckend mit einem nichtselektiven Herbizid behandeln, dem nur die gentechnisch veränderten Pflanzen widerstehen.

Toleranz gegenüber Herbiziden lässt sich auf zweierlei Weise erzielen. Eine Strategie nutzt den Weg der Entgiftung, indem das eingesetzte Herbizid im Stoffwechsel der Pflanze in einen ungiftigen Metaboliten überführt und die Pflanze so geschützt wird. Die zweite setzt hingegen auf ein geeignetes Enzym, das nach der Genübertragung eben jenen Schritt im Stoffwechsel übernimmt, der durch das Herbizid gehemmt wird. Der erste Weg wird beispielsweise bei der Entgiftung des Wirkstoffs Glufosinat beschritten. Glufosinat, enthalten in einem Totalherbizid mit dem Handelsnamen Basta, bewirkt die Hemmung eines Schlüsselenzyms der Pflanzen, der Glutamin-Synthetase, die im pflanzlichen Stickstoff-Stoffwechsel für die Glutaminsynthese und Entgiftung von Ammoniak zuständig ist. Wird diese Entgiftung unterbrochen oder gehemmt, erleiden die Zellen massive Schäden und die Pflanze stirbt ab. In der Natur wird Glufosinat von dem Bodenbakterium *Streptomyces spec.* gebildet, das zu seinem eigenen Schutz auch das sogenannte PAT-Enzym (Phosphinothricin-N-Acetyl-Transferase) produziert, das den Wirkstoff sehr spezifisch in eine biologisch unwirksame Form überführt. Führt man das dafür zuständige Gen in Pflanzen ein, verleiht es auch ihnen eine zuverlässige Resistenz gegen Glufosinat.

Der zweite Weg wird genutzt, um Nutzpflanzen tolerant gegenüber dem Totalherbizid Glyphosat zu machen. Glyphosat, der Wirkstoff des Herbizids Roundup, wird vor allem über die Blätter aufgenommen und in Spross und Wurzel verteilt. Glyphosat hemmt ein Enzym, die EPSP-Synthase (5-Enolpyruvylshikimat-3-phosphat-Synthase), dem bei Pflanzen eine Schlüsselfunktion für die Synthese aromatischer Aminosäuren zukommt. Können diese lebenswichtigen Aminosäuren nicht gebildet werden, stellt die Pflanze das Wachstum ein und stirbt schließlich ab. Verglichen mit vielen anderen Herbiziden gilt Glyphosat als umweltfreundlich: Es ist biologisch relativ schnell abbaubar und für Mensch und Tier nicht toxisch, weil diese den betroffenen Syntheseweg, den sogenannten Shikimatweg, gar nicht besitzen.

Inzwischen gibt es eine ganze Reihe von Nutzpflanzen mit einer gentechnisch vermittelten Toleranz gegenüber dem Wirkstoff Glyphosat, unter

anderem Zuckerrüben, Raps, Soja, Baumwolle und Mais. Sie alle enthalten ein Gen aus dem weit verbreiteten Bakterium *Agrobacterium tumefaciens*, das den Bauplan für eine leicht abgewandelte EPSP-Synthase bereitstellt. Dieses bakterielle Enzym ist gegenüber Glyphosat unempfindlich, kann aber im Stoffwechsel die Funktion des pflanzlichen Enzyms übernehmen, sodass die gentechnisch veränderten Pflanzen eine Behandlung mit Glyphosat ohne größeren Schaden überstehen. Das System – „Roundup Ready“ genannt – hat sich im Markt rasch durchgesetzt.

Überhaupt haben herbizidtolerante Kulturpflanzen die Äcker schnell erobert, seit im Jahr 1995 die ersten von ihnen auf den Markt kamen. Begonnen hatte es mit Raps, der gegen Glufosinat resistent ist, und Baumwolle, die eine Behandlung mit dem Herbizid Bromoxynil unbeschadet übersteht. Von weltweit 125 Millionen Hektar, auf denen 2008 gentechnisch modifizierte Nutzpflanzen angebaut wurden, waren mehr als 75 Millionen Hektar mit herbizidtoleranten Pflanzen besetzt. Die Toleranz gegen Herbizide ist die mit Abstand häufigste Eigenschaft gentechnisch veränderter Pflanzen.

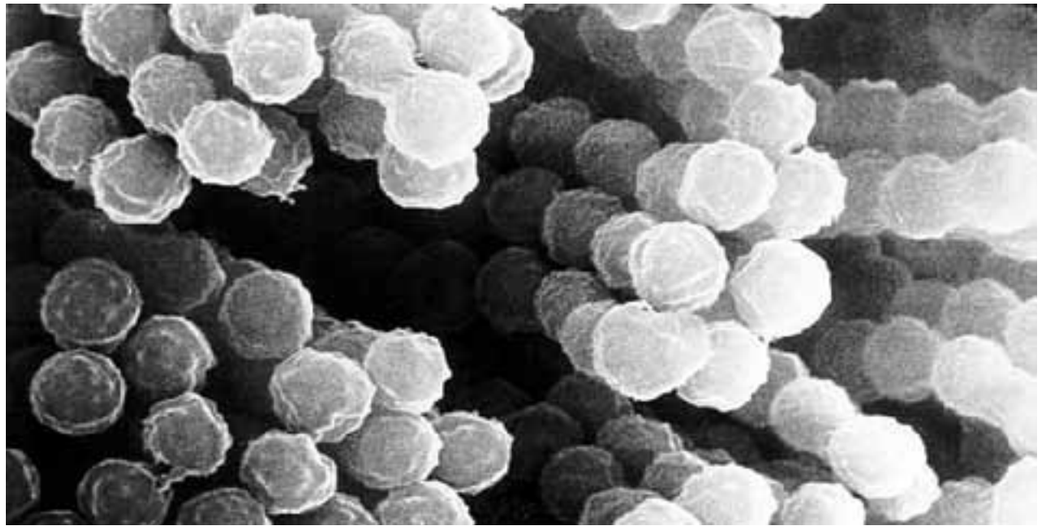
Qualität pflanzlicher Nahrungs- und Futtermittel

– oder: Auf den Inhalt kommt es an

Geschmack allein ist nicht entscheidend. Die eigentliche Qualität von Nahrungsmitteln und Futter wird vielmehr durch ihre Inhaltsstoffe bestimmt, durch ihre Zusammensetzung und ihre Verfügbarkeit. Erwünschte und unerwünschte Stoffe verdienen dabei gleichermaßen Beachtung.

Missliebige Substanzen sind durchaus verbreitet. Zu ihnen zählen etwa Glykoalkaloide wie die Bitterstoffe Solanin und Chaconin, die in Kartoffelknollen von Natur aus in geringen Mengen vorkommen. Bei unsachgemäßer Lagerung, zum Beispiel im Licht, können diese Substanzen in größerer Menge gebildet werden und toxische Konzentrationen erreichen. Deshalb wird vor dem Verzehr grüner Kartoffeln gewarnt – wobei die grüne Färbung nicht auf die Glykoalkaloide zurückgeht, sondern auf Chlorophyll, das ebenfalls im Licht gebildet wird. Mit Hilfe gentechnischer Verfahren lässt sich nun die Expression der Solanidin-Glykosyltransferase, also eines der Enzyme, die für die Synthese der Bitterstoffe zuständig sind, hemmen und damit die Bildung der Stoffe unterbinden.

Ohne Zweifel gehören auch die Giftstoffe von Pilzen, die schon bei der Herstellung oder während der Lagerung in Futter- oder Lebensmittel gelangen, zu den unliebsamen Inhaltsstoffen. Prominente Beispiele sind die von Schimmelpilzen der Gattung Aspergillus produzierten Aflatoxine sowie die durch Fusarien gebildeten Fumonisine. Sie stehen im Verdacht kanzerogen zu sein und auch embyronale Fehlentwicklungen bei der Schweinemast auszulösen. Auch hier können gentechnische Verfahren Abhilfe schaffen – durch Einführung von Genen, die für die Synthese pilzabwehrender Proteine oder toxinabbauender Enzyme zuständig sind. Da Pilzinfektionen häufig



Der Schimmelpilz der Gattung Aspergillus produziert gesundheitsschädliche Aflatoxine

durch Insektenbefall begünstigt werden, können Strategien zur Insektenabwehr die Toxinbelastung von Futter- und Lebensmitteln ebenfalls reduzieren. Ein gutes Beispiel hierfür sind die schon erwähnten transgenen Maispflanzen, die dank ihrer Fähigkeit, sich mit Bt-Toxinen gegen Verletzungen durch gefräßige Raupen zu schützen, signifikant weniger Fumonisine als ihre konventionellen Verwandten enthalten (vgl. S. 41 ff.).

Zu den willkommenen Substanzen, die Mensch und Tier stets in ausreichender Menge zu sich nehmen sollten, rechnen Vitamine, Antioxidantien oder essenzielle Fettsäuren. Um ihren Gehalt in Lebensmitteln und Futter optimieren zu können, muss man ihre ernährungsphysiologische Bedeutung ebenso gut kennen wie die Stoffwechselwege innerhalb der Pflanzenzellen, die zu ihrer Synthese führen. Beeinflussen lassen sich diese Prozesse dann nicht nur durch die Herstellung transgener Pflanzen, sondern auch durch die markergestützte Züchtung. Dabei spürt man mit molekularbiologischen Verfahren nützliche Gene oder Allele auf, die gezielt in Kultursorten eingekreuzt werden. Die Nachkommen, die die nützlichen Gene erhalten haben, lassen sich mit Hilfe der Molekularbiologie schon in ganz frühen Stadien identifizieren, lange bevor die gewünschte Eigenschaft sichtbar wird (vgl. S. 24 f.). Damit lässt sich die Züchtung immens beschleunigen. Sind die gewünschten genetischen Eigenschaften nicht im Genpool der bearbeiteten Nutzpflanzen verfügbar, kann der Stoffwechsel der Pflanzen durch Einschleusen fremder Gene verändert werden.

Solche Ansätze, in die Stoffwechselflüsse der Zellen einzugreifen, werden mit dem Begriff „Metabolic Engineering“ zusammengefasst. Dabei beeinflusst man in erster Linie die Aktivitäten von Genen, die für die Synthese der erwünschten oder für den Abbau der unerwünschten Substanzen verantwortlich sind. Dies kann zum einen durch Überexpression oder Hemmung der einzelnen Strukturgene geschehen, zum anderen durch Manipulation sogenannter Genschalter oder Transkriptionsfaktoren, die ganze Stoffwechselketten regulieren.

Die Manipulation von Genschaltern erwies sich beispielsweise als besonders geeignet, um in Äpfeln und Tomaten den Gehalt an Anthozyanen zu erhöhen. Anthozyane wirken als Antioxidantien, die freie Radikale entgiften und auf diese Weise die Gesundheit fördern. Alle Gene, die an der komplexen Biosynthese der Anthozyane beteiligt sind, werden durch die Aktivität von zwei Genschaltern reguliert, die zwar in jeder Pflanze vorkommen, aber nicht in allen Zellen und zu allen Zeiten aktiv werden. Meist reichern sich Anthozyane deshalb vorwiegend in der Epidermis an, wo sie die Pflanze vor zu großer Sonneneinstrahlung schützen. Relativ einfache Mutationen können dies ändern, sodass sich Anthozyane dann auch in weiteren Zelltypen sammeln. Auf diesem Wissen aufbauend haben neuseeländische Wissenschaftler aus weißfleischigen Äpfeln rotfleischige Äpfel mit hohen Gehalten an Antioxidantien gezüchtet.

Es kommt freilich nicht nur auf das Vorkommen, sondern vor allem auf die biologische Verfügbarkeit der pflanzlichen Inhaltsstoffe an. Ein Beispiel hierfür ist die Phosphatverfügbarkeit im Getreide bei der Geflügelmast. Im Korn ist Phosphat vor allem in Phytaten gespeichert, die von Geflügel nicht abgebaut und daher unverdaut ausgeschieden werden. Hieraus resultiert ein doppeltes Problem: Dem Futter muss zusätzlich Phosphat beigemischt werden, und die phosphathaltigen Exkremente belasten die Umwelt. Phytat hat indes noch weitere unerwünschte Eigenschaften: Es bindet auch andere Mineralstoffe wie Calcium, Eisen, Magnesium und Zink in schwerlöslichen Komplexen. Abhilfe bietet die Phytase, ein Enzym, das die im Phytat gespeicherten Phosphate freisetzen und damit bioverfügbar machen kann. Nur durch den Zusatz von Phytase kann sowohl der Phosphat- und Mineralstoffmangel als auch der hohe Phosphatanteil im Kot reduziert werden. Das Enzym wird in der Regel durch den gentechnisch veränderten Schimmelpilz *Aspergillus niger* hergestellt. Das zuständige Gen aus Aspergillus wurde aber auch schon in unterschiedliche Futterpflanzen wie Reis, Raps, Sojabohne und Luzerne eingeführt. Fütterungsstudien zeigen, dass dadurch die Verfügbarkeit von Phosphat und Mineralien aus dem Futter deutlich erhöht wurde.

Auf Pflanzenzüchtung und Gentechnik setzt man schließlich auch mit Blick auf eine andere Sorte leidiger Substanzen: Eine steigende Zahl von

Hoffnungsträger „Goldener Reis“

Das wohl bekannteste Beispiel für Eingriffe in den Stoffwechsel von Pflanzen ist der „Golden Rice“. Er soll nach dem Willen seiner Entwickler dazu beitragen, in Entwicklungsländern den weit verbreiteten Mangel an Vitamin A zu bekämpfen, der das Immunsystem schwächt, für erhöhte Sterblichkeit bei Kleinkindern verantwortlich gemacht wird und Augenleiden bis zur Erblindung hervorruft.

Seine namensgebende Farbe erhält der „Goldene Reis“ durch die Anreicherung von beta-Carotin, einer Vorstufe des Vitamin A, im Nährgewebe der Reiskörner. Erreicht wurde dies durch simultane Ausprägung dreier Stoffwechselgene, die benötigt werden um Lycopen – eine Vorstufe des beta-Carotins – zu bilden. Die Pflanzen der ersten Generation „Golden Rice“ enthielten Gene aus der Osterglocke und aus dem Bakterium *Erwinia uredovora*. Mit etwa 1,6 µg/g war ihr Gehalt an beta-Carotin (Provitamin A) allerdings noch nicht überzeugend.

Bei der Suche nach den Gründen für die nur geringe Anreicherung erkannte man, dass eines der verwendeten Enzyme, die Phytoensynthase, die Geschwindigkeit des Carotin-Stoffwechsels bestimmt. Als das Enzym aus Osterglocken gegen ein aktiveres aus Mais ausgetauscht wurde, erhöhte sich der Carotingehalt der Reiskörner auf mehr als das zwanzigfache, nämlich auf rund 37 µg/g. Das reicht bei einem Verzehr von etwa 70 g Golden Rice am Tag, um etwa die Hälfte des Bedarfs an Vitamin A zu decken.

Menschen reagiert allergisch auf Pollen oder pflanzliche Nahrungsmittel. Ihr Immunsystem antwortet auf bestimmte Proteine mit einer überschießenden Abwehrreaktion, die entzündliche Prozesse an Schleimhäuten, Atemwegen oder im Magen-Darm-Trakt auslöst. In akuten Fällen sind diese Reaktionen lebensbedrohlich und können nur durch Vermeidung des auslösenden Agens verhindert werden. Die Betroffenen müssen deshalb massive Beeinträchtigungen ihrer Lebensqualität hinnehmen und haben zudem nur begrenzten Zugang zu natürlichen Vitamin-Quellen.

Mit Hilfe molekularbiologischer Techniken hat man inzwischen jedoch viele Allergene identifiziert. So kann man nun versuchen, ihre Produktion in den Pflanzen zu unterbinden, etwa durch Auslösung von Mutationen oder durch Antisense-Techniken. Dieser recht einfache Weg lässt sich allerdings nur dann beschreiten, wenn die Allergene keine essenziellen Funktionen innerhalb der Pflanze innehaben. Werden Allergene mit essenziellen Funktionen in der Zelle unterdrückt, sind Ertragsverluste die Folge. Dann versucht man stattdessen, die betreffenden Proteine durch Varianten zu ersetzen, die keine Allergien auslösen. Noch ist die Erzeugung von Pflanzen mit geringerem Allergengehalt eine ganz junge Richtung der Züchtungsforschung. Sie könnte jedoch entscheidend zur Verbesserung der Lebensmittelqualität beitragen. Dafür müssen allerdings noch einige Fragen gelöst werden. Dabei geht es unter anderem um die Stabilität der Hemmung oder um das simultane Ausschalten mehrerer Allergene in einem Lebensmittel, das nötig ist, weil Allergien in der Regel mehr als ein Protein in Nahrungsmitteln betreffen und Erfolge sich nur einstellen können, wenn alle allergenen Stoffe eliminiert werden.

Pharmazeutisch relevante Inhaltsstoffe

– oder: Hightech im Heilkraut

Arzneimittel aus Pflanzen haben wahrhaft Tradition. Wurden medizinisch wirksame Substanzen doch die längste Zeit der Menschheitsgeschichte ausschließlich aus Pflanzen gewonnen – erst gegen Ende des 19. Jahrhunderts begann der Siegeszug der organisch-synthetischen Wirkstoffe. Heute versucht man, Pflanzen auf neuartige Weise wieder als Apotheke zu nutzen, indem man sie mit gentechnischen Verfahren dazu anregt, pharmazeutisch nutzbare Proteine zu produzieren. Humane Serumproteine zum Beispiel zählen dazu, Wachstumsregulatoren, Antikörper und auch Impfstoffe. Es ist ein Thema mit Konjunktur: Die Zahl der wissenschaftlichen Veröffentlichungen über Impfstoffe aus Pflanzen ist seit Beginn des neuen Jahrtausends geradezu exponentiell gewachsen. Essbare Impfstoffe sind ein Ziel – insbesondere für Menschen in den Entwicklungsländern.

Tatsächlich besitzen Pflanzen gegenüber anderen biotechnischen Herstellungswegen, etwa mit Hilfe von Mikroorganismen oder Insektenzellen, eine Reihe ökonomischer und qualitativer Vorteile: Pflanzen sind in der Lage, organische Biomasse allein unter Nutzung von Sonnenenergie und anorganischen Substanzen zu bilden. Die Kosten für die Produktion der erwünschten Proteine bleiben deshalb gering. Zudem kann man bereits

verfügbare Verfahren der Kultivierung, Ernte und Lagerung nutzen und die Produktion flexibel an den Bedarf anpassen. Die Eiweißstoffe höherer Lebewesen werden in Pflanzen nicht nur korrekt synthetisiert, sondern auch in der richtigen Art und Weise gefaltet. Die Gefahr der Kontamination mit humanen Pathogenen oder Onkogenen kann ausgeschlossen werden. Und nicht zuletzt würde eine direkte Verwendung transgener Pflanzen als essbare Vakzine nicht nur die Verarbeitungskosten senken, sondern auch eine Impfung ohne Injektion ermöglichen und so die Gefahr von Infektionen minimieren.

Wasserlinsen als potenzielle Arzneimittelfabriken der Zukunft

Essbare Impfstoffe pflanzlicher Herkunft müssen jedoch eine Reihe von Bedingungen erfüllen: Der Wirkstoff, das Antigen, muss in ausreichender Menge vorhanden sein und darf nicht schon im Magen-Darm-Trakt abgebaut oder zerstört werden. Für die Virus-Prophylaxe muss eine geeignete Immunantwort ausgelöst werden, die in der Lage ist, infektiöse Virionen zu neutralisieren; und schließlich muss der Impfstoff standardisierbar und stabil sein. Oral aufgenommene Antigene lösen als Bestandteile unserer Nahrung in der Regel keine Immunantwort aus. Eine Ausnahme bilden bestimmte partikuläre Antigene, beispielsweise Virionen, die von sogenannten M-Zellen im Darmepithel erkannt werden. Diese Antigene werden gezielt aufgenommen und an Antigen-präsentierende Zellen weitergegeben, sodass sie eine Immunantwort auslösen.

Erste Erfolge gibt es derweil: In jüngster Zeit konnte für eine Reihe unterschiedlicher Antigene – etwa das Hepatitis-B-Virus-Oberflächenantigen, das Norwalkvirus Kapsidprotein oder das Choleratoxin – gezeigt werden, dass sie sich nicht nur in Pflanzen herstellen lassen, sondern dass der Verzehr des transgenen Pflanzenmaterials auch eine Antwort des Immunsystems hervorruft. Dabei geht man davon aus, dass die pflanzliche Zellwand die Proteine vor dem Abbau im Magen-Darm-Trakt schützt.

Als eine der wichtigsten Herausforderungen gilt es nun, die Menge an produziertem Protein deutlich zu erhöhen. Für eine wirtschaftlich sinnvolle Nutzung, so schätzt man, müsste das erwünschte Protein mehr als ein Prozent der löslichen Proteine

Von der heilenden Kraft der Pflanzen hat die Menschheit seit jeher profitiert – Handschrift aus dem 15. Jahrhundert

ausmachen. Bei der Bildung von gentechnisch hergestellten Antikörpern in Pflanzen wird dieses Niveau oft schon erreicht, die Anteile von Vakzinen indes liegen oft noch deutlich unterhalb dieses Wertes. Durch einfache Verarbeitungsschritte wie Homogenisierung und Gefriertrocknung lässt sich eine Konzentration des Antigens erreichen – vorausgesetzt, der Wirkstoff kann in getrockneter Form verabreicht werden. Um höhere Ausbeuten zu erlangen, müssen sowohl die Effizienz der Expression als auch die Stabilität der Proteine verbessert werden. Dazu sind verschiedene Strategien denkbar. Letztlich gibt es jedoch keine allgemeingültigen Regeln für die Expressionssteigerung in Pflanzen. Vielmehr muss der Weg für jedes Protein und jede Wirtspflanze aufs Neue optimiert werden.

Unter Ausnutzung unterschiedlicher Systeme werden derzeit Strategien zur Produktion von „plant made pharmaceuticals“ für viele wesentliche menschliche Erkrankungen erprobt. Für eine Reihe dieser Substanzen werden Wirksamkeit und Sicherheit bereits in klinischen Studien der Phase 1 und 2 untersucht. Hergestellt werden die Wirkstoffe vor allem in Tabak, Mais, Kartoffeln, Reis

Blühendes Kartoffelfeld

und Wasserlinsen. Hinzu kommen Ansätze zur Proteinherstellung in Moosen, die sich derzeit in der Entwicklung befinden. Dabei setzt man vermehrt auf Fermentiertechniken und deren hohen Sicherheitsstandard. Insgesamt ist die Anbaufläche im Freiland mit einigen Hundert Hektar jedoch sehr gering. Die Sicherheitsanforderungen bei der Erzeugung von pharmazeutisch nutzbaren Wirkstoffen in Pflanzen – sei es mit transgenen oder mit konventionellen Sorten – müssen auch mögliche unerwünschten Effekte von Wirkstoffen einbeziehen, die im Agrarökosystem verbleiben. Das betrifft vor allem den Nachbau gleichartiger Pflanzen für die Erzeugung von Nahrungsmitteln und Futter.

Nachwachsende Rohstoffe

– oder: Plastik frisch vom Feld?

Das Vertrauen in die Fähigkeiten von Pflanzen scheint grenzenlos. Nachwachsende Rohstoffe – das klingt mit Blick auf steigende Energiepreise, endliche Ressourcen und den erwarteten Klimawandel mitunter fast wie ein Zauberwort. Pflanzliche Produkte zur energetischen und stofflichen Nutzung rücken in den Fokus von Politik und Öffentlichkeit, der noch vor nicht allzu langer Zeit vor allem die Stilllegung landwirtschaftlicher Nutzflächen am Herzen zu liegen schien. Nach dem Willen der Europäischen Kommission sollen

im Jahr 2020 zwanzig Prozent des Energiebedarfs aus erneuerbaren Energien stammen, zehn Prozent des Kraftstoffverbrauchs sollen dann durch sogenannte Biokraftstoffe gedeckt werden. Dieses Ziel lässt sich in Europa mit herkömmlichen Pflanzen allerdings nur auf Kosten der Produktion von Pflanzen zur Nahrungs- und Futtermittelproduktion erreichen.

Angesichts der Tatsache, dass die weltweit wichtigsten Nahrungsmittelexporteure USA, Kanada und Brasilien ebenfalls anstreben, ihr Erntegut – größtenteils Mais und Zuckerrohr – verstärkt zur Energiegewinnung einzusetzen, ist eine weltweite Verknappung des Nahrungsmittelangebots zu befürchten. Erste Vorboten dieser Entwicklung waren im Jahr 2007 die drastisch gestiegenen Lebensmittelpreise. Gleichzeitig verändern sich die Konsumgewohnheiten überall auf der Erde, indem immer mehr tierische Produkte konsumiert werden. Dies bedeutet eine zusätzliche Konkurrenz um Ackerflächen, weil Pflanzen verstärkt als Futtermittel eingesetzt werden.

Die Pflanzenproduktion steht damit vor der Aufgabe, die vorhandenen landwirtschaftlichen Flächen intensiver zu nutzen, ohne dadurch ökologische Probleme zu erzeugen. Durch die Erhöhung des Ertragspotenzials unserer gängigen Energielieferanten Mais, Raps und Weizen kann sie dazu einen wichtigen Beitrag leisten. Zugleich müssen jedoch Möglichkeiten für eine ökologisch und ökonomisch sinnvolle Fruchtfolge geschaffen und das Potenzial anderer wichtiger Kulturarten wie Zuckerrübe, Roggen, Gerste, Triticale oder Kartoffel zur Produktion nachwachsender Rohstoffe verbessert werden. Ein wichtiges Hilfsmittel kann hier die Grüne Gentechnik sein, die es erlaubt, jene Gene, mit denen sich diese Zuchtziele erreichen lassen, schneller und gezielt in züchterisch interessante Sorten einzubringen.

Pflanzen können aber nicht nur dazu beitragen, fossile Energieträger zu ersetzen, sie sind auch in der Lage, interessante Substanzen für die stoffliche Nutzung zu liefern. Bislang wird die pflanzliche Produktion von Ölen, Stärke oder anderen Inhaltsstoffen allerdings durch die hohen Kosten der Reinigung und den geringen Anteil des Wertstoffs an der Biomasse begrenzt. Wenn es sich um Stoffe handelt, die schon in der Kulturpflanze oder einem kreuzbaren Verwandten vorkommen, lässt sich ihr Gehalt mit Hilfe konventioneller Züchtungsverfahren steigern. Die Gentechnik macht es zudem möglich, in Pflanzen Stoffe zu produzieren, die natürlicherweise nur in anderen, schwer kultivierbaren Pflanzenarten oder in Bakterien und Pilzen vorkommen.

Inzwischen konnte eine Reihe wertvoller Substanzen erfolgreich in transgenen Pflanzen hergestellt werden. Man strebt an, als erste transgene Pflanze zur Produktion nachwachsender Rohstoffe eine amylosearme Kartoffel auf den Markt zu bringen, deren Stärke für die Industrie von Interesse ist. Normalerweise besteht Kartoffelstärke aus zwei Komponenten mit sehr unterschiedlichen Eigenschaften: Amylose und Amylopektin. Für die menschliche Ernährung sind beide Bestandteile gleichwertig, für die industrielle Verarbeitung jedoch lassen sie sich gemeinsam nicht effektiv nutzen. Eine Trennung ist also unvermeidlich.

Bioplastik vom Acker?

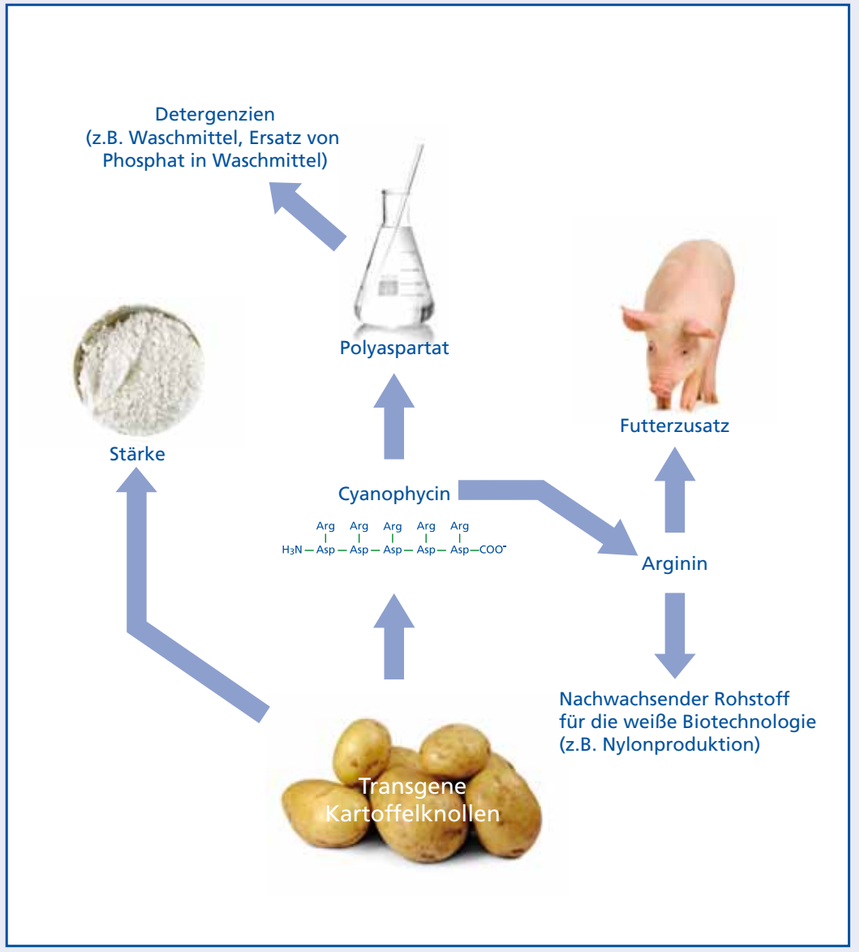
Das bekannteste Beispiel für einen potenziellen „Biokunststoff“ ist die Polyhydroxybuttersäure (PHB), die natürlicherweise im Bakterium *Ralstonia eutropha* vorkommt. Sie hat ähnliche Eigenschaften wie die Thermoplaste Polyethylen oder Polypropylen, ist im Gegensatz zu ihnen aber vollständig biologisch abbaubar. Inzwischen hat man drei Gene aus *Ralstonia eutropha* identifiziert, deren Expression abzweigend vom Primärstoffwechsel zur Synthese von PHB führt, und diese auf verschiedene Pflanzen übertragen. Während die Synthese von PHB im Cytoplasma Wachstum und Fruchtbarkeit der transgenen Pflanzen einschränkte, zeigte eine Synthese in den Plastiden keine negativen Auswirkungen. In den Sprossen von Tabakpflanzen etwa wurden bis zu 14 Prozent des Trockengewichts an PHB akkumuliert, dessen chemische Struktur mit der von den Bakterien produzierten Substanz übereinstimmt. Eine effiziente und umweltfreundliche Methode zur Extraktion des „Bioplastik“ gibt es allerdings noch nicht.

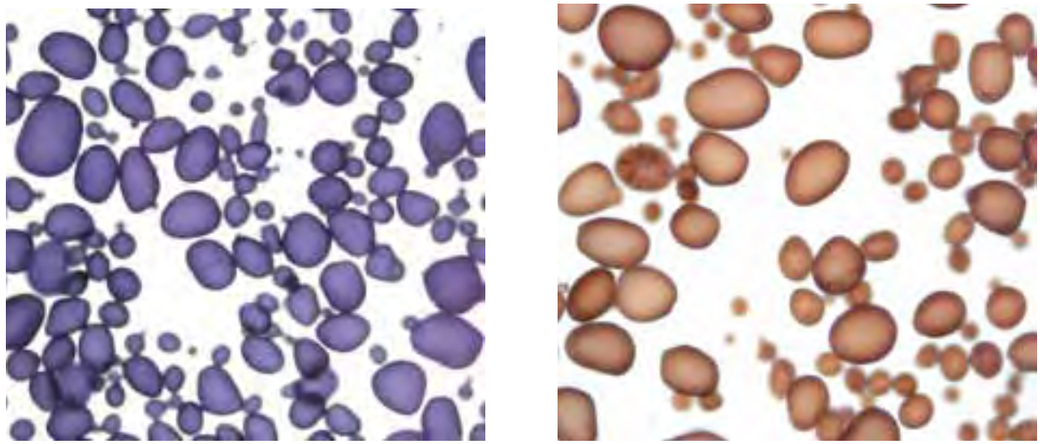
Für eine Vielzahl von Anwendungen eignet sich ein anderes Bio-Polymer, das Polyaspartat. Es lässt sich aus einem Polypeptid der Blaualgen gewinnen, aus deren Gruppe die Vorläufer der pflanzlichen Chloroplasten stammen. Blaualgen bilden das einfach strukturierte Speicherpeptid Cyanophycin, ein nicht-wasserlösliches Polymer aus den beiden Aminosäuren L-Aspartat und L-Arginin. Anders als bei PHB, für dessen Synthese drei Gene verantwortlich sind, ist dafür nur ein Gen zuständig.

Durch einen vergleichsweise einfachen chemischen Schritt, die partielle Hydrolyse des Cyanophycins, kann die Polyaspartatkette isoliert werden. Damit entsteht ein vollständig biologisch abbaubares, nicht toxisches Polymer, das in Industrie und Landwirtschaft vielfältig verwendbar ist: Polyaspartat kann unter anderem als Ersatzstoff für biologisch nicht abbaubare Polyacrylate in Detergentien, in der Ölproduktion oder als Dispersionsmittel in Wasch- und Reinigungsmitteln eingesetzt werden. Für die Umwelt wäre das ein erheblicher Gewinn – beträgt der weltweite Bedarf an den nicht abbaubaren Polyacrylaten derzeit doch 265 000 Tonnen pro Jahr. Chemisch synthetisiertes und daher nicht vollständig biologisch abbaubares Polyaspartat wird gegenwärtig in einem Maßstab von 3000 Tonnen pro Jahr produziert.

Auch in der Landwirtschaft leistet das Polyaspartat viele gute Dienste. Seine Applikation fördert zum Beispiel die Nährstoffaufnahme durch die Pflanzen und damit sowohl den Ertrag als auch die Ausnutzung von Düngemitteln – eine Anwendung, die der amerikanischen Herstellerfirma im Jahr 1996 den „Green Chemistry Challenge Award“ einbrachte. Cyanophycin besteht nicht nur aus Polyaspartat, sondern auch noch aus Arginin. Der Zusatz von großen Mengen Arginin zur Nahrung kann die Gesundheit von Tieren und Menschen verbessern, Arginin kann aber auch als Baustein für Materialien wie Nylon genutzt werden.

In ersten Experimenten konnte das Gen für die Synthese von Cyanophycin in transgenen Kartoffeln exprimiert werden. Durch einige Modifikationen ließ sich die Produktion bereits auf etwa sechs Prozent der Trockenmasse der Kartoffelpflanzen steigern, ohne dass die Pflanzen erkennbar beeinträchtigt wurden. Ähnlich wie beim PHB werden jedoch erst entsprechende Studien zeigen, ob sich das Produkt mit vertretbarem Aufwand und zu konkurrenzfähigen Preisen aus den transgenen Pflanzen gewinnen lässt.





Nachweis von Amylose in Stärkekörnern aus konventionellen (links) und amylosereduzierten Kartoffeln (rechts)

Dieser Prozess ist allerdings nicht nur aufwendig, sondern belastet auch die Umwelt. Daher bemühen sich Züchter seit Jahren um die Entwicklung von Kartoffeln, die nur einen der beiden Stärkebestandteile enthalten, vorzugsweise das Amylopektin, das als Rohstoff für Kleister und Bindemittel wirtschaftlich interessanter ist.

Durch den Einsatz der Antisense-Strategie ist es nun gelungen, die Bildung von Amylose in Kartoffeln drastisch zu vermindern: Ein Stärke-Synthetasegen, das an der Produktion von Amylose beteiligt ist, wird ausgeschaltet, indem man eine Kopie dieses Gens in umgekehrter Orientierung (Antisense) in eine zur Stärkeproduktion geeignete Kultursorte einführt. Dadurch stellen die transgenen Kartoffelknollen nur noch weniger als ein Fünftel der ursprünglichen Menge an Amylose her – das Amylopektin kann leichter gereinigt werden. Im Jahr 2009 wurde der Versuchsanbau der Sorte Amflora in Deutschland genehmigt.

Auch für die Produktion pflanzenfremder Rohstoffe in transgenen Pflanzen gibt es erste Beispiele. Noch befinden sich solche Vorhaben allerdings in der experimentellen Phase, ihre Kommerzialisierung ist nicht absehbar. Spinnseide beispielsweise kann von transgenen Tabak- und Kartoffelpflanzen produziert werden. Biologisch abbaubare und daher umweltfreundliche „Kunststoffe“, auch „Bioplastik“ genannt, lassen sich ebenfalls in transgenen Pflanzen herstellen – dank der Gene von Bakterien, die solche Biopolymere als Speichersubstanzen nutzen. Solche Biopolymere könnten den Wert einer Kulturpflanze erhöhen – vor allem, wenn sie ein Zusatzprodukt darstellen, das sich nach der Isolation bereits vorhandener Wertstoffe gewinnen lässt. Besonders interessant ist daher die Produktion in Industriekartoffeln, die zur Gewinnung von Stärke angebaut werden, in Deutschland immerhin auf etwa 70 000 Hektar. Die Wertstoffe sollen nach der Isolation der Stärke als Abfallprodukt in dem Rest anfallen, der sonst als Futtermittelzusatz genutzt wird, und deshalb keine zusätzlichen Kosten beim Anbau erzeugen. Voraussetzung für eine wirtschaftlich sinnvolle Nutzung ist allerdings, dass die Stärkegehalte der Kartoffeln nicht wesentlich reduziert und einfache und kostengünstige Isolationsverfahren für die Wertstoffe entwickelt werden.

Auch umweltfreundliche Alternativen zu vorhandenen Produkten werden sich nur durchsetzen, wenn sie kostengünstiger produziert werden können. Ein zusätzlicher Vorteil der Produktion solcher Wertstoffe in Industriekartoffeln ist die Trennung vom Lebensmittelmarkt und die hohe biologische Sicherheit dieser Art, die ausschließlich klonal vermehrt wird.

Die Produktion von Biopolymeren in Industrie- oder Biomasse-Pflanzen als zusätzlicher Wert könnte also den Anbau nachwachsender Rohstoffe wesentlich wirtschaftlicher machen und zugleich zu einer umweltfreundlicheren Produktion beitragen. Unumgänglich ist jedoch auch hier – wie bei pharmazeutischen Wirkstoffen aus Pflanzen – eine sorgsame Prüfung, ob solche innovativen Inhaltsstoffe unerwünschte Wirkungen haben können, wenn sie in Pflanzenresten auf dem Acker bleiben. Bei biologisch abbaubaren Polymeren erscheint dies jedoch wenig problematisch. Mit einer Markteinführung solcher Sorten ist wegen der umfangreichen Prüf- und Zulassungsverfahren erst in einigen Jahren zu rechnen.

Mögliche Auswirkungen auf Mensch und Umwelt

Die Menschheit wächst – und mit ihr wächst die Bedeutung des Ackerbaus. Denn den Hunger in der Welt zu besiegen, ist ohne Zweifel eine der großen und unumstrittenen Herausforderungen für die nahe Zukunft. Stärker noch als in vergangenen Epochen wird deshalb der nachhaltigen Pflanzenproduktion künftig weltweit eine zentrale Rolle zukommen. Angesichts einer konstanten, wenn nicht sogar rückläufigen globalen Anbaufläche und der Notwendigkeit, die Nahrungsmittelproduktion deutlich zu steigern, ist ein erheblicher Zuwachs der Flächenproduktivität unumgänglich – selbst wenn sich die Essgewohnheiten ändern und von veredelten zu pflanzlichen Produkten verschieben sollten. Hinzu kommt eine ernsthafte Konkurrenz durch die angestrebte stärkere Nutzung pflanzlicher Biomasse für die Gewinnung von Rohstoffen und Energie. Damit wachsen zugleich die Anforderungen an die Nachhaltigkeit der landwirtschaftlichen Produktion und die Erhaltung ihrer ökologischen Grundlagen.

Mögliche ökologische Vorteile

– oder: Biologie statt Chemie auf dem Acker

Die möglichen Vorteile der Grünen Gentechnik und ihrer Produkte für die Umwelt sind rasch benannt – zumal sie in den vorhergehenden Kapiteln immer wieder erwähnt oder beschrieben wurden. Sie beziehen sich sowohl auf die Bedingungen der landwirtschaftlichen Produktion als auch auf die dabei erzeugten Produkte, die vielfach gerade mit Blick auf die Schonung der Ressourcen und des ökologischen Gleichgewichts entwickelt werden.

Ein bedeutsamer Gewinn für die Umwelt bei der – ordnungsgemäßen – landwirtschaftlichen Produktion zeigt sich gerade bei den beiden bislang wichtigsten Formen gentechnisch induzierter Eigenschaften von landwirtschaftlichen Nutzpflanzen: der Insektenresistenz durch Gene aus *Bacillus thuringiensis* (Bt) (vgl. S. 41 ff.) und der Herbizidtoleranz (HT) (vgl. S. 44 f.). Beide können den Einsatz von „Chemie auf dem Acker“ im Vergleich zur herkömmlichen Produktionsweise deutlich verringern. Denn die Insektenresistenz transgener Pflanzen ermöglicht eine erhebliche Reduktion des Gebrauchs von Insektiziden, die Herbizidtoleranz den Einsatz vergleichsweise umweltschonender, relativ schnell abbaubarer Herbizide.

Mit Blick auf die Umwelt kann der Anbau herbizidtoleranter Pflanzen noch mit weiteren Vorzügen aufwarten: Da auf eine mechanische Bekämpfung unerwünschter Konkurrenzpflanzen verzichtet und damit weniger intensiv in den Boden eingegriffen wird, werden die Bodenorganismen geschont. Zugleich verbessert sich der

Feldversuch mit gentechnisch modifiziertem Mais in Großbritannien

Erosionsschutz vor allem in steileren Lagen, wenn nach der Herbizid-Behandlung die abgestorbenen Unkräuter an Ort und Stelle verbleiben, den Boden weiterhin bedecken und durch ihre Wurzeln stabilisieren. Da die Herbizide den transgenen Nutzpflanzen nichts anhaben können, lässt sich ihr Einsatz zudem auf ein Minimum beschränken, wenn man sie nicht mehr vorsorglich verwenden muss, sondern bedarfsgerecht handeln kann, die Mittel im Idealfall also erst und nur dann angewandt werden, wenn die Unkräuter eine bestimmte Schadensschwelle überschreiten. Diese Vorzüge sind durch weltweit mehr als 11 000 Feldversuche mit mehr als 80 transgenen Kulturen ebenso belegt wie durch die landwirtschaftliche Praxis, die inzwischen auf etwa 125 Millionen Hektar mit gentechnisch veränderten Pflanzen wirtschaftet. Die ökologischen Vorteile transgener Sorten sind prinzipieller Natur, denn diese Sorten ermöglichen Innovationen in der Pflanzenproduktion, die sich mit konventionellen Sorten nicht realisieren lassen.

Das bedeutet freilich nicht, dass diese Vorteile nicht durch unsachgemäße Handhabung in der Praxis teilweise oder gänzlich verloren gehen können. So kann etwa das Einsparungspotenzial für Herbizide beim Anbau herbizidtoleranter Sorten rasch geschmälert werden, wenn die komplementären Herbizide im Übermaß eingesetzt oder die Schadensschwellen nicht beachtet werden. Dies ist aber nicht ein immanentes Problem des Anbaus transgener Pflanzen, sondern eine Frage der Einhaltung der Regeln guter fachlicher Praxis, die in gleicher Weise berücksichtigt werden müssen wie im konventionellen Anbau. Mögliche ökologische Vorzüge beim Anbau transgener Pflanzen:

- Einsparung chemisch-synthetischer Pflanzenschutzmittel
- Schonung des Bodenlebens und Erosionsschutz durch weniger intensive Bodenbearbeitung oder Mulchwirtschaft
- Bedarfsgerechte und an Schadensschwellen orientierte Steuerung des Herbizideinsatzes im Nachauflaufverfahren
- Geringere Eingriffsintensität in das Agrarökosystem gemessen anhand ökotoxikologischer Indizes

Potenzielle Vorteile der Grünen Gentechnik für die Umwelt erwachsen indes nicht nur aus neuartigen Anbaumöglichkeiten, sondern auch aus den Produkten, die sich mit Hilfe transgener Pflanzen erzeugen lassen. Viele von ihnen werden ja gerade mit Blick auf einen behutsameren Umgang mit der Umwelt und den natürlichen Ressourcen entwickelt, die Rezepte dazu vielfach der Natur selbst abgeschaut. Der Anbau von Amylopektin-Kartoffeln oder die Erzeugung von „Bioplastik“ durch entsprechend modifizierte Pflanzen sind zwei der denkbaren Beispiele (vgl. S. 52 ff.). Wenn es durch intelligente Verfahren tatsächlich gelingt, Substanzen, die man bislang nur aus den endlichen fossilen Rohstoffen gewinnen oder mit hohem Energieeinsatz chemisch-synthetisch herstellen kann, künftig „auf sanfte Weise“ durch grüne Pflanzen produzieren zu lassen, dürfte dies der Umwelt in vielfacher Weise zugutekommen.

Mögliche ökologische Risiken

– oder: Berechtigte und überflüssige Sorgen

Weit häufiger als die möglichen Vorteile werden die möglichen Risiken transgener Pflanzen diskutiert. Die Tatsache, dass durch die Einführung eines fremden Gens Eiweißstoffe in den Pflanzen gebildet werden könnten, die diese sonst nicht produzieren können, macht eine sorgsame Untersuchung möglicher Beeinträchtigungen für Mensch, Tier und Umwelt unumgänglich. Gentechnisch veränderte Pflanzensorten werden daher in einem langwierigen und extrem aufwendigen Prozess geprüft und dann durch nationale und europäische Behörden bewertet. Erst wenn festgestellt wurde, dass die transgene Pflanze keine anderen Risiken für Mensch und Umwelt birgt als die bisher genutzte konventionelle Ausgangspflanze, kann sie auf Antrag europaweit in Verkehr gebracht werden. Diese Prüfungen gehen weit über das Maß dessen hinaus, was für die Anerkennung konventioneller Sorten üblich ist, und sind ähnlich streng und aufwendig wie die Prüfungen für die Zulassung von Pflanzenschutzmitteln und Arzneien.

Zu den wichtigsten potenziellen ökologischen Risiken transgener Pflanzen gehört deren Auskreuzungs- oder Überdauerungspotenzial im Ökosystem. Dabei muss man zwischen Naturräumen und der agrarischen Nutzfläche unterscheiden: Während die agrarische Nutzfläche der ständigen Kontrolle durch den Menschen unterliegt und daher einen Lebensraum für Kulturarten bietet, die von der Pflege des Menschen abhängig sind, können in Naturräumen nur Pflanzen überleben, die der Konkurrenz der dort angepassten Wildarten gewachsen sind. Die heimischen Kulturarten sind dazu in aller Regel nicht mehr in der Lage, da sie durch die gezielte züchterische Anpassung viele Eigenschaften wilder Pflanzen verloren haben und ihre Konkurrenzkraft nur noch gering ausgeprägt ist (vgl. S. 9 ff.). Ihr Erbgut kann jedoch auf zweierlei Weise in Naturräumen verbreitet werden: Zum einen kann der Pollen verwandte Wildformen bestäuben und so Nachkommen erzeugen. Dies wird als vertikaler Gentransfer bezeichnet und ist prinzipiell nichts Neues – viele unserer Kulturarten sind vielmehr zur Auskreuzung mit Wildformen befähigt. Zum anderen könnte freie DNA aus absterbenden Pflan-

Durch Kontrollparzellen in unterschiedlichen Abständen zu genetisch verändertem Mais lassen sich in Freilandversuchen Erkenntnisse zur Auskreuzung gewinnen

zenteilen von den Mikroorganismen des Bodens aufgenommen werden. Dies wird als horizontaler Gentransfer bezeichnet.

Auskreuzung oder vertikaler Gentransfer

Wie alle anderen möglichen ökologischen Risiken transgener Pflanzen hängen auch das Auskreuzungs- und Überdauerungspotenzial von der verwendeten Kulturart und von der neuen Eigenschaft ab: Für nicht heimische Kulturarten wie den Mais existieren in Europa keine kreuzbaren Wildformen, und die auf hohe Leistung gezüchteten Sorten können sich nicht außerhalb der Agrarfläche, also ohne Zutun des Menschen, ausbreiten. Ihr Auskreuzungspotenzial ist also gering. Dagegen sind heimische Arten wie der Raps wesentlich eher in der Lage, für gewisse Zeit auf nicht agrarischen Flächen wie Wegrändern Fuß zu fassen oder ihre Erbanlagen auf kreuzbare Wildformen zu übertragen. Wenn die Möglichkeit besteht, dass die Pflanzen sich in naturnahen Lebensräumen ausbreiten, ist auch das Überdauerungspotenzial der Kulturart auf der agrarischen Nutzfläche von Bedeutung. Die Samen von Raps zum Beispiel sind in der Lage, über mehrere Vegetationsperioden im Boden zu überdauern, sodass aus ihnen auch noch Jahre später Pflanzen heranwachsen und als Pollenspender dienen können.

Ob solche seit Bestehen dieser Arten vorhandenen Potenziale wirklich zur Verbreitung einer bestimmten Eigenschaft im Ökosystem führen, hängt wesentlich von der Eigenschaft selbst ab. Auch konventionelle Kulturpflanzen tragen Merkmale, die sie von Wildformen unterscheiden und die sie an diese weitergeben können. Die Tatsache, dass wir solche Eigenschaften dort nicht finden, ist darauf zurückzuführen, dass sie den Wildformen keinen ökologischen Vorteil bieten und sich evolutionär daher nicht durchsetzen können. Allerdings könnten neue Fähigkeiten – seien sie nun durch konventionelle Züchtung oder durch die Grüne Gentechnik in die Kulturart gelangt – auch evolutionäre Vorteile bieten und sich in einem naturnahen Ökosystem etablieren.

Ohne Zweifel entstehen hier durch die Gentechnik ganz neuartige Möglichkeiten, die weit über das hinausgehen, was in den Grenzen der bisher verfügbaren Erbanlagen denkbar war. Deshalb müssen die neuen Eigenschaften transgener Pflanzen besonders gründlich daraufhin überprüft werden, ob sie ökologische Vorteile erwarten lassen. Dies ist für Attribute wie Herbizidtoleranz außerhalb der Agrarfläche nicht der Fall, da dort keine Herbizide eingesetzt werden. Eine Insektenresistenz hingegen könnte durchaus Vorteile bieten – Fraßfeinde gibt es schließlich auch außerhalb der Äcker. In diesem Fall gilt es dann abzuwägen, ob die Insekten, die bekämpft werden sollen, auch die kreuzbaren Wildformen bedrohen, oder ob andere Insekten betroffen sein könnten. Um das Risiko einschätzen zu können, muss man also stets ganz individuell eine bestimmte Kulturart mit einem bestimmten Transgen in einer bestimmten

Für Kartoffelpflanzen sind hierzulande keine Wildformen bekannt, mit denen sie sich kreuzen könnten

Raps (links) hat verschiedene Verwandte in freier Natur, mit denen eine Kreuzung potenziell möglich ist, z.B. Rübsen (rechts)

Umgebung betrachten und beispielsweise auch überprüfen, ob in ihr kreuzbare Wildformen vorkommen, die zur gleichen Zeit blühen.

Auswirkungen auf andere Organismen

Insektenresistente Pflanzen sollen vor allem dazu beitragen, den Gebrauch von Insektiziden zu reduzieren, die häufig auch Nützlinge schädigen. Einen ökologischen Vorteil bieten solche Resistenzen also nur dann, wenn sie selektiv die Schädlinge treffen, die Nützlinge aber unbeeinträchtigt lassen. Dies gilt für transgene Sorten genauso wie für alle anderen insektenresistenten Pflanzen.

Ein Beispiel ist der Mais, der durch die Einführung eines Gens aus dem Bakterium *Bacillus thuringiensis (Bt)* gegen die gefräßigen Larven des Maiszünslers gerüstet ist (vgl. S. 41 ff.). Dank des übertragenen *Bt*-Gens bilden die transgenen Pflanzen ganz spezifisch das Bt-Protein, das wiederum nur für die Raupen des Maiszünslers toxisch wirkt, die am Mais fressen. Die Tatsache, dass dieses Bt-Protein im Wesentlichen nur diese Raupen schädigt, wird im ökologischen Landbau seit langem zur biologischen Schädlingsbekämpfung genutzt. Dennoch war zu prüfen, ob diese Eigenschaft auch in den transgenen Pflanzen erhalten bleibt.

Solche Biosicherheitsforschung wird seit mehr als einem Jahrzehnt vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) im Rahmenprogramm „Biotechnologie – Chancen nutzen und gestalten“ gefördert. In mehrjährigen Freilandversuchen wurde der transgene Mais (MON810) auf mehr als 24 Hektar in verschiedenen Parzellen angebaut und in je achtfacher Wiederholung mit mindestens drei konventionellen Maissorten verglichen sowie auf unerwünschte ökologische Effekte untersucht.

In drei Jahren hintereinander suchten die Forscher nach möglichen Effekten des von Bt-Mais gebildeten Proteins auf Organismen in der Krautschicht, in der Bodenoberfläche und im Boden. Zudem erkundeten sie mögliche Auswirkungen auf Mikroorganismen im Magen-Darm-Trakt von Bienen und das Rückstandsverhalten der Bt-Proteine im Boden. Effekte, die auf die genetische Veränderung im Mais MON810 zurückzuführen wären, konnten nicht nachgewiesen werden. Auch ein schädlicher Einfluss durch Anreicherung des Bt-Toxins im Boden war nicht festzustellen. Der gewünschte Effekt auf die Schadinsekten dagegen ließ sich erwartungsgemäß eindeutig und gut reproduzierbar nachweisen. Nach dem Stand der wissenschaftlichen Erkenntnis würden durch *Bt*-Gene geschützte Maissorten ideal in das Konzept eines integrierten und biologischen Pflanzenbaus passen. Denn anders als das Spritzen relativ breit wirksamer Insektizide zur Abwehr von Schädlingen wie Maiszünsler und Maiswurzelbohrer haben die untersuchten transgenen Maissorten keinen nachweisbaren negativen Einfluss auf die Lebensgemeinschaften im Maisfeld.

Ähnliche Analysen werden für alle transgenen Pflanzen durchgeführt, deren Zulassung auf dem europäischen Markt beantragt wird, aber auch für Pflanzen, die allein Forschungszwecken dienen. Dabei werden die möglichen Auswirkungen auf Bienen ebenso untersucht wie jene auf Blattläuse als Virusüberträger oder auf das Vorkommen nützlicher Mikroorganismen wie Bakterien und Pilze im Boden und auf der Pflanze. Signifikante Unterschiede zu konventionell erzeugten Pflanzen konnten bisher nicht festgestellt werden.

Horizontaler Gentransfer

Erbinformationen werden nicht nur bei der geschlechtlichen Fortpflanzung auf andere Organismen übertragen. Sie können durch den sogenannten horizontalen Gentransfer auch ungeschlechtlich auf nicht verwandte Arten übergehen. Diese Form des Gentransfers ist ein wichtiges Werkzeug der Evolution – ermöglicht sie doch die schnellere Nutzung eventuell vorteilhafter Eigenschaften anderer Organismen. Neben Viren, die ihre Erbinformation in das Genom des Wirts integrieren, nutzen Bakterien diesen Weg besonders häufig, denn sie sind in ihrer sich schnell wandelnden Umgebung besonders darauf angewiesen, sich ebenso schnell anzupassen. Ausschließlich durch zufällige Mutation und Selektion wäre dies kaum möglich. Daher haben Bakterien verschiedene Verfahren zum Austausch von Erbinformationen entwickelt: die Transformation (Aufnahme von DNA aus der Umgebung), die Transfektion (Aufnahme von DNA über Viren) und die Konjugation (Aufnahme von DNA aus einem Bakterium derselben oder einer anderen Art über eine Cytoplasmabrücke).

Die Herstellung transgener Pflanzen hat die Frage aufgeworfen, ob die neu in die Pflanze integrierten

Gene auf Bakterien übertragen und damit Teil des bakteriellen Genpools werden könnten. Von Bedeutung könnte dies zum einen im Wurzelraum der Pflanzen sein, in den pflanzliche DNA nach dem Absterben der Pflanzen gelangt und durch die Bindung an Silikate auch stabilisiert werden kann, zum anderen im Magen-Darm-Trakt von Säugetieren, in dem die Darmbakterien ständig mit DNA aus der Nahrung konfrontiert sind.

Etwa zwei Prozent der Bakterien sind natürlich kompetent, das heißt für DNA aufnahmebereit. Das Bodenbakterium *Acinetobacter* zum Beispiel ist unter Laborbedingungen in der Lage, pflanzliche Gene aufzunehmen und auch in sein Erbgut zu integrieren. Allerdings gelingt dies nur unter Bedingungen, die weder im Boden noch im Magen-Darm-Trakt vorliegen, und erfordert zudem homologe Sequenzen im Erbgut der Bakterien, die in der Regel ebenfalls nicht vorhanden sind. Außerdem müssten die Gene unter natürlichen Bedingungen einen Selektionsvorteil bieten, andernfalls würden sie bald wieder eliminiert und verloren gehen. Ein solcher Selektionsvorteil wurde experimentell mit der Nutzung eines Antibiotika-Resistenzgens erreicht. Ein Transfer direkt im Boden oder im Magen-Darm-Trakt von Versuchstieren konnte bisher jedoch nicht gezeigt werden.

Der horizontale Gentransfer unter Beteiligung von Transgenen aus gentechnisch veränderten Pflanzen ist also ein rein hypothetischer Prozess, der trotz zahlreicher wissenschaftlicher Untersuchungen bisher unter naturnahen Bedingungen noch nie beobachtet werden konnte. In die Risikobewertung geht er dennoch ein. Zu beachten ist dabei freilich auch, dass viele Transgene wie Antibiotika-Resistenzen schon von Natur aus in Bodenbakterien weit verbreitet sind und deshalb ständig am natürlichen horizontalen Gentransfer teilnehmen. Ein Transfer von Genen einer transgenen Pflanze auf diese Bakterien hätte also keinerlei ökologische Relevanz.

Entstehung von Resistenzen

Häufig werden gentechnisch verbesserten Sorten zudem Phänomene angelastet, die gar nicht mit der Art ihrer Erzeugung durch Gentransfer in Zusammenhang stehen, sondern ganz allgemein für die moderne Landwirtschaft charakteristisch sind. So entstehen etwa Schädlingsresistenzen immer dann, wenn wiederholt das gleiche Wirkprinzip eingesetzt wird. Das ist bei transgen erzeugter Resistenz nicht anders als bei konventionell erzeugter Sortenresistenz und stellt analog auch ein Problem des modernen chemischen Pflanzenschutzes dar. Beim Anbau gentechnisch veränderter Sorten ist deshalb ein Resistenzmanagement erforderlich wie bei herkömmlichen Sorten auch. Ein wirksames Mittel beim Anbau von Bt-Mais ist beispielsweise die Anlage von Refugienflächen, auf denen man konventionelle Sorten anbaut, um dem Selektionsdruck auf die Schädlingspopulation entgegenzuwirken und die Vermehrung sensitiver Individuen zuzulassen.

Auch das Entstehen resistenter Unkräuter lässt sich nicht der gentechnisch erzeugten Herbizidtoleranz anlasten, sondern betrifft den Einsatz von Herbizi-

Gefahren durch Antibiotika-Resistenzgene?

Gene, die eine Resistenz gegen bestimmte Antibiotika verleihen, sind ein wichtiges Hilfsmittel der Grünen Gentechnik. Sie ermöglichen die rasche Selektion jener Zellen, deren Genom erfolgreich verändert wurde, und werden deshalb gern als Markergene genutzt. Das zu diesem Zweck besonders beliebte nptII-Gen gehört zu jenen Antibiotika-Resistenzgenen, die in natürlich vorkommenden Mikroorganismen weit verbreitet sind. Es stammt aus dem „Transposon Tn5“, einem springenden Gen, und steht für die Bildung eines Enzyms (der Neomycin-Phosphotransferase), das bestimmte Aminoglycosid-Antibiotika sehr spezifisch inaktiviert.

Um die Umweltrisiken bewerten zu können, die aus der Integration bakterieller Antibiotika-Resistenzgene in das Erbgut gentechnisch veränderter Pflanzen resultieren, muss man Antworten auf zwei Fragen suchen: Wie hoch ist die Wahrscheinlichkeit eines horizontalen Gentransfers von Antibiotika-Resistenzgenen aus den Pflanzen auf Bakterien? Und: Wie ändert sich durch den eventuellen Transfer die Verbreitung der Antibiotika-Resistenzgene in der Umwelt? In Laborexperimenten konnte unter sehr artifiziellen Bedingungen ein horizontaler Gentransfer mit einer Frequenz von etwa 10^{-13} beobachtet werden, also in einem von zehn Billionen (10 000 000 000 000) Fällen. Dabei wurden hochkompetente Bakterien eingesetzt – also solche, die extrem aufnahmebereit für fremdes Erbgut sind – und zudem reinste DNA. Beides kommt so in der Natur nicht vor. Unter natürlichen Bedingungen geht man davon aus, dass die Übertragungsfrequenz geringer als 10^{-20} ist. Dies liegt daran, dass die Konzentration der Resistenzgene viel niedriger ist, nur etwa ein Prozent der identifizierbaren Bakterien unter natürlichen Bedingungen fremdes Erbgut aufnehmen kann und die DNA in natürlichen Lebensräumen leicht durch DNasen abgebaut wird. Dagegen tauschen Bakterien untereinander Antibiotika-Resistenzgene unter den natürlichen Bedingungen der Umwelt zum Beispiel durch Konjugation mit einer Frequenz von 10^{-1} bis 10^{-8} aus. Die Wahrscheinlichkeit eines horizontalen Gentransfers liegt also um 10^{12} bis 10^{19} niedriger. Aufgrund dieser geringen Wahrscheinlichkeit eines horizontalen Gentransfers konnte eine Übertragung von Antibiotika-Resistenzgenen aus transgenen Pflanzen auf Bodenbakterien bisher nicht nachgewiesen werden.

Auch wenn die Wahrscheinlichkeit eines Gentransfers aus Pflanzen auf Bakterien sehr gering ist, so ist er nicht gänzlich auszuschließen. Die meisten Antibiotika-Resistenzgene, die zur Selektion transgener Pflanzen verwendet werden, kommen in der Natur sehr häufig vor. Das belegen zahlreiche Studien zur Verbreitung bakterieller Antibiotika-Resistenzgene in der Umwelt. Sowohl Antibiotika als auch jene Gene, die gegen ihre Wirkung schützen, spielen eine wichtige Rolle für Mikroorganismen und werden von ihnen eingesetzt, um im Wettstreit um Habitate und Nährstoffe Konkurrenten auszuschalten.

Oft befinden sich Antibiotika-Resistenzgene auf sogenannten mobilen genetischen Elementen (wie auch das nptII-Gen) und werden vor allem unter Selektionsdruck häufig zwischen den Mikoorganismen ausgetauscht. So birgt ein möglicher horizontaler Gentransfer von Antibiotika-Resistenzgenen aus transgenen Pflanzen auf Bakterien aufgrund der Seltenheit des Ereignisses und unter Berücksichtigung der Häufigkeit der Resistenzgene keine erkennbaren Gefahren.

den ganz allgemein. Die Zahl der Unkrautarten, die gegenüber konventionellen Herbiziden resistent sind, liegt sogar deutlich höher als die jener Arten, die gegen Glyphosat, den komplementären Wirkstoff zur gentechnisch erzeugten Herbizidtoleranz, unempfindlich geworden sind. Diese Erfahrungen machen deutlich, dass beim Anbau gentechnisch veränderter Sorten die Regeln des Resistenzmanagements in gleicher Weise einzuhalten sind wie bei konventionellen Sorten auch und sie nur im Rahmen eines integrierten Pflanzenschutzkonzeptes zu nachhaltigem Nutzen führen können.

Als weiterer Nachteil des Einsatzes der sogenannten HT-Technologie, der kombinierten Verwendung von Totalherbiziden und gentechnisch gegen sie tolerant gemachten Sorten, wird die Abnahme von Organismen angeführt, die an und von Unkräutern leben. Auch dies ist freilich kein spezifisches Problem der Gentechnik, sondern ein Effekt, der bei jeder wirksamen Form der Unkrautkontrolle auftritt.

Mögliche Auswirkungen auf den Verbraucher

– oder: Am Besten nichts Neues

Unverträglichkeiten oder die Auslösung von Allergien durch transgene Pflanzen zählen zu den Befürchtungen der Verbraucher, die besondere Beachtung verdienen. Fütterungsstudien an unterschiedlichen Tierarten sollen über solche Risiken ebenso Aufschluss geben wie Untersuchungen im Labor.

Besondere Bedeutung kommt der Frage nach den Allergien zu – hat man hier doch die beiden einzigen bisher nachweisbaren Risiken bestimmter transgener Pflanzen entdeckt. Theoretisch kann jedes Protein eine allergische Reaktion auslösen, praktisch passiert dies aber nur, wenn bestimmte Bedingungen erfüllt sind: Das Protein muss in hohen Anteilen in der Nahrung vorkommen, es muss im Magen-Darm-Trakt relativ lange stabil bleiben, damit zumindest einige Bereiche intakt durch die Darmschleimhaut in den Blutkreislauf gelangen, und es muss Bestandteile haben, welche die Produktion von speziellen Antikörpern, den IgE-Antikörpern, auslösen. Sind solche Antikörper erst einmal vorhanden, können schon kleine Dosen des Proteins eine allergische Reaktion auslösen.

Deshalb werden neue Proteine in transgenen Pflanzen in Bezug auf ihre Konzentration, ihre Stabilität im Magen-Darm-Trakt und ihre strukturelle Ähnlichkeit mit bekannten Allergenen untersucht. Zusätzlich analysiert man, ob sie bei multiplen Allergikern Reaktionen hervorrufen können.

Ist eine allergische Reaktion zu erwarten, etwa weil der Organismus, aus dem das neue Gen stammt, bereits ein allergenes Potenzial hat, so werden als erstes Allergiker getestet, die auf diesen Ausgangsorganismus reagieren. Auf diese Weise wurde die Übertragung eines allergenen Potenzials von der Paranuss auf die Sojabohne frühzeitig entdeckt. Eigentlich hatte man geplant, die biologische Wertigkeit des Proteins aus Sojabohnen durch die Übertragung eines Gens für ein Speicherprotein aus der Paranuss zu verbessern, weil das Sojaprotein zu geringe Anteile an schwefelhaltigen (essenziellen) Aminosäuren aufweist. Da dieses Protein aber ein wesentliches Allergen der Paranuss darstellt, hätten Paranussallergiker auch auf die transgene Sojabohne allergisch reagiert. Nach diesem Befund wurden die Arbeiten in einem frühen Entwicklungsstadium eingestellt; eine potenzielle Gefährdung von Verbrauchern konnte damit ausgeschlossen werden.

Der zweite Fall überraschte die Fachleute mehr. Die Übertragung eines Gens für ein Protein aus der Bohne, das bisher keine Allergien ausgelöst hatte, führte in der nah verwandten Erbse nach Verfütterung an Mäuse zu allergischen Reaktionen. Ursache war eine Modifizierung (Glykosylierung) des Proteins in der Erbse, die sich von der in der Bohne unterscheidet. Obwohl diese Reaktion nicht erwartet worden war, wurde sie im Rahmen der regulären Analysen frühzeitig entdeckt. Dies zeigt zum einen, dass das System zur Begleitforschung extrem effektiv ist. Es zeigt aber auch, dass mögliche Risiken nicht davon abhängen, wie nah der „Spenderorganismus“ und die Empfängerpflanze miteinander verwandt sind. Derartige Veränderungen an Proteinen können im Übrigen auch dann vorkommen, wenn mit Verfahren der konventionellen Pflanzenzüchtung Bastarde aus verwandten Pflanzenarten erzeugt werden. Auch ein solches Risiko ist also nicht auf die Gentechnik zurückzuführen.

Ökonomische, soziale und rechtliche Fragen

Es begann in den USA. Dort werden seit der Mitte der 1990er-Jahre transgene Pflanzen kommerziell angebaut. Inzwischen sind in 25 Ländern der Erde mindestens eine, vielfach auch mehrere gentechnisch veränderte Nutzpflanzen zum Anbau zugelassen. Im Jahr 2008 wurden weltweit 125 Millionen Hektar mit transgenen Pflanzen bestellt – das entspricht rund neun Prozent der globalen Ackerfläche. Innerhalb der Gruppe der Industrieländer führen auch weiterhin die USA und Kanada beim Anbau transgener Pflanzen. In der Europäischen Union hingegen werden gentechnisch veränderte Pflanzen bisher nur in Spanien in nennenswertem Umfang angebaut. In Deutschland wurden 2008 zirka 3000 Hektar mit transgenen Pflanzen bewirtschaftet, bevor 2009 die bis dahin einzige zum Anbau zugelassene gentechnisch veränderte Sorte verboten wurde. In den Entwicklungs- und Schwellenländern sind die größten Flächen in Argentinien und Brasilien zu finden, gefolgt von Indien und China. Aber auch in Südafrika, Paraguay, den Philippinen und einigen anderen Ländern Lateinamerikas und Asiens werden transgene Sorten bereits in größerem Umfang genutzt.

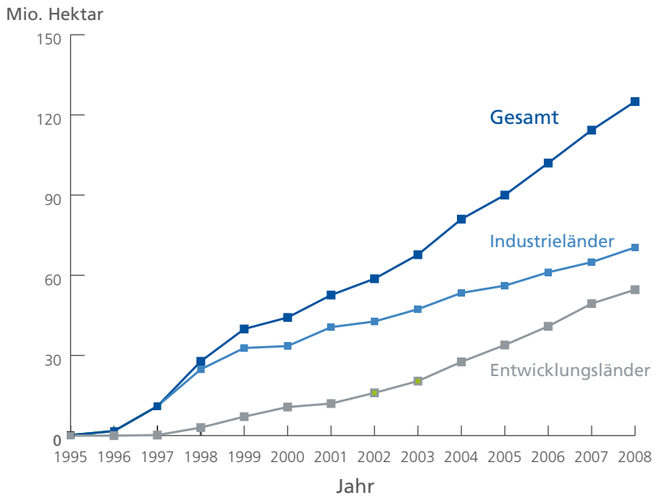
Die weiteste Verbreitung haben bislang herbizidtolerante Sojabohnen. Sie werden in den USA, Argentinien, Brasilien und Paraguay bereits großflächig angebaut. Insektenresistenter Mais steht ebenfalls vorwiegend in den USA und einigen südamerikanischen Ländern, signifikante Flächen mit transgenem Mais gibt es auch in Südafrika und auf den Philippinen. In Spanien wurde der resistente Mais im Jahr 2008 auf knapp 100 000 Hektar angebaut. Auch Baumwolle wird in großem Umfang durch Gene des *Bacillus thuringiensis (Bt)* vor Insektenschäden geschützt, vor allem in den drei größten baumwollproduzierenden Ländern der Welt – den USA, Indien und China. Aber auch in anderen Entwicklungs- und Schwellenländern und in Australien wird insektenresistente Baumwolle angebaut. Herbizidtoleranter Raps ist derzeit überwiegend in Kanada und den USA zu finden.

Betriebswirtschaftliche Aspekte

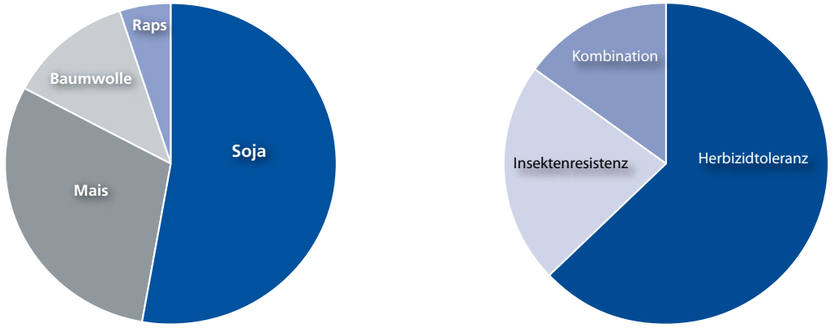
– oder: Wenn Zahlen sprechen

Der rasche weltweite Anstieg des Anbaus transgener Pflanzen lässt vermuten, dass die Landwirte von der Anwendung der Technologie wirtschaftlich profitieren. Dies wird durch zahlreiche wissenschaftliche Untersuchungen, die in den vergangenen Jahren auf Basis repräsentativer Daten durchgeführt wurden, belegt. Für konkretere Aussagen hinsichtlich der Effekte muss allerdings nach Einzeltechnologien differenziert werden.

Herbizidtolerante Pflanzen (HT-Pflanzen) sind in der Regel gegen bestimmte Totalherbizide tolerant



Entwicklung der weltweiten Anbauflächen transgener Pflanzen (1995-2008), Quelle: www.isaaa.org



Aufteilung der Fläche mit transgenen Pflanzen nach Kulturart (links) und verändertem Merkmal (rechts), Quelle: James (2008)

(vgl. S. 44 f.). Bei HT-Sojabohnen etwa handelt es sich um Herbizide mit dem Wirkstoff Glyphosat. Dieser ist sehr wirkungsvoll in der Bekämpfung verschiedenster Gräser und Wildkräuter und zudem preisgünstiger als die meisten anderen Herbizide auf dem Markt. Insofern profitieren Landwirte durch eingesparte Kosten der Unkrautbekämpfung.

In den USA hat die Herbizidtoleranz von Sojabohnen auch zu einer geringfügigen Reduktion in der eingesetzten Herbizidmenge geführt. In Argentinien und Brasilien hingegen wurde der Herbizideinsatz durch die transgene Technologie deutlich ausgedehnt. Dafür wurde die Intensität der Bodenbearbeitung zurückgefahren: Mechanische Maßnahmen zur Unkrautbekämpfung wurden schrittweise durch Glyphosat-Applikationen ersetzt. Viele Landwirte, die herbizidtolerante Sojabohnen verwenden, sind sogar auf die Direktaussaat umgestiegen und bearbeiten die Böden gar nicht mehr, wodurch erhebliche Kosten eingespart und die Wasservorräte des Bodens geschont werden. Insgesamt reduziert die Innovation die Produktionskosten des Anbaus von Sojabohnen. Allerdings ist der Kauf des transgenen Saatguts mit einem Aufpreis für die Technologie verbunden, der bei der Ermittlung der konkreten finanziellen Vorteile gegengerechnet werden muss.

In den USA und Kanada ist der Aufpreis für das Saatgut herbizidtoleranter Pflanzen teilweise beträchtlich, weil die Technologien patentgeschützt sind und Lizenzgebühren an die Biotechnologiefirmen abgeführt werden müssen. Entsprechend gering ist auch der finanzielle Nettonutzen aus Sicht der Bauern. Studien zeigen, dass sich in den USA der Gewinn beim Anbau von transgenen und konventionellen Sojabohnen kaum unterscheidet. Die amerikanischen Landwirte nutzen die Technologie dennoch wegen der Möglichkeit der vereinfachten Unkrautbekämpfung. Auch sparen die Betriebsleiter Arbeitszeit ein, die sie teilweise außerhalb der Landwirtschaft einsetzen.

In Argentinien und anderen südamerikanischen Ländern sieht die Situation gänzlich anders aus. Weil die Technologie dort nicht dem Patentschutz unterliegt, ist das transgene Saatgut billiger als in den USA. Zudem verwenden lokale Bauern häufig selbst nachgezogenes HT-Saatgut, was die Kosten zusätzlich reduziert. Der eigene Nachbau von transgenem Saatgut ist, sofern es sich nicht um Hybridsaatgut handelt, technisch möglich und im Falle der Sojabohnentechnologie aufgrund des fehlenden Patents in südamerikanischen Ländern auch rechtlich zulässig.

So wird in Argentinien nur auf etwa einem Drittel der Fläche mit transgenen Sojabohnen formal gekauftes Saatgut verwendet. Eine Studie zeigt, dass argentinische Landwirte durch die Technologie einen Zusatzgewinn von durchschnittlich 23 Dollar pro Hektar erwirtschaften. Dieser finanzielle Anreiz ist verantwortlich dafür, dass für Soja transgenes Saatgut in Argentinien inzwischen fast auf der gesamten Anbaufläche und in Brasilien auf zwei Drittel der Fläche verwendet wird.

Insektenresistente Pflanzen auf Basis von Genen aus *Bacillus thuringiensis* sind anders als die herbizidtoleranten Pflanzen zu bewerten (vgl. S. 41 ff.). Ein

Sojabohnen

oder teilweise auch mehrere eingebaute Bt-Gene machen die Pflanze resistent gegen spezifische Schadinsekten, sodass die gentechnisch veränderten Pflanzen als Alternative zu einer Schädlingsbekämpfung mit chemischen Insektiziden verwandt werden können. Tatsächlich belegen Studien in verschiedenen Ländern, dass der Einsatz von Bt-Pflanzen die ausgebrachte Menge chemischer Insektizide deutlich reduziert. Besonders beim Anbau von Bt-Baumwolle wird teilweise mehr als die Hälfte der sonst üblichen Insektizidmenge eingespart. Das bietet neben den positiven Effekten für die Umwelt auch finanzielle Vorteile für die Landwirte.

Wie hoch die Einsparung tatsächlich liegt, hängt vom Schädlingsdruck ab, der regional und zeitlich variieren kann. Relevant ist aber auch die Frage, wie erfolgreich bestimmte Schädlinge im konventionellen Anbau bekämpft werden können. Gegen den Maiszünsler etwa, der vor allem in Europa sowie in Nord- und Südamerika ein wichtiger Schädling ist, werden kaum chemische Insektizide verwendet, weil sie nur sehr eingeschränkt wirksam sind. Deshalb führt der Anbau von Bt-Mais in den USA und Argentinien nur zu begrenzten Einsparungen an Insektiziden. Dafür lässt sich ein positiver Effekt auf die Erträge beobachten, weil die Schädlingsverluste durch den Einsatz transgener Pflanzen deutlich zurückgehen.

Für insektenresistente Baumwolle sind die Ertragseffekte teilweise noch deutlicher, vor allem in Entwicklungs- und Schwellenländern, wo Baumwolle vielfach von Kleinbauern angebaut wird. Dies liegt vor allem daran, dass Kleinbauern – aufgrund finanzieller und technischer Restriktionen – Pflanzenschädlinge oft nicht effektiv bekämpfen können und deshalb erhebliche Ernteverluste hinnehmen müssen. In solchen Fällen kann die Bt-Technologie den Ertrag deutlich erhöhen, auch wenn das genetische Ertragspotenzial durch die Bt-Gene nicht beeinflusst wird. Mehrjährige Studien haben ergeben, dass indische Bauern ihre Baumwollerträge durch den Einsatz von Bt-Pflanzen im Durchschnitt um mehr als 30 Prozent erhöhen konnten. Auch in anderen Schwellenländern – wie China, Südafrika und Argentinien – liegen die positiven Ertragseffekte bei durchschnittlich mehr als 20 Prozent.

Feldexperimente zeigen, dass die hier skizzierten Wirkungen der Einsparung chemischer Insektizide und der Vorteile im Ertrag nicht nur für Mais und Baumwolle gelten, sondern auch für andere insektenresistente Pflanzen, die bisher noch nicht zugelassen sind oder noch nicht großflächig angebaut werden. Hierzu gehören beispielsweise Bt-Reis und verschiedene Arten von Bt-Gemüse. Finanziell profitieren Landwirte, die Bt-Pflanzen anbauen, durch sinkende Ausgaben für Insektizide und höhere Einnahmen durch steigende Erntemengen. Trotz des Aufpreises für das Saatgut ist der Zusatzgewinn teilweise beträchtlich, vor allem bei Baumwolle. Im Durchschnitt ist der finanzielle Nutzen in den Entwicklungs- und Schwellenländern höher als beispielsweise in den USA. Dies liegt zum Teil daran, dass der Schädlingsdruck in den Tropen und Subtropen größer

Land	Reduktion in der Insektizidmenge (%)	Anstieg im effektiven Ertrag (%)	Zusatzgewinn (US$/ha)
Bt-Mais			
Argentinien	0	9	20
Philippinen	5	34	53
Spanien	63	6	70
Südafrika	10	11	42
USA	8	5	12
Bt-Baumwolle			
Argentinien	47	33	23
Australien	48	0	66
China	65	24	470
Indien	41	37	135
Mexiko	77	9	295
Südafrika	33	22	91
USA	36	10	58

Durchschnittliche Effekte von Bt-Pflanzen auf betrieblicher Ebene (Anmerkung: Bt steht für Bacillus thuringiensis (Insektenresistenz)), Quelle: Qaim (2009)

ist. Darüber hinaus spielen aber, wie bei den herbizidtoleranten Pflanzen, unterschiedliche Regelungen im Patentschutz eine wichtige Rolle. In den meisten Entwicklungs- und Schwellenländern sind Bt-Pflanzen nicht patentgeschützt, sodass das Saatgut dort billiger ist und nachgebaut werden kann. Eine Ausnahme stellt Hybridsaatgut dar, bei dem mit oder ohne Gentechnik der Nachbau mit Produktivitätseinbußen verbunden ist.

Die Potenziale transgener Pflanzen für Kleinbauern in Entwicklungs- und Schwellenländern wurden in den vergangenen Jahren kontrovers diskutiert. Insbesondere in den öffentlichen Medien wird teilweise berichtet, dass Kleinbauern bisher nicht von der Gentechnik profitieren oder sogar in den Ruin getrieben werden. Allerdings beruhen solche Berichte nicht auf repräsentativen Daten. Zwar gibt es wie bei jeder neuen Technologie auch Bauern, die anfangs aufgrund ungünstiger Umstände negative Erfahrungen gemacht haben, jedoch zeigen objektive wissenschaftliche Untersuchungen, dass die Mehrheit der bisherigen Technologieanwender in Entwicklungs- und Schwellenländern erheblich profitiert. Inzwischen bauen zum Beispiel mehr als zwölf Millionen Kleinbauern erfolgreich Bt-Baumwolle an. Vor allem in Indien und China leben viele Baumwollbauern unterhalb der Armutsgrenze. Studien belegen, dass auch diese Armutshaushalte ihre Situation durch die neue Technologie verbessern könnten. So wurde etwa in Indien gezeigt, dass Bauern mit einem Pro-Kopf-Einkommen von weniger als einem Dollar pro Tag durch die Adoption von Bt-Baumwolle ihr Haushaltseinkommen im Schnitt um fast 50 Prozent steigerten.

Das Beispiel Bt-Baumwolle verdeutlicht, dass die Gentechnik durchaus auch für den Kleinbauernsektor geeignet ist. Dennoch sind die Anwendungsbeispiele bisher noch begrenzt, sodass weitreichende Verallgemeinerungen kaum möglich sind. Die sozioökonomischen Erfahrungen mit Bt-Baumwolle lassen sich nicht ohne weiteres auf Grundnahrungspflanzen übertragen, und die Gegebenheiten in Indien und China sind in vieler Hinsicht nicht mit denen in deutlich ärmeren Ländern Afrikas vergleichbar. Welche Einzeltechnologie in welchem Kontext geeignet ist, hängt letztlich von einer Vielzahl von Faktoren ab.

Soziale Aspekte

– oder: Differenzierung tut not

Neue Technologien haben oftmals auch soziale Implikationen, weil sie traditionelle Produktionsverfahren verändern, Beschäftigungsmöglichkeiten beeinflussen und Auswirkungen auf die Einkommensverteilung haben können. Seit dem Beginn der Mechanisierung der Landwirtschaft ist in den Industrieländern ein kontinuierlicher Rationalisierungsprozess in unterschiedlich starken Schüben feststellbar, der beim Anbau der meisten Kulturarten dazu geführt hat, dass der Bedarf an Arbeitskräften auf ein Minimum reduziert wurde. Ein Rückgang der Beschäftigungsmöglichkeiten aber wirkt sich, unabhängig von der Qualität der damit verbundenen Tätigkeiten, negativ auf die Attraktivität und Existenzmöglichkeiten im ländlichen Raum aus. Daraus folgte in den vergangenen Jahrzehnten ein dramatischer Strukturwandel in vielen vom landwirtschaftlichen Fortschritt

erfassten Regionen, der letztlich zu einem starken Rückgang der ländlichen Bevölkerung und einer Urbanisierung der Gesellschaft führte.

Auch der Einsatz transgener Pflanzen ist potenziell ein Rationalisierungsfaktor, denn die wirtschaftliche Überlegenheit der bisher verfügbaren neuen Sorten beruht in erster Linie auf Kosteneinsparungen durch den geringeren Einsatz von Arbeitskraft und Produktionsmitteln. Mit diesen Eigenschaften steht die Gentechnik gleichwertig neben anderen Rationalisierungstechnologien wie der Einführung von zugstarken Traktoren, modernen Erntemaschinen, monogermem Saatgut oder Pflanzenschutzmitteln. Allerdings hängen die Effekte wiederum von der konkreten Einzeltechnologie und vom jeweiligen Kontext ab.

Ertragssteigernde Technologien können auch zu mehr Beschäftigung in der landwirtschaftlichen Produktion führen, insbesondere in Entwicklungs- und Schwellenländern, wo Pflege- und Erntearbeiten überwiegend manuell durchgeführt werden. In Indien lässt sich beispielsweise beobachten, dass mit der Einführung und Verbreitung von insektenresistenter Baumwolle die Nachfrage nach landwirtschaftlichen Arbeitskräften deutlich anstieg. Zwar werden weniger Arbeiter im Pflanzenschutz eingesetzt, doch dieser Rückgang wird durch den größeren Bedarf an Arbeitskräften während der Ernte der höheren Erträge mehr als wettgemacht. Im Vergleich zum Anbau konventioneller Baumwolle steigert der Anbau von insektenresistenter Bt-Baumwolle in Indien die Beschäftigung um durchschnittlich 42 Prozent.

Baumwollanbau durch Kleinbauern in Indien

Auch die Qualität der Arbeitsplätze ist aus sozialer Sicht bedeutsam. Dabei geht es vor allem um die mit der Arbeit verbundenen physischen und psychischen Belastungen. Während die Einführung moderner Anbaumethoden grundsätzlich erhebliche physische Arbeitserleichterungen mit sich brachte, kam es in den Anfängen des chemischen Pflanzenschutzes auch zu kritischen toxikologischen Belastungen für den Anwender. Die Gefährdung durch die teilweise hohe Toxizität der ersten Generation von Pflanzenschutzmitteln wurde durch die unzureichende

Dosier- und Applikationstechnik noch verstärkt. In der modernen Landwirtschaft ist diese Form der Anwendergefährdung zwar nicht mehr gegeben, weil die Sicherheitsstandards sowohl in der Ausbringungstechnik als auch durch nichttoxische Wirkstoffe erheblich gestiegen sind – in den Entwicklungs- und Schwellenländern spielen derartige Probleme jedoch bis in die Gegenwart hinein eine Rolle. Gerade in der kleinbäuerlichen Landwirtschaft erlaubt Bt-Baumwolle zum Teil Insektizideinsparungen von mehr als 50 Prozent. Dabei werden vielfach hochtoxische chemische Substanzen eingespart, die sonst mit Rückenspritzen und ohne spezielle Schutzbekleidung ausgebracht werden.

In verschiedenen Ländern konnte gezeigt werden, dass die Bt-Technologie die negativen Folgen des Einsatzes chemischer Insektizide für die Gesundheit von Bauern und Landarbeitern merklich reduziert hat. So ergibt beispielsweise eine Studie in China, dass rund ein Drittel der konventionellen Baumwollbauern im Laufe einer Saison über Augenreizungen, Übelkeit, Schwindel und sonstige Gesundheitsprobleme im Zusammenhang mit der Anwendung von Insektiziden klagten, solche Vergiftungserscheinungen aber nur bei weniger als einem Zehntel der Bt-nutzenden Bauern auftraten. Beim Anbau herbizidtoleranter Pflanzen sind dagegen kaum Auswirkungen auf die Arbeitsplatzqualität erkennbar, die nicht auch durch den alternativen Einsatz selektiver Herbizide gegeben wären.

Auch mit Blick auf Verteilungsfragen lassen sich keine allgemeingültigen Aussagen für die Grüne Gentechnik treffen. Die Technologie der transgenen Herbizidtoleranz ist beispielsweise nur in Kombination mit chemischer Unkrautbekämpfung sinnvoll. Sie wird bisher sowohl in Industrie- als auch in Entwicklungs- und Schwellenländern in erster Linie von größeren und stark mechanisierten Betrieben eingesetzt. Die Effizienzsteigerung durch die transgenen Pflanzen könnte den Strukturwandel in Richtung größerer Betriebe sogar weiter beschleunigen. Für die Insektenresistenz durch *Bt*-Gene sieht die Situation jedoch anders aus. Sowohl Groß- als auch Kleinbauern in Industrie- und Entwicklungsländern wenden Bt-Pflanzen bereits gewinnbringend an, sodass eine Verschlechterung der Einkommensverteilung in diesem Fall nicht zu erwarten ist. Vor allem in China und Indien haben Baumwollbauern häufig eine Betriebsgröße von weniger als zwei Hektar.

Der Vorteil von Saatguttechnologien wie der Gentechnik ist, dass sie auch auf kleinen Flächen gewinnbringend eingesetzt werden können, wenn die veränderten Pflanzenmerkmale für Kleinbauern relevant sind. Allerdings sind gut funktionierende Märkte wichtig, damit alle potenziellen Nutzer fairen Zugang zu neuen Pflanzensorten haben. Gerade in dieser Hinsicht lassen sich die bisherigen Erfahrungen in Schwellenländern nicht ohne weiteres auf die ärmsten Länder übertragen. Vor allem in Afrika ist die Infrastruktur in der Regel unzureichend, Saatgutmärkte sind ineffizient, und Kleinbauern haben kaum die Möglichkeit, gute Information und dringend benötigte Kredite zu akzeptablen Konditionen zu bekommen. Solche strukturellen Probleme können durch rein technologische Ansätze nicht gelöst werden. Im Gegenteil: Bei ungünstigen Rahmenbedingungen können neue Technologien die soziale Ungleichheit sogar weiter verschärfen. In solchen Situationen muss technologischer Wandel mit institutionellem Wandel Hand in Hand gehen. Die Gentechnik darf nicht als Allheilmittel für die Probleme in Entwicklungsländern missverstanden werden, sondern kann nur Teil einer breiteren Entwicklungsstrategie sein.

Volkswirtschaftliche Aspekte

– oder: Gewinn für alle?

Über die Effekte auf der Ebene des landwirtschaftlichen Betriebs hinaus haben neue Agrartechnologien auch Auswirkungen auf Märkte und die gesamtwirtschaftliche Wohlfahrt. Produktivitätssteigerungen in der Landwirtschaft führen längerfristig zu sinkenden Preisen, sodass auch die Verbraucher von neuen Technologien profitieren. Hinzu kommt der zunehmend wichtige Aspekt der Versorgungssicherheit. So ist es vor allem auf den agrartechnischen Fortschritt zurückzuführen, dass trotz weltweit steigender Nachfrage die Nahrungsmittelpreise in den vergangenen Jahrzehnten deutlich gesunken sind.

Die Preisturbulenzen auf den Agrarmärkten seit 2007 machen aber deutlich, dass sinkende Nahrungsmittelpreise kein Naturgesetz sind. Einer der Gründe, weshalb das Angebot derzeit der Nachfrage hinterherhinkt, ist die Tatsache, dass in den letzten Jahren zu wenig in Agrarforschung und Technologie investiert wurde. Wenn dieser Trend nicht umgekehrt werden kann, werden die Nahrungspreise zukünftig steigen, was die Versorgungssicherheit gefährden und die Hungerzahlen weiter in die Höhe treiben würde.

Neben anderen Agrartechnologien kann auch die Gentechnik zu den benötigten Produktivitätsschüben beitragen. Erste Preiseffekte auf den Weltmärkten lassen sich bereits beobachten. Ohne den Anbau herbizidtoleranter Sojabohnen in den USA und in Südamerika läge beispielsweise der Weltmarktpreis für Sojaöl und Sojaschrot heute um mindestens fünf Prozent höher. Das hat Auswirkungen auf die Verbraucherpreise einschließlich der Preise für tierische Produkte, bei deren Erzeugung Sojaschrot als Futtermittel eingesetzt wird. Modellrechnungen zeigen, dass transgene Sojabohnen die globale Wohlfahrt jährlich um mehr als zwei Milliarden Dollar erhöhen.

Von diesem volkswirtschaftlichen Nutzen entfallen 53 Prozent auf die Verbraucher, der Rest auf die Landwirte und die Biotechnologie- und Saatgutunternehmen. Durch Bt-Baumwolle und Bt-Mais entsteht ein Wohlfahrtsgewinn in ähnlicher Höhe, wobei der Nutzenanteil für die Landwirte höher liegt, vor allem bei Baumwolle. So kommen in Indien und China mehr als zwei Drittel des Gesamtnutzens der gentechnisch veränderten Baumwolle den Landwirten zugute. Vor allem in Entwicklungs- und Schwellenländern, in denen dem Agrarsektor in der Gesamtwirtschaft noch eine größere Bedeutung zukommt, lassen sich auch in anderen Sektoren positive Wachstumseffekte nachweisen. Diese Effekte gehen insbesondere auf die Belebung des Arbeitsmarktes und die steigende Kaufkraft im ländlichen Raum durch den agrartechnischen Fortschritt zurück.

Kommerziell verwendet werden bislang gentechnische Verfahren, mit deren Hilfe die agronomischen Eigenschaften der Pflanzen verändert werden, sodass ein direkter Nutzen in Form von geringeren Produktionskosten oder höheren Erträgen eintritt. Die Forschung arbeitet jedoch auch an transgenen Pflanzen mit verbesserten Qualitätseigenschaften oder neuartigen Inhaltsstoffen. Die wirtschaftlichen Effekte solcher Technologien sind freilich anders zu beurteilen. Für die Bewertung von transgenen Pflanzen, von denen man positive Wirkungen für Ernährung und Gesundheit erwartet, müssten beispielsweise auch gesundheitsökonomische Ansätze herangezogen werden. Erste Studien zu den möglichen Auswirkungen von Goldenem Reis (Golden Rice), der gentechnisch mit Beta-Carotin ausgestattet wurde, um den Mangel an Vitamin A in Entwicklungsländern zu bekämpfen, belegen bereits, dass er durchaus dazu beitragen könnte, sowohl Kindersterblichkeit als auch Augenleiden deutlich zu reduzieren (vgl. S. 48). Die tatsächlichen Effekte werden allerdings auch von der politischen Unterstützung und der öffentlichen Akzeptanz abhängen.

Politische und institutionelle Rahmenbedingungen

– oder: Anreize und Hürden für Innovation und Vielfalt

Politische und institutionelle Rahmenbedingungen können die wirtschaftlichen Auswirkungen transgener Pflanzen entscheidend beeinflussen. Dass starker Patentschutz den Saatgutpreis erhöht und damit die Nutzenverteilung zwischen Landwirten und Saatgutfirmen verschiebt, wurde bereits erläutert. Patentschutz bietet aber auch Anreize für private Forschungsinvestitionen und beeinflusst damit die Innovationsgeschwindigkeit. Insofern sind Patente auf Pflanzentechnologien und neue Sorten nicht prinzipiell gut oder schlecht.

Der Schutz geistigen Eigentums ist nationales Recht – Patente werden national gewährt und durchgesetzt. Viele Patente, die in den USA oder in Europa gewährt wurden, gelten in den meisten Entwicklungsländern nicht, weil dort der Schutz geistigen Eigentums insgesamt schwächer ist. Dadurch ist beispielsweise der Nachbau von herbizidtolerantem Sojasaatgut in Argentinien oder von Bt-Baumwolle in China völlig legal, während er in den USA verboten ist.

Im Rahmen der Welthandelsorganisation sind auch die Entwicklungsländer verpflichtet, den Schutz geistigen Eigentums zu stärken, allerdings lassen diese internationalen Regeln Spielräume. Die ärmsten Länder wären schlecht beraten, starke Patente auf Pflanzentechnologien zuzulassen, weil diese die Möglichkeit des Nachbaus unterbinden, das Saatgut verteuern und den Zugang der Landwirte zu neuen Technologien erschweren würden. In einigen Schwellenländern hingegen könnte der Nutzen überwiegen, der sich durch Innovationsanreize für die heimische Wirtschaft ergibt.

Die Befürchtung, dass Patente zur Ausbeutung von Kleinbauern führen, lässt sich nicht empirisch belegen, weil die Bauern bei zu hohen Preisen für transgenes Saatgut weiter ihre herkömmlichen Sorten verwenden. Dennoch kann ein umfassender Patentschutz auch die Forschung behindern und zur Konzentration auf Technologie- und Saatgutmärkten beitragen. Für den Schutz geistigen Eigentums muss deshalb ein gesunder Mittelweg gefunden werden.

Auch Regelungen zu Haftungsfragen und zur Koexistenz wirken sich auf privatwirtschaftliche Entscheidungen aus. Verschuldensunabhängige Haftung und große Mindestabstände zwischen transgenen und konventionellen Pflanzen steigern die Unsicherheit und verteuern die Produktion, sodass der finanzielle Vorteil aus dem Anbau transgener Sorten schwindet. Diese Situation lässt sich derzeit in einigen europäischen Ländern beobachten und ist – zusammen mit der mangelnden Akzeptanz in der Bevölkerung – der wichtigste Grund dafür, dass in der Europäischen Union erst vergleichsweise wenige transgene Pflanzen angebaut werden. Niedrige Schwellenwerte im Rahmen der Kennzeichnung erhöhen zudem die Kosten der Segregation und machen den Anbau transgener Pflanzen für Nahrungszwecke ebenfalls unwahrscheinlicher.

Strikte Regelungen für die biologische Sicherheit sind wichtig, um Umweltrisiken zu minimieren. Dennoch sollte deren Formulierung und Umsetzung so effizient wie möglich gestaltet werden, weil zusätzliche Tests und Verzögerungen die Zulassungskosten weiter erhöhen. Unabhängig von den eigentlichen Forschungskosten werden die Kosten der Zulassung einer neuen transgenen Einzeltechnologie im Rahmen der biologischen Sicherheitsbestimmungen inzwischen auf mehr als sechs Millionen Dollar pro Land geschätzt. Dies macht es für kleine Forschungseinrichtungen und Saatgutunternehmen fast unmöglich, von ihnen entwickelte transgene Pflanzen auf den Markt zu bringen, und konzentriert die Forschung auf Pflanzen und auf Merkmale mit sehr großem Marktpotenzial.

Jenseits der eigentlichen Forschungsausgaben und der Kosten der Zulassung entstehen auch Kosten für die lokale Anpassung der Technologie. So müssen beispielsweise interessante transgene Merkmale in lokal adaptierte Sorten eingekreuzt werden. Technisch gesehen ist es relativ leicht möglich, monogene Merkmale wie eine Insektenresistenz durch ein Gen aus *Bacillus thuringiensis* in eine Vielzahl von Sorten einzukreuzen, um einem Verlust an genetischer Diversität entgegenzuwirken. Tatsächlich ist die Anzahl verfügbarer transgener Sorten für die einzelnen Technologien in den meisten Ländern recht groß. Allerdings lässt sich auch eine deutliche Korrelation mit der Anbaufläche erkennen, denn für kleine Flächen ist das Einkreuzen in eine große Zahl von Sorten kaum lukrativ.

Neben den Kosten für die lokale Sortenzüchtung können indes noch andere Faktoren die verfügbare Anzahl transgener Sorten beeinflussen. Vor allem in den ärmsten Entwicklungsländern sind lokale Züchtungskapazitäten oft begrenzt, sodass unter Umständen nur wenige Sorten entwickelt oder importiert würden, sollte die Grüne Gentechnik dort zukünftig verwendet werden. Die

Land	Technologie	Anbaufläche (ha)	Anzahl verfügbarer transgener Sorten
Argentinien	HT-Sojabohnen	16,0 Mio.	50
	Bt-Mais	2,5 Mio.	25
	Bt-Baumwolle	195 000	5
Brasilien	HT-Sojabohnen	14,5 Mio.	46
China	Bt-Baumwolle	3,8 Mio.	150
Indien	Bt-Baumwolle	6,2 Mio.	131
Südafrika	Bt-Mais	1,2 Mio.	11
USA	HT-Sojabohnen	24,2 Mio.	1200
	HT/Bt-Mais	37,9 Mio.	900
	HT/Bt-Baumwolle	4,0 Mio.	75

Geschätzte Anzahl verfügbarer transgener Sorten in ausgewählten Ländern (2007).
Anmerkung: HT steht für Herbizidtoleranz, Bt für Insektenresistenz durch Bacillus thuringiensis,
Quelle: Qaim et al. (2008) und Qaim (2005)

Auswirkungen auf die landwirtschaftliche Biodiversität sind also – wie bei anderen Technologien auch – von einer Vielzahl institutioneller Faktoren abhängig.

Auffällig ist die Dominanz des privaten Sektors in der Weiterentwicklung der Grünen Gentechnik – insbesondere einige wenige multinationale Firmen sind auf diesem Feld tätig. Die zunehmende Rolle des privaten Sektors in der internationalen Agrarforschung ist prinzipiell zu begrüßen, auch vor dem Hintergrund des deutlichen Rückgangs öffentlicher Ausgaben für die Agrarforschung in den letzten zwanzig Jahren. Dennoch gibt es wichtige Forschungsfelder, die von privaten Firmen nicht abgedeckt werden. Hierzu gehört neben der Grundlagenforschung auch die angewandte Forschung und die Entwicklung von Technologien für finanziell weniger lukrative oder stärker risikobehaftete Bereiche. Technologien für Nischenmärkte und solche, die sich speziell für die Bekämpfung der Armut in Entwicklungsländern eignen, werden vom privaten Sektor nur sehr eingeschränkt entwickelt. In solchen Bereichen muss mehr öffentliche Forschung das private Engagement ergänzen.

Rechtliche Regelungen

– oder: Von Abständen, Grenzen und Koexistenz

Gentechnisch veränderte Pflanzen dürfen in der Europäischen Union nur angebaut werden, wenn strenge Sicherheitsstandards eingehalten werden, die weit über denen für konventionelle Pflanzensorten liegen. Beurteilt wird dies von der European Food Safety Authority (EFSA) und den von ihr berufenen unabhängigen Experten im Gremium für genetisch modifizierte Organismen. Die Entscheidung über die Zulassung wird dann auf Basis eines Gutachtens der EFSA im Wechselspiel zwischen Ministerrat und EU-Kommission getroffen. Voraussetzung ist, dass der Antragsteller einen Plan zur Beobachtung möglicher Auswirkungen des Anbaus der transgenen Pflanzen vorlegt, der durch die Gremien der Europäischen Union genehmigt wurde. Die Zulassung gilt maximal für zehn Jahre. Eine Verlängerung ist jedoch möglich.

Der Antrag auf Zulassung bezieht sich stets nur auf eine einzige gentechnisch veränderte Linie, also die Nachkommen einer einzigen transgenen Pflanze, die in Bezug auf das Transgen und seinen Integrationsort genetisch identisch sind. Eine andere Linie, auch wenn sie zur gleichen Kulturart gehört und das gleiche Transgen trägt, braucht eine erneute Zulassung, wenn sie auf dem europäischen Markt angeboten werden soll. Die zugelassene Linie kann indes von den Pflanzenzüchtern – in Lizenz auch durch andere als die Anmelder – in lokale Sorten eingekreuzt werden. Diese Sorten werden in Deutschland vom Bundessortenamt über mehrere Jahre geprüft. Ein Anbau ist erst nach Zulassung der Sorte möglich.

Alle Produkte, die aus diesen zugelassenen Pflanzen entstanden sind, müssen entsprechend gekennzeichnet werden. Bei unbeabsichtigten Beimischungen, etwa wenn Blüten konventionell gezüchteter Pflanzen durch transgenen Pollen befruchtet wurden, gilt ein Grenzwert: Liegt der Anteil der gentechnisch veränderten Substanz bei mehr als 0,9 Prozent der Gesamtsubstanz, müssen auch diese Produkte gekennzeichnet werden. Dieser Grenzwert ist eine rein politische Festlegung. Er hat nichts zu tun mit einer potenziellen Gefährdung von Umwelt und Verbrauchern, denn die zugelassenen Sorten sind ja als sicher eingestuft worden (vgl. auch S. 59 ff.), sodass sie ohne Gefährdung angebaut und verzehrt werden können. Dies hat eine Denkschrift der Deutschen Forschungsgemeinschaft im Jahr 2002 bereits deutlich gemacht.

Mit diesem willkürlich festgelegten Grenzwert wollte der Gesetzgeber erreichen, dass der Verbraucher zwischen Produkten aus gentechnisch veränderten und gentechnisch nicht veränderten Pflanzen wählen kann. Eine völlige Freiheit von Anteilen aus gentechnisch veränderten Pflanzen, wie sie von einigen Verbänden gefordert wird, ist für die allermeisten Produkte ohnehin nach wie vor gegeben, weil von den meisten Kulturarten weder hier noch irgendwo auf der Welt gentechnisch veränderte Sorten angebaut werden. Das gilt zum Beispiel für alle Getreidearten, alle Gemüsearten und alle Obstarten mit Ausnahme der Papaya. Bei landwirtschaftlichen Kulturen wie

Raps, Soja und Mais ist ein Null-Prozent-Anteil allerdings Illusion angesichts des weltweiten Anbaus transgener Pflanzen auf vielen Millionen Hektar. Ein Null-Prozent-Schwellenwert widerspräche zudem der politisch gewollten Wahlfreiheit und Koexistenz beider Pflanzentypen, da sich weder Landwirt noch Verbraucher für gentechnisch veränderte Produkte entscheiden könnten. Deshalb wurde mit dem Anteil von 0,9 Prozent ein Grenzwert festgelegt, der beiden Seiten gerecht werden soll. Produkte aus Tieren, die mit zugelassenen gentechnisch veränderten Pflanzen gefüttert wurden, und Lebensmittel wie Käse, die mit Hilfe von Enzymen aus gentechnischer Produktion hergestellt wurden, müssen jedoch nicht entsprechend gekennzeichnet werden.

Da der Frage der Koexistenz zwischen Gentechnik und anderen Formen der Landwirtschaft in der deutschen und europäischen Diskussion der vergangenen Jahre besondere Aufmerksamkeit zuteil wurde, sollen Zusammenhänge und rechtliche Regelungen im europäischen Kontext etwas eingehender erläutert werden. Tatsächlich werden transgene Pflanzen auch in der Nachbarschaft anderer mit ihnen kreuzbarer Pflanzen angebaut (vgl. S. 61 ff.). Dabei kann es sich um die gleiche Art oder um verwandte Arten handeln. Bei Raps etwa kann es zu Auskreuzungen mit verschiedenen Wild- und Kulturarten kommen. Er kann beispielsweise mit Steckrüben und unter Umständen auch mit Rübsen, Kohl und anderen Arten vermehrungsfähige Bastarde bilden. Rübsen und Steckrüben kommen in Deutschland allerdings nur noch sehr selten vor. Zuckerrüben können sich zudem mit Wildrüben kreuzen. Wenn solche Auskreuzungen in Wildformen möglich sind, ist entscheidend, ob die neue Eigenschaft der Wildform einen Ausbreitungsvorteil bieten könnte. Bei der Resistenz gegen die Rübenkrankheit Rhizomania zum Beispiel ist dies nicht der Fall, weil die Wildrübe bereits über eine ausgeprägte Resistenz verfügt. Bei einer Herbizidtoleranz würde sich der Vorteil auf die herbizidbehandelte Fläche beschränken. Bei den transgenen Pflanzen, die gegenwärtig zur Debatte stehen, stellt die potenzielle Auskreuzung in Wildformen also kein Problem dar.

Anders ist die unbeabsichtigte Auskreuzung in benachbarte Kulturpflanzen der gleichen Art zu beurteilen. Sie kann – in Abhängigkeit vom Wind und vom Abstand zu den transgenen Beständen – dazu führen, dass der Anteil an gentechnisch veränderten Pflanzen an den konventionellen Sorten auf mehr als 0,9 Prozent steigt. Das Erntegut und alle daraus hergestellten Produkte müssten dann gekennzeichnet werden, was unter Umständen zu einer Verringerung des Verkaufswerts führen kann. Nach dem geltenden Gentechnikgesetz hat der Verursacher, also der Landwirt, der die gentechnisch veränderten Pflanzen anbaut, diesen Schaden unabhängig von seinem Verschulden zu tragen, auch wenn er die Regeln der guten fachlichen Praxis eingehalten hat. Deshalb hat der Deutsche Bauernverband den Landwirten empfohlen, auf den Anbau gentechnisch veränderter Pflanzen ganz zu verzichten. Um das Risiko einer Haftung einzugrenzen, vor allem aber um den Grenzwert von 0,9 Prozent in Deutschland auf Dauer einhalten zu können, müssen für alle transgenen Pflanzen – wie für Mais bereits geschehen – Anbauregeln erstellt werden, welche die Auskreuzung tatsächlich unter 0,9 Prozent halten.

Die erste Voraussetzung für die Einhaltung des Schwellenwerts ist der transgene Anteil im Saatgut: Je höher dieser Anteil ist, umso schneller wird durch Einkreuzungen der Grenzwert von 0,9 Prozent erreicht. Bisher gibt es für Saatgut keinen Schwellenwert. Jeder Nachweis von noch so geringen Mengen führt vielmehr dazu, dass das Saatgut als „gentechnisch verändert“ gekennzeichnet werden muss. Ist es jedoch mit Saatgut von nicht zugelassenen transgenen Pflanzen verunreinigt, muss es vernichtet werden.

Die zweite Voraussetzung zur Einhaltung des Schwellenwerts ist die Erstellung von Regeln für die gute fachliche Praxis. Wesentliche Bestandteile sind die Abstände zu Flächen mit kreuzbaren Arten, die Fruchtfolge und die Nachbearbeitung der Flächen. Der notwendige Abstand ist im Wesentlichen durch die Möglichkeiten der Pollenverbreitung bedingt, die wiederum durch die Lebensdauer und Flugweite der Pollen und ihre Verbreitung über Insekten oder Wind bestimmt werden. Die Art der Nachbearbeitung der Flächen und die optimalen Fruchtfolgen, die verhindern, dass transgene Pflanzen sich in späteren Jahren unter konventionelle Artgenossen mischen, hängen davon ab, wie viele Jahre die Samen im Boden überdauern. Da sowohl die Art der Pollenverbreitung als auch das Überdauerungspotenzial der Samen im Boden von Art zu Art verschieden sind, müssen für alle Kulturarten unterschiedliche Regeln der guten fachlichen Praxis entwickelt werden.

Pollenfalle am Rande eines Feldversuchs mit Bt-Mais

Für den Mais, die einzige Kulturart, die – mit einer transgenen Linie (MON810) und fünf davon abgeleiteten in Deutschland zugelassenen Sorten – in Europa bereits auf größeren Flächen angebaut wird, liegen die notwendigen Daten zur Erstellung solcher Regeln vor. Maispollen ist aufgrund seiner Größe, der hauptsächlichen Verbreitung durch den Wind und der geringen Überlebensfähigkeit nur begrenzt auskreuzungsfähig. 95 bis 99 Prozent des Pollens fallen in einem Umkreis von etwa 30 Metern um die Pollenquelle zu Boden. Basierend auf den Daten zur Auskreuzung in kleinen Versuchsanlagen wurden europaweit Anbauversuche durchgeführt. Sie zeigten, dass unter regulären Umständen eine 20 Meter breite Barriere aus konventionellem Mais ausreicht, um die Einkreuzung in einem direkt benachbarten Feld

Erbsenfeld als Zwischenfläche bei einem Freilandversuch mit transgenem Bt-Mais

unter dem Schwellenwert zu halten. Selbst wenn der Wind fast ausschließlich aus einer Richtung kommt und damit der größte Teil des Pollens in dieser Windrichtung konzentriert wird, reicht ein Abstand von 50 Metern und eine zusätzliche Barriere von 20 Meter Mais, um den Schwellenwert einzuhalten.

Für alle anderen relevanten Feldfrüchte gibt es bisher vor allem Versuche im kleinen Maßstab, die nicht immer Aussagen über Abstände im Anbau erlauben. Als problematischste Art gilt der Raps – nicht nur wegen der Pollenausbreitung, die im Wesentlichen durch Insekten geschieht, sondern auch wegen der langen Lebensdauer der Samen im Boden. Die Daten zur Ausbreitung von Rapspollen sind sehr uneinheitlich, die wenigen Anbauversuche etwa in Großbritannien, Australien oder Kanada zeigen, dass auch beim Raps der größte Teil der Pollen in unmittelbarer Nähe des Spenders bleibt und die Einkreuzung mit der Entfernung exponentiell abnimmt. Schon in einem Abstand von zehn Metern lag der transgene Anteil in konventionellem Raps nur noch bei 0,3 bis 0,1 Prozent. Die hohe Verweildauer des Samens im Boden zwingt aber zu geeigneten Maßnahmen der Bodenbearbeitung, einer konsequenten Bekämpfung von Unkrautraps und einer angepassten Fruchtfolge, damit in den Folgejahren Auskreuzungen in benachbarte Bestände vermieden werden.

Die Kartoffel dagegen ist mit Blick auf das Auskreuzungspotenzial eine besonders sichere Kulturart. Da sie generell klonal über die Knolle vermehrt wird, ist eine Ausbreitung von unerwünschten transgenen Hybriden nicht zu erwarten. Kreuzungen in der Züchtung vermeiden sorgfältig die Beimischung von Pollen, die nicht von dem gewünschten Spender stammen, unabhängig davon, ob dieser gentechnisch verändert ist oder nicht. Die Tatsachen, dass der größte Teil der Pollen schon in einem Umkreis von zwanzig Metern niederfällt, die meisten Kartoffelsorten ohnehin keinen Beerenansatz zeigen und die Beeren in unseren Breiten selten ausreifen, machen die Kartoffel zur sichersten Kulturart für die Nutzung der Grünen Gentechnik (vgl. S. 53 ff.). Zu bedenken ist allerdings die relativ hohe Wiederauflaufrate in den Folgejahren, die sich durch eine Zunahme milder Winter noch verstärken könnte. Fruchtfolgen und Bodenbearbeitung sind deshalb zu beachten, wenn auf derselben Fläche konventionelle Kartoffeln angebaut werden sollen.

Entscheidend für die Gewährleistung der Koexistenz ist schließlich die Trennung von transgenen und nicht-transgenen Pflanzen bei Ernte und Verarbeitung. Die umfassenden Rückverfolgungsregelungen, der Nachweis von Transgenen bis zu einem Anteil von 0,1 Prozent, die drastischen Auflagen bei der Feststellung ungewollter und ungekennzeichneter Beimischungen und die umfangreichen Kontrollen durch die Behörden der Lebensmittelüberwachung tragen maßgeblich dazu bei, die Trennung von transgenen und konventionellen Kulturarten zu gewährleisten. Grundsätzlich ist deren Koexistenz also möglich – und wird in Europa beim Mais auch schon erfolgreich praktiziert.

Zur Diskussion der Grünen Gentechnik

– oder: Kommunikation in der Sackgasse?

Der technische oder ökonomische Wert der Grünen Gentechnik ist für Forschende und potenzielle Anwender von besonderer, mutmaßlich gar zentraler Bedeutung. Lassen sie jedoch die Vereinbarkeit des Neuen mit vorhandenen Werteorientierungen der breiten Öffentlichkeit außer Acht, leiten sie eine Ablehnung der Umsetzung selbst ein.

Man mag fragen, warum sich weite Teile der Bevölkerung angesichts der Grünen Gentechnik Sorgen um ihre Sicherheit machen und Widerstand gegen jedwede Ausbringung gentechnisch veränderter Kulturpflanzen leisten oder unterstützen. Bei anderen neuen Technologien scheint dies nicht oder nur in deutlich geringerem Maße der Fall zu sein, etwa beim Mobilfunk oder den vielfältigen Möglichkeiten der Internetnutzung. Diese beiden Technologien bescheren dem Endverbraucher einen unmittelbar erfahrbaren Zusatznutzen.

Also – so die Schlussfolgerung derer, die für die Anwendung der Grünen Gentechnik eintreten – müsse man dem Endverbraucher einen solchen Zusatznutzen durch gentechnisch veränderte Pflanzen anbieten, beispielsweise Pharmazeutika, die aus solchen Pflanzen gewonnen werden, oder gentechnisch veränderte Pflanzen, die unmittelbar in die Lebensmittelproduktion eingehen und einen ernährungsphysiologischen Zusatznutzen bieten.

Ein allgemeiner ökologischer Nutzen gentechnisch modifizierter Kulturpflanzen hingegen – wie etwa das Reduktionspotenzial im Blick auf Herbizide und Insektizide in der Landwirtschaft – scheint sich trotz aufwendiger Aufklärungsbemühungen weit weniger erfolgreich vermitteln zu lassen. Hierin liegt durchaus ein Dilemma. Denn Technologien, die auch hierzulande für Endverbraucher attraktiv sein könnten, befinden sich erst im Stadium der Forschung. Die gesellschaftliche Abwehrhaltung gegen die Grüne Gentechnik dagegen ist gegenwärtig und könnte die weitere Forschung an neuen Anwendungen negativ beeinflussen.

Diese Situation lässt sich aus ihrer Geschichte verstehen. Am Anfang der Gentechnik stand die der Vorsicht und aufkommenden Sicherheitsfragen verschriebene Tagung von Asilomar im Jahr 1975. Die Anfangsjahre der Grünen Gentechnik hingegen waren in der öffentlichen Kommunikation zunächst von optimistischen Visionen für die Gesellschaft bestimmt, wie einer „sauberen“ Landwirtschaft oder der Bewältigung des Welthungers. Im Zentrum der Aufklärungsbemühungen der anwendenden Industrie standen jedoch nicht die Endverbraucher, sondern die Landwirte, die die neuen Pflanzen nutzen sollten. Sie konnten möglicherweise einen persönlichen Nutzen realisieren, die Verbraucher aber kaum. So stellten die großen Visionen eine Einladung zur Realitätskontrolle durch eine kritische Öffentlichkeit dar und schufen die Basis für die skeptisch-kritische Betrachtung auch der Nutzenverheißungen, die der Landwirtschaft gemacht wurden.

In öffentlichen Veranstaltungen zu Chancen und Risiken der Grünen Gentechnik wird die Ethik heute in der Regel auf die Seite derer gebucht, die sich tendenziell ablehnend mit dieser Technologie befassen. Der hier relevante Konflikt entzündete sich nicht zuletzt an nicht eingelösten Versprechungen, an Informationsangeboten, die vermeintlich bewusst unvollständig, schwer zugänglich oder unverständlich waren, und schließlich an dem Verdacht, dass potenzielle Risiken einer Anwendung sozialisiert, Vorteile aber privatisiert werden sollten.

In den vergangenen Jahren hat sich die Auseinandersetzung um die Grüne Gentechnik zu einem Überzeugungskonflikt entwickelt, der sich vom Interessenkonflikt dadurch unterscheidet, dass er keinen Kompromiss über den Weg des Interessenausgleichs zulässt. Die Grüne Gentechnik ist für die Bürger zu einem Objekt symbolisch-politischer Einstellungen im Sinne einer Zivilisations- und Fortschrittskritik geworden. Nachdem die Anwendung gentechnisch veränderter Organismen auf europäischer Ebene nicht mehr zu verhindern war, suchte sich diese Kritik eine andere, noch immer ungeschützte Flanke der Technologie: Nicht das „Dass“ der Anwendung, sonders das „Wie“ wurde zum Gegenstand der Auseinandersetzung. Der Schwerpunkt gesellschaftlicher Diskussionen verlagerte sich von potenziellen ökologischen Risiken auf letztlich ökonomische Risiken, etwa Beeinträchtigungen von Landwirten oder Imkern, die die Grüne Gentechnik nicht nutzen wollen oder wegen vertraglicher Verpflichtungen nicht nutzen dürfen: Damit bewegt man sich zwar im Kontext eher wirtschaftsethischer Konfliktlagen, doch darf nicht übersehen werden, dass auch in diesem Zusammenhang normative Orientierungsmuster die Möglichkeit auszuhandelnder Kompromisse limitieren können.

Man kann davon ausgehen, dass Nicht-Fachleute die Grüne Gentechnik, mit der sie zunächst einmal unwillentlich oder gar unbemerkt konfrontiert werden, in der Regel eher intuitiv negativ bewerten, aus einer Perspektive, die sich an der Bewahrung des Vertrauten orientiert. Das bringt sie häufig dazu, die Notwendigkeit gentechnischer Veränderungen von Kulturpflanzen grundsätzlich in Frage zu stellen. Diese Grundhaltung verdankt sich durchaus nicht immer naturwissenschaftlicher Ignoranz. Solange man sich nämlich „im Besitz“ von Alternativen zu den transgenen Organismen wähnt, muss derjenige, der Pflanzen gentechnisch verändern will, im Sinne einer Beweislastumkehr nachweisen, dass dies angesichts eines drängenden Problems *nötig* und nicht lediglich technisch *möglich* oder ökonomisch sinnvoll ist.

Diese Kommunikationslage ist – zumindest für diejenigen, die in der Grünen Gentechnik große Potenziale sehen – in hohem Maße unbefriedigend. Doch wie kann ein anderer, der Sache angemessener Modus der Kommunikation aussehen, einer der verdächtigungsfrei und fair ist? Es entspricht der Vorstellung vom mündigen Bürger, ihn an Problemlösungen zu beteiligen. Von fundamentaler praktischer Bedeutung ist in diesem Zusammenhang das soziale Vertrauen, das Menschen einander regelmäßig dann gewähren, wenn sie spüren, dass der jeweils Andere ähnliche moralische Werte vertritt. Die Darlegung verfügbarer Informationen, die zugleich signalisieren, dass die Forschenden wesentliche moralische Wertvorstellungen mit den Adressaten ihrer Kommunikation teilen, fördert Vertrauen. Neben der Bereitstellung verfügbarer Information ist es die Offenlegung von aktuellen Intentionen und langfristigen Visionen der Technologen und Wissenschaftler, die einen wichtigen Beitrag zur Vertrauensbildung liefern kann.

Weder Teufelszeug noch Wundermittel – Resümee und Ausblick

Hohe Erwartungen und tiefe Skepsis begleiten die Grüne Gentechnik von Anbeginn. Aufhalten lässt sich ihre weltweite Entwicklung letztlich nicht. Vor mehr als zwanzig Jahren haben gentechnisch veränderte Pflanzen die Labore und Gewächshäuser der Forschung verlassen. Seither werden sie in mehr als zwanzig Ländern der Erde zu kommerziellen Zwecken angebaut – im Jahr 2008 immerhin auf rund neun Prozent der globalen Ackerfläche, das entspricht mehr als dem Zehnfachen der ackerbaulichen Nutzfläche Deutschlands.

Mehr als zwei Jahrzehnte Erfahrung mit dem Anbau dieser Sorten zeigen: Die von Kritikern postulierten negativen Folgen für Umwelt, Tier und Mensch sind in keinem Falle eingetreten. Gentechnisch veränderte Pflanzen haben langwierige mehrstufige Zulassungsverfahren zu bestehen, bevor sie im Freiland angebaut werden dürfen. So ist trotz der riesigen Anbauflächen bis heute kein einziger Fall bekannt, in dem eine derart bewertete Pflanze nichtvorhersehbare Eigenschaften gezeigt oder ihr Anbau Folgen gehabt hätte, die über das hinausgehen, was man von herkömmlich gezüchteten Pflanzen kennt. Dieser Befund der Praxis deckt sich mit den Ergebnissen aus mehr als zwanzig Jahren intensiver Sicherheitsforschung. Die Akzeptanz der Grünen Gentechnik in weiten Teilen der deutschen Öffentlichkeit indes scheint sich dadurch nicht erhöht zu haben.

Bei der Bewertung der Grünen Gentechnik werden freilich häufig unerwünschte Effekte ins Feld geführt, die gar nicht für gentechnisch veränderte Pflanzen spezifisch sind, sondern die moderne Landwirtschaft generell kennzeichnen. Ein Beispiel ist die Entwicklung resistenter Unkräuter oder Schädlinge, die ein lange bekanntes Problem des modernen chemischen Pflanzenschutzes darstellt. Hier gilt für den Anbau gentechnisch veränderter Pflanzen das Gleiche wie für konventionelle Sorten auch: Den Resistenzproblemen kann man (nur) durch integrierte Bekämpfungsstrategien einschließlich eines wohldurchdachten Resistenzmanagements begegnen.

Schutzrechte und Monopole, ökonomische Nachteile für ärmere Länder und Beeinträchtigungen jener Landwirte, die gentechnisch veränderte Pflanzen nicht nutzen wollen oder können – auch die sozialen und wirtschaftlichen Aspekte, die heute vielfach als Argumente gegen die Grüne Gentechnik ins Feld geführt werden, sind ihr letztlich nicht anzulasten. Denn nicht die Technik an sich ist gut oder böse, sozial, gerecht oder unmoralisch – diese Kategorien betreffen allein den Umgang mit ihr. Das gilt für die Gentechnik genauso wie für andere Techniken auch. Betrachtet man aber jene Sorgen und Ängste, die sich tatsächlich ganz speziell auf die Grüne Gentechnik und ihre Folgen beziehen – die unkontrollierte

Ausbreitung gentechnisch veränderter Pflanzen zum Beispiel, die Übertragung der neu eingeführten Gene auf andere Organismen des Lebensraumes oder die Zunahme von Antibiotika-Resistenzen – so belegen die bisherigen Ergebnisse der Forschung unzweifelhaft: Diese spezifischen Risiken sind mit entsprechenden Maßnahmen und Sicherheitsstandards durchaus beherrschbar. Die Furcht vor unabsehbaren Folgen gentechnischer Veränderungen an Pflanzen hat sich als überzogen erwiesen.

Als überzogen erwies sich freilich auch manch hochfliegende Erwartung der Anfangszeit, etwa die Vision von der raschen Bewältigung des Hungers in der Welt oder von der baldigen Produktion begehrter Rohstoffe auf dem Acker. Die Grüne Gentechnik, so zeigen zwei Dekaden Erfahrung, ist weder Teufelszeug noch Wundermittel. Sie kann jedoch einen wertvollen Beitrag dazu leisten, angepasste und leistungsfähige Pflanzen zu züchten – und sie kann es oftmals präziser und schneller als die konventionelle Pflanzenzüchtung.

Dies allein ist schon ein großer Gewinn in einer sich rasch verändernden Welt. Denn die Anforderungen an die Verbesserung der Nutzpflanzen werden in Zukunft noch weiter steigen, und sie werden aus vielerlei Gründen in immer kürzeren Zeitabständen auf die Sortenzüchtung zukommen – sei es, weil Klima und Standortbedingungen sich ändern, weil neue Schaderreger immer schneller eingeschleppt werden oder weil die Ansprüche an die Qualität von Nahrungsmitteln wachsen. Die Sicherung der Ernährung der Weltbevölkerung wird entscheidend auch von Fortschritten der Pflanzenzüchtung abhängen. Die Gentechnik wird die Pflanzenzüchtung in die Lage versetzen, diese Anforderungen schneller und gezielter zu erfüllen.

Die Gentechnik ermöglicht indes nicht nur eine Beschleunigung der Sortenentwicklung. Sie kann, da sie die Artgrenzen überwindet, darüber hinaus auch manches leisten, was auf konventionellen Wegen der Züchtung niemals zu erreichen wäre: Die Erzeugung insektenresistenter Pflanzen zum Beispiel, denen man erfolgreich ein Gen des *Bacillus thuringiensis* übertrug, das sie in die Lage versetzt, das Toxin gegen gefräßige Raupen, mit dem sie früher behandelt wurden, selbst zu produzieren. Oder die Züchtung von Reis, der dank artfremden Erbguts in der Lage ist, beta-Carotin zu erzeugen und damit den fatalen Folgen des Mangels an Vitamin A in vielen Entwicklungsländern vorzubeugen. Auch amylosefreie Kartoffeln, die als nachwachsende Rohstoffe für die Industrie zum sparsamen Umgang mit Ressourcen beitragen, oder Winterzuckerrüben, die den Boden schützen, weil sie im Herbst gesät und im folgenden Jahr geerntet werden, lassen sich nur mit Hilfe der Gentechnik erstellen.

Von den spezifischen Möglichkeiten der Gentechnik erwartet man zudem Erfolge bei der nachhaltigen Bekämpfung problematischer Krankheitserreger, die einen hohen Anpassungsgrad an die Wirtspflanze zeigen. Zahlreiche Beispiele solcher hoch angepassten Pathogene zeigen, dass sie durch Gene innerhalb des natürlichen Genpools der Kulturart nur unzureichend kontrolliert werden können, weil das Pathogen während seiner langen Koevolution mit der Wirtspflanze ein ausreichendes Arsenal zur Überwindung der bestehenden Abwehrmechanismen entwickelt hat.

So ist trotz jahrzehntelanger intensiver Resistenzzüchtung auf konventionellem Weg kaum eine dauerhafte oder ausreichend wirksame Resistenz gegen bedeutende Pathogene erreicht worden. Noch immer leiden Kartoffeln unter Kraut- und Knollenfäule, Getreide unter Mehltau, Rost und Viren und Weinreben unter falschem Mehltau. Ein Ausweg liegt gerade in der Übertragung von Genen fremder Arten, die das Pathogen nicht befallen kann. Das Potenzial solcher transgener Nichtwirtsresistenz ist äußerst vielversprechend, lässt sich aber nur mit Hilfe gentechnischer Methoden nutzen. Dies setzt allerdings eine weit bessere Kenntnis der Genfunktionen voraus, als wir sie derzeit besitzen.

Auch solches Wissen kann letztlich nur mit gentechnischen Verfahren vertieft werden, die heute maßgeblich dazu beitragen, die faszinierenden Vorgänge in der Natur, ihre Wechselwirkungen und Regulationsprozesse immer besser zu verstehen. Gentechnische Methoden gelten derweil in fast allen Bereichen der Lebenswissenschaften als unverzichtbar, seien es Botanik oder Zoologie, Mikrobiologie oder Medizin, Landwirtschaft oder Umweltwissenschaften. Sie erlauben zuvor ungeahnte Einblicke in das Zusammenwirken der Gene bei der Entwicklung von Lebewesen und bei der Evolution der Arten. Die Forderung nach „gentechnikfreien Zonen“ ist – von den wirtschaftlichen Realitäten einmal ganz abgesehen – deshalb eine groteske Verkennung der tatsächlichen Verhältnisse in der Wissenschaft.

Schon die Grundlagenforschung, erst recht aber angewandte Forschung und Züchtungsforschung sind dabei auch auf Freilandversuche angewiesen – kann doch die landwirtschaftliche Bedeutung von Nutzpflanzen stets nur durch deren Anbau unter praxisnahen Bedingungen, also im Freiland, ermittelt werden. Das gilt für gentechnisch veränderte Sorten wie für alle anderen auch. Nur in umfassenden Freilandversuchen lässt sich der züchterische Wert dieser Pflanzen bestimmen, denn die Ausprägung der Gene wird in vielen Fällen durch Wechselwirkungen mit der Umwelt beeinflusst. Darüber hinaus lassen sich mögliche ökologische Konsequenzen des Anbaus transgener Pflanzen ebenfalls nur durch Freilandversuche erkunden.

Zu den großen Herausforderungen für die Züchtungsforschung gehört die gezielte Übertragung komplex vererbter Eigenschaften – auch mit Hilfe gentechnischer Verfahren. Viele züchterisch wichtige Merkmale wie etwa der Ertrag werden polygen vererbt, also durch das Zusammenwirken mehrerer Gene bestimmt. Heute ist es technisch noch nicht möglich, mehr als fünf Gene gleichzeitig zu übertragen. Es ist jedoch gelungen, Hauptgene, sogenannte Majorgene, mit starkem Einfluss auf ein polygenes Merkmal zu identifizieren und zu übertragen. Somit ist die gentechnische Veränderung auch polygener Merkmale in greifbare Nähe gerückt. Ein Beispiel hierfür ist die Identifizierung von Genen, die bestimmen, zu welchem Zeitpunkt eine Pflanze blüht, und damit

einen starken Einfluss auf das Ertragspotenzial von Nutzpflanzen haben.

Bis die landwirtschaftliche Praxis beginnen kann, von solchen neuen Kenntnissen zu profitieren, wird freilich noch geraume Zeit vergehen. Ebendies macht gerade das Dilemma heutiger Entscheidungen aus: Pflanzenzüchtung bleibt – trotz aller gentechnischen Möglichkeiten zu ihrer Beschleunigung – ein langwieriger Prozess. Züchter müssen auch weiterhin weit vorausschauend planen: Entscheidungen, die heute gefällt werden, wirken sich erst nach zehn bis fünfzehn Jahren aus. Das gilt auch für Verbote und für aufgeschobene politische Entscheidungen. Wird die Entwicklung gentechnisch veränderter Sorten heute politisch verhindert, stehen sie der Landwirtschaft in den nächsten fünfzehn Jahren nicht zur Verfügung. Dies kann zu einer schweren Hypothek für künftige Generationen werden, die unterbindet, dass sie die möglichen ökonomischen und ökologischen Vorteile derart verbesserter Sorten nutzen können.

Aus der ablehnenden Haltung der deutschen und der europäischen Öffentlichkeit und Politik gegenüber der Grünen Gentechnik resultiert nicht nur ein deutlicher Wettbewerbsnachteil für die hiesige Landwirtschaft und Agrarforschung. Sie trägt auch international zu einer Hemmung der Technologieentwicklung bei. Denn weil Europa eine wichtige Region für den Import von Agrarprodukten ist und bleibt, entscheiden sich exportierende Länder teilweise gegen die Zulassung gentechnischer Anwendungen, um ihre internationalen Absatzchancen nicht zu gefährden. Zudem beeinflusst die steigende Regulierungsdichte in Europa auch die Regulierung in anderen Ländern, was die Zulassung von Einzeltechnologien verlangsamt und verteuert. Daraus erwachsen vor allem für kleinere Firmen und für öffentliche Forschungseinrichtungen weltweit oftmals unüberwindliche Hürden. So wird letztlich gerade jene Entwicklung gefördert, die man eigentlich zu verhindern sucht: Dass auf den Märkten nur einige multinational operierende Firmen tätig sind und auf den Feldern nur wenige Sorten angebaut werden.

Deutschland und die anderen reichen Länder Europas tragen indes nicht nur für sich selbst, sondern auch gegenüber den Entwicklungsländern Verantwortung. Dazu lassen sich auch Bemühungen zählen, geeignete Verfahren für die Züchtung von Nutzpflanzen zu entwickeln, die mit den oft schwierigen Umweltbedingungen der Entwicklungsländer zurechtkommen, mit zunehmendem Dürrestress in den Trockenregionen der Erde zum Beispiel oder mit dem starken Schädlingsdruck der Tropen.

Gerade dafür eröffnen die Verfahren der Gentechnik große Chancen. Sowohl mit Blick auf die folgenden Generationen wie mit Blick auf die Entwicklungsländer lässt sich deshalb feststellen: Die Behinderung oder Blockade einer verantwortungsbewussten Erforschung und Nutzung der Grünen Gentechnik ist ungerechtfertigt und wird unsere Zukunftschancen verringern.

Anhang

Glossar

Allele
alternative Zustandsformen (z. B. A, a) eines Gens, die auf homologen Chromosomen den gleichen Platz einnehmen

Antigen
Stoff, der durch einen Antikörper spezifisch gebunden oder von einer Zelle des Immunsystems als körperfremd erkannt wird

Antisense-Technik
molekularbiologisches Verfahren, um die Aktivität eines bestimmten Gens zu blockieren

Basentriplett
Codierungseinheit aus drei aufeinanderfolgenden Basen, die für eine bestimmte Aminosäure codieren

Chromosom
Träger der Erbinformation im Zellkern, bestehend aus DNA sowie aus Proteinen

Codon
Basentriplett der mRNA

Cyanophycin
Speicherprotein, das von Cyanobakterien (Blaualgen) und einigen anderen Bakterien gebildet wird

Cytoplasma
Gesamtheit des Zellinhaltes außer Organellen, z. B. Chloroplasten, Vakuolen, Zellkern und -wand

cytoplasmatisch-kerngenische männliche Sterilität (CMS)
fehlende oder unvollständige Ausbildung der männlichen Blütenorgane, die durch eine Mutation der mitochondrialen DNA sowie eine Mutation im Kerngenom bedingt ist

diploid
Organismen, die zwei Kopien eines vollständigen Chromosomensatzes (Genom) enthalten, d. h. von jedem Chromosom gibt es jeweils zwei Homologe

DNA
desoxyribonucleid acid (Desoxyribonukleinsäure); Trägerin der genetischen Information

Dominanz, dominant
(vollständige) Dominanz bedeutet, dass sich in einer heterozygoten Pflanze nur ein Allel ausprägt, während das andere (rezessive) nicht ausgeprägt wird

Doppel(t)haploid
nach identischer Verdopplung des haploiden Chromosomensatzes entstandene Pflanze, die vollständig homozygot und diploid ist

Epistasie
Phänomen, dass ein Gen die Merkmalsausprägung eines anderen Gens beeinflussen oder verhindern kann

Gen
klassische Definition: vererbbarer Faktor, der für die Ausprägung einer bestimmten Eigenschaft verantwortlich ist. Molekulare Definition: DNA-Sequenz, die in ein funktionelles Protein umgesetzt werden kann

Genlocus
Ort auf dem Chromosom, an dem ein Gen lokalisiert ist

Genom
Gesamtheit der Erbinformation eines Organismus

Genotyp
Gesamtheit der Erbanlagen eines Organismus, auf ein Gen bezogen: Zustandsform an einem Genlocus (z. B. Aa)

Glufosinat
herbizider Wirkstoff zur Unkrautkontrolle. Die Wirkung beruht auf der Hemmung eines Schlüsselenzyms des Stickstoff-Stoffwechsels (Glutaminsynthetase). Als Folge häuft sich das Zellgift Ammoniak in der Pflanzenzelle an, und die Pflanze stirbt nach wenigen Tagen ab

Glyphosat
herbizider Wirkstoff zur Unkrautkontrolle. Glyphosat hemmt ein Schlüsselenzym zur Synthese aromatischer Aminosäuren(EPSP-Synthetase), das im Chloroplasten lokalisiert ist

Haploide
Zellen oder Individuen, die nur einen Chromosomensatz enthalten

Heterosis
nach Kreuzung bestimmter Inzuchtlinien in der ersten Nachkommenschaftsgeneration (F1) auftretende besondere Wüchsigkeit, die den leistungsstärkeren Elter oder das Elternmittel übertrifft

Heterozygotie
Mischerbigkeit; Auftreten unterschiedlicher Allele (*Aa*)

homologe Rekombination
In der Molekularbiologie und der Gentechnik sind homologe (gleiche) DNA-Sequenzen von Bedeutung, d. h. Sequenzen mit identischer Abfolge der Basen. So kann man mithilfe identischer DNA-Abschnitte im Genom beispielsweise Gene oder DNA-Sequenzen gezielt an bestimmten Stellen einfügen

Homozygotie
Rein- oder Gleicherbigkeit; Auftreten identischer Allele (AA, aa)

horizontaler Gentransfer
zufällige Übertragung von Genen zwischen Arten verschiedener Reiche. Im Zusammenhang mit gentechnisch veränderten Pflanzen ist meist die Übertragung von pflanzlichen Transgenen auf im Boden lebende Mikroorganismen (z. B. Bakterien) gemeint

Hybride
heterozygotes Individuum aus der Kreuzung genetisch verschiedener Eltern

kanonische Aminosäure
proteinogene Aminosäuren, die durch Codons des genetischen Materials kodiert werden

Konjugation
Übertragung von Erbmaterial zwischen Bakterien mittels einer Plasmabrücke

Linienzüchtung
Bezeichnung für Züchtungsverfahren bei selbstbefruchtenden Arten, an deren Ende eine weitgehend homozygote Sorte (Linie) steht

Marker-Gen
gentechnisch eingefügte Sequenz, dank derer nach einer Transformation transgene Pflanzen am Phänotyp leicht erkannt werden

Mikroinjektion
gezieltes Einschleusen von DNA oder Proteinen in Zellen mithilfe von feinsten Glaskanülen

Mitochondrien
Bestandteile des Cytoplasmas einer Zelle (Zellorganellen), in denen neben anderen Vorgängen die Atmung stattfindet

molekularer Marker
DNA-Abschnitt, der gemeinsam mit einem interessierenden Merkmal oder Gen vererbt wird. Im Falle enger genetischer Kopplung erlaubt der Marker eine indirekte Selektion auf ein züchterisch wichtiges Zielgen

monogen
phänotypische Unterschiede, die nur durch ein Gen bedingt werden

Mutation
vererbbare qualitative oder quantitative Veränderungen der genetischen Information

Mykotoxin
sekundäre Stoffwechselprodukte aus Pilzen, die bei Wirbeltieren bereits in geringsten Mengen giftig wirken. Sammelbezeichnung für eine Gruppe hochgiftiger Stoffwechselprodukte, die von verschiedenen Schimmelpilzarten gebildet werden, etwa Aspergillen oder Fusarien

Nukleotid
Baustein der Nukleinsäure; bestehend aus einer Phosphatgruppe, einem Zucker und einer Base

Phänotyp
Erscheinungsbild eines Individuums als Ergebnis aller erblichen und umweltbedingten Einwirkungen. Im Falle eines Gens ist es das Erscheinungsbild nach Ausprägung dieses Gens

Phytase
Enzym, das Phytinsäure hydrolytisch abbaut und somit gebundenes Phosphat freisetzt

Phytat
Anion der Phytinsäure mit komplexbildenden Eigenschaften. Sie dient in Pflanzen als Speicher für Phosphat und Kationen

Plasmid
extrachromosomale ringförmige DNA in Bakterien, die zur selbstständigen Replikation fähig ist

Plastom
Plastiden (Chloroplasten)-Genom

polygen
phänotypische Unterschiede, die durch das Zusammenwirken vieler Gene bedingt sind

Polyploidie
Vorkommen von mehr als zwei Chromosomensätzen in pflanzlichen Zellen bzw. Pflanzen

Promotor
Erkennungs- und Bindungsstelle auf der DNA, die vor einem Genanfang liegt und für die zeitliche und räumliche Ausprägung eines Gens bedeutsam sind

Protoplastenfusion
chemisch oder elektrisch induzierte Verschmelzung zweier zellwandloser Zellen

QTL
Quantitative Trait Locus: ein Abschnitt eines Chromosoms, der einen signifikanten Einfluss auf die Ausprägung eines quantitativen Merkmals besitzt

rezessiv
Gegensatz von dominant (siehe Dominanz)

Ribosom
Ort der Proteinbiosynthese

RNA
ribonucleic acid, Ribonukleinsäuren sind an der Realisierung der genetischen Information beteiligt

mRNA – messenger RNA
= Boten-Nukleinsäure; Transportform genetischer Information, die beim Ablesen eines Gens im Zellkern entsteht und an den Ribosomen in eine Proteinsequenz übersetzt wird

tRNA – transfer RNA
= Transfer-Nukleinsäure, liefert die Aminosäuren, die an den Ribosomen, basierend auf den Codons der mRNA, in ein Protein übersetzt werden

TILLING (Targeting Induced Local Lesions IN Genomes)
Methode der Genomanalyse, mit deren Hilfe Punktmutationen in einem bestimmten Gen gezielt identifiziert werden können

Transfektion
Übertragung viraler DNA in Bakterienzellen

Transformation
Aufnahme von fremder DNA in eine Zelle und Einbau in das Genom der Empfängerzelle

Transgen
DNA-Sequenz, die nach Transformation stabil in das Genom einer Empfängerpflanze eingebaut worden ist

Transkription
Übersetzung einer DNA- in eine RNA-Sequenz

Translation
Übersetzung der Basenfolge der mRNA in die Aminosäuresequenz eines Polypeptids

Virion – einzelnes Virusteilchen, das sich außerhalb einer Zelle befindet und aus einem oder mehreren Nukleinsäuremolekülen besteht

Literatur

Deutsche Forschungsgemeinschaft, Senatskommission zur Beurteilung von Stoffen in der Landwirtschaft (Hrsg.) (2002): *Mitteilung 7, Schwellenwerte für Produkte aus gentechnisch veränderten Pflanzen*, Wiley-VCH Verlag, Weinheim

Diamond J. (2002): *Evolution, consequences and future of plant and animal domestication.* Nature 418, pp. 700-707

i-Bio Information Biowissenschaften *http://www.biosicherheit.de/de/raps/landwirtschaft/47.doku.html*

James, C. (2008): *Global Status of Commercialized Biotech/GM Crops: 2008.* ISAAA Briefs No. 39, International Service for the Acquisition of Agri-biotech Applications, Ithaca, NY

Ordon und Friedt (1998): *Von Mendel zum Gentransfer. Grundlagen und aktuelle Methoden der Pflanzenzüchtung.* Bonn. Auswertungs- und Informationsdienst für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten (Hrsg.). Verlag Th. Mann

Qaim, M. (2009): *The economics of genetically modified crops.* Annual Review of Resource Economics, Vol. 1, pp. 665-693

Qaim, M. (2005). *Agricultural Biotechnology Adoption in Developing Countries.* American Journal of Agricultural Economics. Vol. 87, No. 5, pp. 1317-1324

Qaim, M., C. E. Pray, D. Zilberman (2008): *Economic and Social Considerations in the Adoption of Bt Crops.* In: J. Romeis, A. M. Shelton, G. G. Kennedy (Eds.). *Integration of Insect-Resistant Genetically Modified Crops within IPM Programs*, pp. 329-356, Springer, New York

Raps-Förderungsfonds, *Raps auf neuen Wegen, 00-Sorten in Züchtung, Anbau und Vermehrung*, Verlag Th Mann, Gelsenkirchen-Buer, 1986

Weiterführende Informationen

Berlin-Brandenburgische Akademie der Wissenschaften: Gentechnologiebericht
www.bbaw.de/bbaw/Forschung/Forschungsprojekte/gentechnologiebericht/de

DFG-Schwerpunktprogramm 1149 „Heterosis in plants“
www.uni-hohenheim.de/plantbreeding/350a/dfg/indexd.html

European Research Area Network „Plant Genomics“ (ERA-PG):
www.erapg.org/everyone

Informationen zur Genomanalyse im Biologischen System Pflanze (GABI):
www.gabi.de

International Service for the Acquisition of Agri-biotech Applications (ISAAA):
www.isaaa.org

Rahmenprogramm „Biotechnologie – Chancen nutzen und gestalten“
www.bmbf.de/pub/rahmenprogramm_biotechnologie.pdf

Stellungnahme der Zentralen Kommission für die Biologische Sicherheit:
www.bvl.bund.de/cln_007/nn_1208608/DE/06__Gentechnik/093__ZKBS/01__Allg__Stellungnahmen/04__pflanzen/Antibiotikaresistenzgene2008.html

The Arabidopsis Functional Genomics Network (AFGN):
www.uni-tuebingen.de/plantphys/AFGN/

Autorinnen und Autoren

Wissenschaftliche Autoren

Professor Dr. Inge Broer
Universität Rostock
Agrar- und Umweltwissenschaftliche Fakultät
Institut für Landnutzung (ILN)
AUF, Agrobiotechnologie
Justus-von-Liebig-Weg 8
18059 Rostock

Dr. Roger Jürgen Busch
Hermann-Schlittgen-Straße 3
83512 Wasserburg

Professor Dr. Christian Jung
Senatskommission für Stoffe und Ressourcen in der Landwirtschaft
Christian-Albrechts-Universität zu Kiel
Institut für Pflanzenbau und Pflanzenzüchtung
Lehrstuhl Pflanzenzüchtung
Olshausenstraße 40
24118 Kiel

Dir. u. Professor PD Dr. Frank Ordon
Julius Kühn-Institut (JKI)
Bundesforschungsinstitut für Kulturpflanzen
Institut für Resistenzforschung und Stresstoleranz
Erwin-Baur-Straße 27
06484 Quedlinburg

Professor Dr. Matin Qaim
Georg-August-Universität Göttingen
Fakultät für Agrarwissenschaften
Department für Agrarökonomie und Rurale Entwicklung
Platz der Göttinger Sieben 5
37073 Göttingen

Professor Dr. Barbara Reinhold-Hurek
Senatskommission für Grundsatzfragen der Gentechnik
Universität Bremen
Arbeitsgruppe Mikrobiologie/Biotechnologie
Laboratorium für Allgemeine Mikrobiologie
Postfach 330440
28359 Bremen

Professor Dr. Uwe Sonnewald
Senatskommission für Grundsatzfragen der Gentechnik
Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg
Department Biologie
Lehrstuhl für Biochemie
Staudtstraße 5
91058 Erlangen

Professor Dr. Andreas von Tiedemann
Senatskommission für Stoffe und Ressourcen in der Landwirtschaft
Georg-August-Universität Göttingen
Department für Nutzpflanzenwissenschaften (DNPW)
Fachgebiet Pflanzenpathologie und Pflanzenschutz
Grisebachstraße 6
37077 Göttingen

Konzeption, Textbearbeitung, Redaktion

Dr. Caroline Möhring
Schevenstraße 59
01326 Dresden

Projektleitung

Dr. Patricia Schmitz-Möller
Programmdirektorin
Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG)
Lebenswissenschaften 1
Kennedyallee 40
53175 Bonn

Bildnachweis

Titel, S. 4, S. 8, S. 38, S. 55 (1), S. 58, S. 64 (links): Bosse und Meinhard
S. 7: DFG (Lichtenscheidt)
S. 11, S. 12 (rechts, 2): Albrecht Serfling (Julius-Kühn-Institut)
S. 12 (links): John Doblay (Wikipedia)
S. 12 (Mitte): Dr. Christina Wegener (Julius-Kühn-Institut)
S. 13 (links, 2), S. 27 (3): Prof. Dr. Christian Jung (Universität Kiel)
S. 13 (rechts, 1), S. 74: United States Department of Agriculture (USDA)
S. 14 (links oben): Gerd Spelsberg / www.biosicherheit.de
S. 14, S. 62, S. 85, S. 86: i-Bio Information Biowissenschaften
S. 14 (Mitte): bene16 (Wikipedia)
S. 14 (rechts): agrarfoto.com
S. 14 (unten): United States Department of Agriculture (USDA), Wikipedia
S. 17: Kopahnke (Julius-Kühn-Institut)
S. 22: Prof. Dr. Melchinger (Universität Hohenheim)
S. 25 (Pflanze): Karlheinz Knoch (www.botanik-fotos.de)
S. 30, S. 60, S. 70, S. 91: sciencephoto.com
S. 33: Prof Dr. Uwe Sonnewald (Universität Erlangen-Nürnberg)
S. 40 (links): Agricultural Research Service (USDA)
S. 40 (rechts): Dr. J. Schlang
S. 42 (oben): Clemson University - USDA
S. 42 (unten): www.entomart.be (Wikipedia)
S. 43: Prof. Bürkert (Universität Kassel)
S. 46 : Janice Carr (Public Health Image Library (PHIL))
S. 48 (links): www.goldenrice.org
S. 48 (links), S. 52, S. 55 (4): istockphoto.com
S. 50: Petr Filippov (Wikipedia)
S. 51: Bayerische Staatsbibliothek
S. 56 (2): BASF
S. 63: fotolia (Kashtalian Ludmyla)
S. 64 (rechts): Wikimedia
S. 77: Claude Renault (www.clauderenault.fr)

Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG)

Die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) ist die größte Forschungsförderorganisation und die zentrale Selbstverwaltungsorganisation der Wissenschaft in Deutschland. Sie dient der Wissenschaft in all ihren Zweigen durch die Förderung von Forschungsprojekten.

Mit einem jährlichen Etat von inzwischen rund 2 Milliarden Euro, die hauptsächlich von Bund und Ländern bereitgestellt werden, finanziert und koordiniert die DFG etwa 21 000 Forschungsvorhaben einzelner Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler sowie von Forschungsverbünden an Hochschulen und außeruniversitären Forschungseinrichtungen.

Anträge auf Förderung werden nach den Kriterien der wissenschaftlichen Qualität und Originalität von Gutachterinnen und Gutachtern bewertet.

Die Aufgabe der DFG umfasst auch die Förderung des wissenschaftlichen Nachwuchses, die Förderung der Gleichstellung von Frauen und Männern in der Wissenschaft in Deutschland, die Pflege der Verbindungen mit der Wirtschaft, die Pflege und den Ausbau der wissenschaftlichen Beziehungen zum Ausland sowie die Beratung von Parlamenten und Behörden in wissenschaftlichen Fragen. So befasst sich die Senatskommission für Stoffe und Ressourcen in der Landwirtschaft mit Fragen des Ressourcenmanagements, der Risikobewertung und des ökologischen Landbaus für nachhaltige Entwicklungsstrategien. Mit grundlegenden Fragen des Verhältnisses von Wissenschaft, Ethik und Recht beschäftigt sich die Senatskommission für Grundsatzfragen der Genforschung.

Zu den Mitgliedsorganisationen der DFG zählen Forschungsuniversitäten, außeruniversitäre Forschungseinrichtungen wie die Max-Planck-Gesellschaft, die Fraunhofer-Gesellschaft und die Leibniz-Gemeinschaft sowie die Akademien der Wissenschaften und weitere wissenschaftliche Organisationen.

Weitere Informationen zur DFG sind im Internet unter *www.dfg.de* verfügbar.

Grüne Gentechnik