Zeitschrift: Agrarwirtschaft und Agrarsoziologie = Économie et sociologie rurales [1980-2007]

Herausgeber: Schweizerische Gesellschaft für Agrarwirtschaft und Agrarsoziologie

Band: - (1994)

Heft: 2

Artikel: Gentechnik in der Pflanzenzüchtung

Autor: Harms, Christian T.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-966395

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 15.07.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

Gentechnik in der Pflanzenzüchtung

Christian T. Harms

1. Gentechnik in der Pflanzenzüchtung: Ein kontroverses Thema

Vielerlei Ängste, falsche Vorstellungen und Unkenntnis prägen weithin die öffentliche Diskussion über Möglichkeiten und Gefahren der Gentechnik. Verständlicherweise sind Betroffenheit und emotionales Engagement am grössten, wo es um Manipulationen am Erbgut des Menschen geht. Doch auch Gentechnik an Pflanzen stösst in weiten Teilen der Bevölkerung Deutschlands und der Schweiz eher auf Ablehnung. Dabei wird gern übersehen, dass Eingriffe in das Erbgut im Rahmen der Tier- und Pflanzenzüchtung seit Jahrhunderten zum Zweck der Domestizierung und Produktionssteigerung vorgenommen wurden (man denke nur an die vielen Hunderassen, die z.T. nur nach ästhetischen oder kosmetischen Vorstellungen ihrer Züchter hergestellt wurden). In anderen Gesellschaften, beispielsweise in Frankreich, in Canada oder in den USA wird die Diskussion weit weniger kontrovers geführt. Dort ist man eher bereit, in der Gentechnik ein neuartiges Verfahren zur Erreichung von als wünschbar oder notwendig akzeptierten Zielsetzungen zu sehen. **Skepsis gegenüber technischem Fortschritt** scheint im deutschsprachigen Raum viel weiter verbreitet als beispielsweise in frankophonen und angelsächsischen Ländern, wo Aufgeschlossenheit und Optimismus im Umgang mit neuen Techniken und ihren Möglichkeiten vorherrschen. Skepsis und Kritik an der Gentechnik könnten vielleicht auch eine besonders markante Ausprägung eines unterschwelligen Zukunfts-pessimismus sein.

Einer Gesellschaft, die Hunger nur aus Medienberichten über ferne Länder kennt, ist der **Wert einer gesicherten Nahrungsmittelproduktion** wohl nur schwer vermittelbar. Dies insbesondere dann, wenn laufend von Überschüssen, Agrarsubventionen, Erntevernichtungsaktionen und dergleichen berichtet wird. Es muss vielen widersinnig erscheinen, dass Forscher immer neue Wege ersinnen, wie die (zumindest in den westlichen Industrienationen) sowieso

schon überbordende landwirtschaftliche Produktion durch neue Verfahren und neue Sorten noch gesteigert, noch effizienter gemacht werden kann. Bedenkenswert in diesem Zusammenhang ist allerdings die Tatsache, dass heutzutage - dank Fortschritten in Landtechnik, Pflanzenzüchtung und Agrarchemie - immer weniger Bauern Nahrungsmittel in stets ausreichender Menge, in hervorragender Qualität und zu vertretbaren Preisen für die grosse Mehrheit der nicht-landwirtschaftlichen Bevölkerung zu produzieren in der Lage sind. Der Anteil des Familieneinkommens, der für Nahrungsmittel aufgewendet werden muss, ist seit der Jahrhundertwende stetig gesunken: er lag 1950 noch bei 44%, 1991 war er auf 17 % zurückgegangen. Gleichzeitig haben die angesprochenen Fortschritte vielen Landwirten Einkommenssteigerungen und Arbeitserleichterungen sowie erhebliche soziale Vorteile und einen spürbaren Anstieg an Lebensqualität gebracht. Vorbei sind die Zeiten, wo pro Hektar Zuckerrüben durchschnittlich 50 Arbeitsstunden allein zum manuellen Unkrauthacken aufgewendet werden mussten. Durch Einsatz von Herbiziden reduzierte sich der Arbeitsaufwand um mehr als 90%.

Auch ist der Blickwinkel landwirtschaftlicher Überproduktion ausschliesslich geprägt von den Erfahrungen der letzten 50 Jahre in den westlichen Industrieländern, die gleichzeitig über eine hochentwickelte Landwirtschaft verfügen. Trotz erheblicher Produktivitätssteigerung in den vergangenen Jahrzehnten (Stichwort Grüne Revolution) bleibt aber in den meisten Ländern die Nahrungsmittelproduktion hinter dem Bevölkerungswachstum zurück. Die pro Kopf der Weltbevölkerung landwirtschaftlich bewirtschaftete Fläche betrug 1950 noch 0.6 ha, 1975 noch 0.4 ha, für das Jahr 2000 schätzt man einen Rückgang auf 0.2 ha. Vor diesem Hintergrund kann auf die Möglichkeiten der Produktionssteigerung, wie sie die biotechnologische Forschung anbietet, nicht verzichtet werden.

Gentechnik in der Pflanzenzüchtung verspricht also weitere **Verbesserungen der Produktivität**, d.h. verminderte Kosten bei erhöhtem bzw. sichererem Ertrag. Ertragssicherheit ist eine wichtige primäre Zielgrösse, da sie hilft, eine stabile betriebliche Kalkulationsbasis und gesicherte Familieneinkommen zu schaffen. Darüberhinaus offeriert die gentechnische Pflanzenzüchtung neue Lösungen für z.T. bisher nur schlecht lösbare Probleme. Ob sie sich letztendlich durchsetzen werden, hängt allerdings von ihrer Akzeptanz in der Landwirtschaft einerseits und in der breiten Gesellschaft andererseits ab.

2. Was bringt die Biotechnologie der Pflanzenzüchtung?

2.1 Rascheres Erreichen von Zuchtzielen

Dieser kurze Beitrag kann unmöglich erschöpfend Auskunft auf diese Frage geben, eine gedrängte Übersicht muss genügen. Zunächst einmal sind es veränderte Hilfsmittel, Verfahren und Methoden, mit denen Züchtungsvorgänge beschleunigt und komplexe Zuchtziele schneller erreicht werden können (Tabelle 1).

Tabelle 1: Gentechnische Verfahren in der Pflanzenzüchtung

Bezeichnung	Beschreibung
Marker-gestützte Züchtung	bedient sich molekularer (DNA-) Marker, die mit dem Vorhandensein bestimmter interessierender Merkmale (Züchtungsziele) korreliert sind; das Vorhandensein der für ein bestimmtes Merkmal charakteristischen Marker entscheidet darüber, welche Kreuzungsnachkommen zur Weiterzüchtung verwendet werden, um eine neue Sorte mit den gewünschten Eigenschaften zu entwickeln
Gen-Kartierung	Zuordnung eines bestimmten Erbträgers zu einem bestimmten Chromosomenabschnitt
Gen-Identifizierung und -Isolierung	Erkennung und Isolierung eines bestimmten DNA-Abschnitts, der als Erbträger für ein bestimmtes Merkmal verantwortlich ist; Voraussetzung für Genübertragung
Hybridisierung	Verfahren, die die gezielte Kreuzung von Pflanzen erleichtern; Herstellung von neuen Hybridsorten in Kulturpflanzen (Ertragssteigerung gegenüber normalen Sorten, vgl. Hybridmais)

Ein zweiter überaus wichtiger Schwerpunkt liegt in der Herstellung von transgenen Sorten, in die neue genetische Eigenschaften gezielt übertragen wurden (Tabelle 2).

Gentechnische Pflanzenzüchtung wird beispielsweise Sorten mit **verbesserten Resistenzeigenschaften** entwickeln. Diese Sorten zeichnen sich dadurch aus, dass sich, dank der gentechnischen Übertragung von spezifischen Abwehrmechanismen, die Pflanze selbst gegen äussere Bedrohungen zur Wehr setzen kann. Damit wird in zunehmendem Umfang der Einsatz von chemischen Pflanzenschutzmitteln zurückgehen. Schon aus diesem Grund ist die Ablehnung der gentechnischen Methoden in der Pflanzen-züchtung, die gerade von manchen Umweltschützern vehement vorgetragen wird, nur schwer nachzuvollziehen.

Noch immer gehen im Durchschnitt weltweit etwa ein Drittel der erzielbaren Ernteerträge durch Krankheiten und Schädlinge verloren. Besonders dort, wo chemische Pflanzenschutzmassnahmen ökonomisch oder aus anderen Gründen nicht möglich sind, könnte der vermehrte Einsatz resistenter Sorten helfen, vorhandene Ertragspotentiale besser auszuschöpfen und vermeidbare Verluste zu minimieren.

Tabelle 2: Transgene Kulturpflanzen mit verbesserten Eigenschaften (Ausblick)

Eigenschafts-komplex	**verbesserte Eigenschaft**
Resistenz	gegenüber • Krankheiten (durch Viren, pilzliche oder bakterielle Pathogene verursacht) • Schädlinge: fressende, saugende, minierende Insekten, Nematoden • Herbizide (Herstellung von Selektivität gegenüber breit wirkenden Aktivsubstanzen)
Stresstoleranz	gegenüber • versalzten Böden • schwermetallbelasteten Böden (Aluminium, Mangan, usw.) • Trockenheit / Wassermangel
Qualitäts-merkmale / Inhaltsstoffe	• Proteine (Enzyme, Antikörper, Peptide) • Stärke (Amylose, Amylopektin) • Öle, Fette, Wachse • Nährstoffgehalt (Protein, Aminosäuren, Vitamine) • Verdaulichkeit (Proteinase Inhibitoren, flatulierende Zucker, usw.) • Lagereigenschaften (verzögerte / gesteuerte Ausreifung, reduzierte Selbstzersetzung) • "bio-pharming" (Herstellung neuer wertvoller Inhaltsstoffe in Pflanzen, z.B. pharmazeutische Wirkstoffe, Ausgangsstoffe für industrielle Synthesen • Nährstoffverwertung durch die Pflanze (Stickstoffeffizienz, Phosphataufschluss

Klimaveränderung, Bodenversalzung, Bodenerosion und Expansion der Ackerflächen in marginale Randzonen erzwingen zunehmend eine Pflanzenproduktion an immer ungeeigneteren Standorten. Nur besser angepasste Sorten werden hier ertragreich angebaut werden können. Hier bietet gentechnische Pflanzenzüchtung die Verfahren, um rasch

die erforderlichen Sorten zu entwickeln, die auch unter limitierenden Bedingungen befriedigende Erträge liefern können.

Es verdient festgehalten zu werden, dass Tabelle 2 keineswegs völlig neuartige oder gar "exotische" Projekte zusammenstellt. Im Gegenteil handelt es sich durchweg um Züchtungsziele, die seit langem von der konventionellen Pflanzenzüchtung verfolgt werden, die mit den herkömmlichen Verfahren aber nur schwer oder nur sehr langsam erreichbar sind. Der gentechnischen wie der konventionellen Pflanzenzüchtung liegen immer ganz konkrete, an den Bedürfnissen der Landwirte, der Verarbeiter oder der Konsumenten sich orientierende Zielvorstellungen zugrunde. Die Gentechnik wird hier durch ihre Präzision und ihre gezielten Eingriffsmöglichkeiten beschleunigend wirken. Da bei der gentechnischen Pflanzenzüchtung die natürlichen Kreuzungsbarrieren zwischen nicht-verwandten Arten unwirksam sind, lassen sich geeignete Erbträger aus praktisch allen Lebewesen für die Züchtung nutzbar machen. Durch diesen Zugriff auf den Genpool aller Organismen erweitern sich die Resourcen der modernen Züchtung ganz grundlegend.

Während die neuen biotechnologisch unterstützten Züchtungs*verfahren* von der Öffentlichkeit wohl kaum wahrgenommen werden dürften, tragen Ernte*produkte* von transgenen Sorten die Kontroverse um die Gentechnik auf jedermanns Frühstückstisch. Die einen werden gentechnisch verbesserte Sorten als unerwünschte Manipulation an der Schöpfung ablehnen, andere sie als willkommene Bereicherung ihrer Lebensmittelauswahl begrüssen. Die amerikanischen Behörden USDA (U.S. Department of Agriculture), FDA (Food and Drug Administration) und EPA (Environmental Protection Agency) haben gerade in diesen Tagen die erste gentechnisch hergestellte neue Pflanzensorte als für Mensch und Umwelt unbedenklich zum Verkehr (und Verzehr) zugelassen. Dem Vernehmen nach verläuft die Einführung der am Stock voll ausreifenden und lagerstabileren **Tomatensorte Flavr Savr®** ("Geschmacksbewahrer") der kalifornischen Biotechnologiefirma Calgene entsprechend den Erwartungen. Insgesamt sind bisher vier transgene Kulturpflanzen von den amerikanischen Behörden nach eingehender Prüfung "dereguliert" worden, d.h. ihr Anbau unterliegt nicht länger der behördlichen Genehmigungspflicht; es sind dies die erwähnte Tomatensorte, Bromoxynil-resistenter Tabak, Bromoxynil-resistente Baumwolle (beide von Calgene) und Glyphosat-resistente Sojabohnen (Monsanto). Der Bromoxynil-resistente Tabak wurde übrigens im Juni

auch von der Europäischen Union freigegeben. Bevor die beiden herbizidresistenten Sorten kommerziell angebaut und mit dem entsprechenden Herbizid behandelt werden können, müssen allerdings Bromoxynil und Glyphosat zum Gebrauch in den betreffenden Kulturen behördlich zugelassen werden (im Rahmen eines normalen Pflanzenschutz-mittelzulassungsverfahrens).

Die ober erwähnte transgene Tomatensorte steht stellvertretend für eine Gruppe von gentechnisch hergestellten neuen Sorten, deren biochemische Eigenschaften gezielt verändert wurden. Tabelle 2 gibt dazu einige Beispiele, auf die hier allerdings nicht weiter eingegangen werden kann. Viele der angesprochenen gentechnischen Neuzüchtungen befinden sich noch in frühen Stadien der Forschung, bei einigen ist die Entwicklung jedoch bereits sehr weit fortgeschritten.

2.2 Wirtschaftliche Auswirkungen

Technologische Veränderungen ziehen wirtschaftliche und soziale Anpassungen nach sich. Es wäre töricht zu meinen, die neuen biotechnologischen Verfahren bildeten hier eine Ausnahme. Es lohnt also, kurz auf die möglichen Auswirkungen im Bereich der Landwirtschaft und der mit ihr verbundenen Industrien einzugehen.

- Dem **Landwirt** werden in Form transgener Pflanzen bald erheblich leistungsfähigere Sorten zur Verfügung stehen. Sein Betriebsaufwand für Pflanzenschutz und Behandlungsmassnahmen wird sich verringern. Düngungseffiziente Sorten werden weniger Düngemittel erfordern. Die Mehrkosten für transgenes Saatgut werden nur einen Bruchteil der eingesparten betrieblichen Aufwendungen betragen. Die Palette der anbaufähigen Kulturen wird sich erweitern, beispielsweise durch Anbau von Sonderkulturen mit besonderen Inhaltsstoffen, die als Industrierohstoffe dienen, oder von Sorten mit besonderen Qualitätsmerkmalen, die bei Verarbeitern oder Endverbrauchern einen besseren Preis erzielen.

- Der **Züchtungsindustrie** stellt die Gentechnik neue Verfahren zur Verfügung, welche geeignet sind, die Präzision und Geschwindigkeit der Sortenentwicklung nachhaltig zu steigern. Diese Effizienzsteigerung ist sehr kapitalintensiv und wird nur von den stärksten der Branche voll umgesetzt werden können. Damit werden sich zwangsläufig Verschiebungen innerhalb dieser

Industrie ergeben. Entgegen landläufiger Meinung wird die Patentierung gentechnischer Erfindungen die Pflanzenzüchtung nicht nachhaltig bremsen, sondern eher beschleunigen. Die Patentierbarkeit biotechnologischer Erfindungen fördert eindeutig die innovative Dynamik in diesem Wirtschaftszweig und gewährt gleichzeitg dem Innovativen Schutz vor der unentgeltlichen Ausnutzung seiner intellektuellen Leistungen durch Dritte. Mit dem gezielten Einsatz biotechnologischer Verfahren tritt die Züchtungsindustrie unverkennbar in eine neue Reife- und Entwicklungs-phase ein.

- Für die **chemische Industrie** werden sich Umsatzeinbussen im Bereich Pflanzenschutzmittel ergeben in dem Mass, wie sich transgene Sorten mit eingebauter genetischer Resistenz gegenüber Krankheiten und Schädlingen im Markt etablieren. Herbizidresistente transgene Sorten werden in gewissem Umfang Marktanteile von selektiven Herbiziden übernehmen und den Gebrauch einiger nicht-selektiver Herbizide fördern. Andere transgene Sorten, die besondere hochwertige Inhaltsstoffe produzieren, werden eine Vielzahl neuer Märkte eröffnen. Der volle Umfang dieser Entwicklung ist heute noch nicht abzuschätzen.

Technologisch-bedingte Umschichtungen in Industrie und Gesellschaft werden entweder als Chance oder als Bedrohung empfunden. Es gilt die Chancen optimal zu nutzen bei gleichzeitiger Minimierung der Nachteile. Anders ist Fortschritt nicht zu haben.

3. Freilandversuche mit transgenen Pflanzen

Freilandversuche mit transgenen Pflanzen sind eine notwendige Voraussetzung für ihren (land)wirtschaftlichen Einsatz. Da Fragen der Sicherheit von transgenen Pflanzen von verschiedenen gesellschaftlichen Gruppen kontrovers bewertet wurden (und werden), standen Freilandversuche von Anbeginn unter dem Genehmigungsvorbehalt staatlicher Behörden. Wegen der intensiveren biotechnologischen Forschung in den USA haben die meisten Freilandversuche genetisch veränderter Pflanzen dort stattgefunden. Eine kürzlich erschienene Publikation der OECD fasst die Erfahrungen aus den Jahren 1986 bis 1992 zusammen.

Demnach sind bis Ende 1992 weltweit insgesamt 864 **behördlich genehmigte Freisetzungsversuche** mit transgenen Pflanzen durchgeführt worden. Bis Ende 1993 stieg die Zahl auf über 1200. Zum heutigen Zeitpunkt dürften es über 2000 sein. Bezogen auf den Stand Ende 1992 haben die USA mit 36.6% den grössten Anteil, dicht gefolgt von Kanada mit 35%[1]. Von den europäischen Ländern haben nur Frankreich (8.9%), Belgien (7.2%) und Grossbritannien (5.2%) einen nennenswerten Anteil. Asiatische Länder spielen bei den Freisetzungen bislang praktisch keine Rolle.

Die bisherigen Freilandversuche verteilen sich auf folgende Kulturpflanzen: Canola (Raps) 33%; Kartoffeln 15%, Tabak und Tomaten je 8.2%, Mais 7.4%, Flachs 5.2%, Sojabohnen 4.6%, Baumwolle 4.4% und Zuckerrüben 3.2%. Diese Aufteilung spiegelt weniger die wirtschaftliche Bedeutung dieser Kulturpflanzen wider, sie ist vielmehr ein Abbild des Fortschreitens der wissenschaftlichen Kenntnis. Zuerst gelang die Übertragung fremder Gene in Tabak (1983), dann folgten Tomate, Kartoffeln und Raps. Tabak kann u.a. wegen seiner besonders leichten zellkulturtechnischen Handhabung geradezu als das "Versuchstier" der pflanzlichen Gentechnologen gelten, an dem viele eigentlich auf andere Pflanzen abzielende Versuche, zunächst ausprobiert werden. Baumwolle, Sojabohnen und Mais sind hingegen erst seit wenigen Jahren genetisch transformierbar und entsprechend weniger häufig sind sie bei den Freilandversuchen der ersten Jahre vertreten. Aus den 390 Zulassungsanträgen des Jahres 1993 in den USA zeichnet sich bereits ab, dass sich das Bild in Zukunft stark verschieben wird zugunsten von Mais und Getreiden, bei denen erst in jüngerer Zeit Genübertragungen reproduzierbar gelangen. Von den 276 Anträgen nach dem verkürzten Verfahren entfielen 85 (31%) auf Mais, 48 (17%) auf Sojabohnen, 31 (11%) auf Kartoffeln und 26 (9.4%) auf Baumwolle.

Unter den übertragenen **neuen Merkmalen** ragen Herbizidresistenz (39%) und der Gebrauch von Markergenen (meist Antibiotikaresistenz, 30%) besonders heraus. Hieraus kann leicht der falsche

---

[1] Der hohe Anteil Kanadas resultiert allerdings aus der verwendeten besonderen Zählweise: Hier wird jeder einzelne Freilandversuch als eigenständige Freisetzung gewertet, selbst wenn es sich streng genommen nur um eine Wiederholung mit dem gleichen Pflanzenmaterial an einem anderen Ort handelt. Daraus ergibt sich auch der unverhältnismäßig hohe Anteil von Canola.

Eindruck entstehen, dies seien die von Industrie und Forschung bevorzugten Merkmale gentechnisch veränderter Pflanzen, die jetzt einer wirtschaftlichen Verwertung zugeführt werden sollten. Die Erklärung für die Überbetonung dieser zwei Merkmale ist jedoch viel prosaischer: Herbizidresistenz und Antibiotikaresistenz waren die ersten Gene, die man isoliert hatte und übertragen konnte. Sie bieten den Vorteil, dass mit ihrer Hilfe leicht die zunächst wenigen transgenen Zellen von den vielen nicht interessierenden nicht-transformierten Zellen abgetrennt werden können, in dem man das Zellgemisch der wachstumshemmenden Wirkung einer Herbizid- bzw. Antibiotikabehandlung aussetzt.

Seit April 1993 praktiziert die für die Freisetzung transgener Pflanzen zuständige U.S. Behörde (USDA-APHIS, Animal and Plant Health Inspection Service) ein **vereinfachtes Zulassungsverfahren**. Der Antragsteller braucht danach der Behörde seinen beabsichtigten Freilandversuch nur noch mitzuteilen, ein eigentliches Genehmigungsverfahren, wie vorher üblich, entfällt. Diese Regelung gilt zunächst nur für die sechs Kulturpflanzen, zu denen in den vorangegangenen Freisetzungen die weitreichendsten Erfahrungen gesammelt wurden: Mais, Soja, Kartoffeln, Baumwolle, Tabak und Tomate. Für andere transgene Pflanzen gilt weiterhin das bisherige Zulassungs- und Genehmigungsverfahren, für das eine umfangreiche wissenschaftliche Dokumentation vorgelegt werden muss. Mit dem vereinfachten Verfahren trägt die Behörde dem Erkenntnisstand Rechnung, der aus über 350 US-Freilandversuchen mit transgenen Pflanzen gewonnen wurde. Dabei haben sich keine Anhaltspunkte für eine dauerhafte oder gar irreversible Schädigung der Umwelt ergeben. Die Erfahrungen bestätigen im Gegenteil die These, dass von transgenen Pflanzen kein prinzipiell anderes Risiko ausgeht als von konventionell gezüchteten neuen Sorten. Zu diesem Ergebnis kommt übrigens auch eine deutsche Untersuchung zur Technikfolgenabschätzung, die vom Wissenschaftszentrum Berlin am Beispiel herbizidresistenter transgener Pflanzen unter Beteiligung von Wissenschaft, Behörden, Umweltgruppen und Industrie durchgeführt wurde.

Industrie und Forschungsinstitute haben das vereinfachte Zulassungsverfahren einhellig begrüsst, da es sie von einem Wust bürokratischer Auflagen befreit. Die Entwicklung von transgenen Sorten zur Marktreife, die ja jahrelange Feldversuche, wiederholte Lei-

stungsprüfungen und Saatgutvermehrung erfordert, wird durch diesen Schritt der USDA spürbar vereinfacht und beschleunigt.

Die wichtigsten **Erkenntnisse und Schlussfolgerungen** aus acht Jahren kontrollierter Freisetzung von transgenen Pflanzen lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Nur der kontrollierte Versuch unter Freilandbedingungen bringt Aufschluss, Daten und Erkenntnisse, die es zur Beurteilung der tatsächlichen gegenüber den rein spekulativen Risiken braucht.
- Die Freisetzungen wurden von umfangreichen wissenschaftlichen Versuchen begleitet, um vermutete wie vermeintliche Risiken eingehend zu untersuchen. Dabei ging es beispielsweise um die Frage der möglichen Verwilderung einmal freigesetzter transgener Pflanzen, die Frage der Übertragung von Pollen von der transgenen Pflanze auf nicht-transgene Artgenossen in der Umgebung (und umgekehrt), die Frage der Beeinflussung von Bodenmikroorganismenpopulationen durch Rückstände transgener Pflanzen, die Frage des Gentransfers aus den transgenen Pflanzen auf Bodenmikroorganismen, usw.
- Es haben sich keine überraschenden Befunde ergeben, nach denen einer transgenen Pflanze ein prinzipiell anderes oder ein grösseres Risiko anhaftet als Sorten, die rein konventioneller Züchtung entstammen. Transgener Mais verhält sich eben wie Mais, nicht wie ein neuartiger Monsterorganismus, wie oftmals von Kritikern befürchtet wurde. Es ist ja auch nur schwer einsehbar, wieso ein Organismus mit mindestens 50'000, wahrscheinlich aber 100'000 Genen durch den Einbau von einem (oder einigen wenigen) zusätzlichen Genen sich plötzlich grundlegend anders verhalten sollte. Erfahrungen mit Gen-Neukombinationen, wie sie bei jeder konventionellen Kreuzung entstehen, sowie mit Mutanten (spontan auftretenden Erbgutänderungen) zeigten, wie unbegründet eine solche Annahme ist. Allerdings kann man erst jetzt, nach den Erfahrungen der Freisetzungen, fundierte Aussagen über das Verhalten transgener Pflanzen unter Freilandbedingungen machen.

4. Gentechnik in der Pflanzenzüchtung: Ein Beispiel aus der Praxis

Das nachfolgend ausführlicher vorgestellte Beispiel von transgenem insektenresistentem Mais soll ein spezifisches Forschungsprojekt von Ciba vorstellen. Dabei wird auf einige Aspekte der molekularbiologisch-gentechnischen Züchtungsmethoden eingegangen, es sollen aber auch einige allgemein interessierende Fragen im Zusammenhang mit transgenen Pflanzen erläutert werden.

Die hier vorgestellten Resultate wurden von mehreren interdisziplinären Arbeitsgruppen am Agricultural Biotechnology Research Institute der Ciba in Research Triangle Park (North Carolina) erarbeitet, dem der Autor selbst als Research Manager von 1984 bis 1991 angehörte. An diesem Institut mit ca. 120 Mitarbeitern ist der überwiegende Teil der landwirtschaftlich biotechnologischen Forschung der Ciba konzentriert. In der Hauptsache befasst man sich dort mit der Herstellung neuartiger transgener Pflanzen und Mikroorganismen, von der Konzeption über die notwendige molekularbiologische Erforschung funktionaler Mechanismen bis zur Realisierung von Prototypen transgener Pflanzen mit neuen Eigenschaften, die dann als Ausgangsmaterial einer Sortenentwicklung in die Züchtung eingehen.

4.1 Transgene Pflanzensorten: Krankheits- und Schädlingsresistenz durch genetisch program mierte Abwehrmechanismen

Die Leitidee, die jeder schädlings- oder krankheitsresistenten transgenen Pflanze als Konzept zugrundeliegt, ist im Prinzip ganz einfach: Mit entsprechenden Erbträgern für wirksame Abwehrmechanismen ausgestattet, sollte die Pflanze in der Lage sein, sich selbst gegenüber Krankheiten und Schädlingen zur Wehr zu setzen. So macht es die Natur ja allemal: Kein Organismus könnte auf Dauer überleben, keine Art bestehen, wenn sie nicht dank körpereigener (und das heisst: in ihrem genetischen Bauplan festgelegter) Abwehrkräfte immer wieder gegenüber Bedrohungen von aussen die Oberhand behielten. Jeder Organismus verfügt also von Natur aus über die genetischen Anlagen, welche das Arsenal der in Notsituationen mobilisierbaren Abwehrkräfte bestimmen. Wenn unsere **körpereigenen Abwehrkräfte**, z.B. bei einer heftigen Attacke

durch einen Krankheitserreger nicht ausreichen, greifen wir zur Medizin. Werden Nutzpflanzen über das Mass ihrer genetischen Resistenzkräfte hinaus durch Schädlinge oder Krankheiten bedroht, sorgt der Landwirt mit geeigneten Pflanzenschutzmassnahmen dafür, dass es nicht zu einem unzumutbaren Ernteausfall kommt.

Wenn es denn stimmt, dass alle Organismen (also auch unsere landwirtschaftlichen Nutzpflanzen) über wirksame körpereigene Abwehrmechanismen verfügen, die in ihren Genen niedergelegt sind, wie kann es dann Sinn machen, Insektenresistenz als transgene Eigenschaft gentechnisch in eine Maissorte einzubauen?

Dafür gibt es mehrere Erklärungen. Beispielsweise bieten Pflanzen in Monokultur hervorragende Bedingungen für die massenhafte Vermehrung von Schädlingen und Krankheiten. Die Bedrohung durch Schädlinge und Krankheiten ist also ungleich intensiver als bei Pflanzen, die in geringer Dichte zerstreut wachsen. Weiterhin besitzen auf hohen Ertrag gezüchtete Sorten häufig nicht die gleichen (oder gleich wirksamen) Erbträger wie ursprüngliche Sorten und Wildpflanzen, da im Zuge der Domestizierung und Leistungs-züchtung viele erwünschte genetische Eigenschaften verlorengehen. Entscheidend nach meiner Auffassung ist allerdings, dass Abwehrkräfte zwar ausreichend vorhanden sind, um einem Befall zu widerstehen, dass sie aber nicht immer genügend wirksam sind, um ohne Ertragseinbussen mit dem Befall durch Krankheitserreger oder Schädlinge fertig zu werden. Wir verlangen von einer Hochleistungssorte ja nicht, dass sie Attacken von Krankheiten und Schädlingen einfach nur übersteht; wir verlangen trotz Befall einen gleichbleibend hohen und gesicherten Ertrag. Es leuchtet ein, dass dieser Anspruch nur mit einem sehr effizienten Pflanzenschutz einlösbar ist, sei es nun durch von aussen applizierte Pflanzenschutzmittel oder durch gentechnischen Einbau von zusätzlichen wirksamen Selbstschutzmechanismen.

4.2 Der Maiszünsler - ein wichtiger Maisschädling

Das hier vorgestellte Beispiel gentechnischer Pflanzenzüchtung behandelt die Entwicklung von transgenem Mais, der gegenüber Maiszünsler *(Ostrinia nubilalis)* resistent gemacht wurde. Welche Bedeutung hat dieser Schädling im Maisanbau?

Der Maiszünsler, als adultes Tier eine unscheinbare Motte, gehört zur Gruppe der Lepidopteren (schmetterlingsartige Insekten). Er wurde von Europa nach Nordamerika verschleppt, daher seine englische Bezeichnung, "European Corn Borer". Er durchläuft meist zwei Generationen pro Sommer. Die Larven (Raupen) der ersten Generation ernähren sich überwiegend von Blattmaterial und Pollen und richten dabei nur relativ geringen Schaden an. Meist werden nur 5 - 20 % der Pflanzen befallen. Die Larven der zweiten Generation befallen hingegen zwischen 50 und 80% der Pflanzen eines Bestandes. Nach kurzem Frass an der Pflanzenoberfläche bohren sie sich in den Stengel ein, den sie durch ausgedehnten Minierfrass in seiner Standfestigkeit schwächen. Der Stengelbruch verursacht Ernteverluste, die - bei weltweit mehr als 20 Millionen betroffener Hektare - in Nordamerika und in der restlichen Welt auf je 1 Milliarde Dollar geschätzt werden. Durch die versteckte Lebensweise ist dem Schädling durch Insektizide praktisch nicht beizukommen, wenn die Behandlung nicht gerade in der sehr kurzen Zeitspanne zwischen dem Schlüpfen der Larven und ihrem Einbohren erfolgt.

4.3 Insektizide δ-Endotoxine aus Bacillus thuringiensis

Nach der Definition des Ziels und seiner ökonomischen Bedeutung sind wir rasch bei einer entscheidenden Frage angelangt: Woher nehmen wir den Erbträger, der einen wirkungsvollen Schutz gegenüber dem Schädling gewährleistet, und den wir als transgenen Abwehrmechanismus in unsere Maissorte übertragen wollen?

Im hier diskutierten Fall war die Antwort vergleichsweise einfach. Es war seit langem bekannt, dass *Bacillus thuringiensis (B.t.)*, ein weltweit in zahlreichen Stämmen und Varianten verbreitetes Bodenbakterium einen bzw. mehrere Eiweisskristalle (sogenannte δ-Endotoxine) produziert, die insektizide Wirkung besitzen. Interessanterweise finden sich in verschiedenen Stämmen Proteine mit recht unterschiedlicher Wirkung (vgl. Tabelle 3).

Tabelle 3: Bacillus thuringiensis *als Quelle von Erbträgern für hochspezifische insektizide Proteine*

Bakterien-stamm	**insektizide Wirkung gegen**	**Beispiel**
var. *kurstaki*	Lepidoptera (Motten)	Maiszünsler, Schwammspinner
var. *aizawai*	Lepidoptera (Motten)	Maiszünsler, Schwammspinner
var. *israelien-sis*	Diptera (Zweiflügler)	Stechmücken
var. *tenebrionis*	Coleoptera (Käfer)	Kartoffelkäfer, Corn Root Worm
var. *san diego*	Coleoptera (Käfer)	Kartoffelkäfer, Draht-würmer

Die Wirkung dieser insektiziden Proteine macht man sich seit langem als Pflanzenschutzmittel zunutze. Produkte auf der Basis von *B. thuringiensis*, die als pulverige Sporen-Präparate bzw. abgetötete Bakterien im Handel sind, gelten als besonders sicher und umweltfreundlich. Dafür sind folgende Eigenschaften verantwortlich:

- Die **Wirkung ist hochspezifisch**, betrifft also nur einen sehr kleinen Kreis von Zielorganismen. Die Wirkung entfaltet sich nur bei oraler Aufnahme, es gibt keine Kontaktwirkung. Nutzinsekten werden geschont.
- Im Fall des gegen Maiszünsler aktiven δ-Endotoxins aus *B.thuringiensis* var. *kurstaki* wird eine inaktive Vor-Form des Proteins (Pro-Toxin) mit einer molekularen Masse von ca. 120 kDa erst im alkalischen Milieu des Mitteldarms der Insektenlarven durch Spaltung in seine aktive Form überführt, die nurmehr 67 kDa gross ist.
- Für Wirbeltiere sind diese insektiziden *Bt*-Proteine ungefährlich, sie werden wie andere Proteine in der Nahrung durch eiweissspaltende Enzyme abgebaut. Da der Verdauungstrakt dieser Organismen im sauren pH-Bereich arbeitet, kann es auch nicht zu einer Aktivierung des insektiziden Proteins kommen.

- Dies alles hat dazu geführt, dass von seiten der behördlichen Zulassung **keine Wartefristen bei der Anwendung** eingehalten werden müssen: *Bt*-haltige Produkte können beispielsweise noch am Tage des Verzehrs auf Gemüse verwendet werden. In der Umwelt werden die *Bt*-Proteine durch UV-Licht rasch inaktiviert.

4.4 Gezielte molekulare Eingriffe zur Steigerung der Wirksamkeit des δ-Endotoxin-Gens

Auf die Details der molekularbiologischen Arbeitsgänge, die erforderlich sind, um ein bestimmtes Gen aus einem Organismus zu isolieren, kann hier nicht eingegangen werden. Sie sind zahlreich und komplex, aber inzwischen Routine. Einige sinnreiche Vorkehrungen, mit denen die Wirksamkeit des δ-Endotoxin-Gens in Mais beträchtlich gesteigert werden konnte, sollen aber angesprochen werden.

In *B.thuringiensis* wird die Expression des Gens für das δ-Endotoxin selbstverständlich durch bakterielle, d.h. bakterienspezifische, Steuerungssignale reguliert. Massgeblich an der **Steuerung** beteiligt ist eine DNA-Sequenz, der sogenannte Promoter, der dem zu regulierenden Gen vorgeschaltet ist. Diese Sequenz besitzt in Bakterien eine andere Struktur als in höheren Organismen. Um also ein Bakteriengen in einer Pflanze zur Ausprägung zu bringen, bedarf es eines Promoters, der die erforderliche pflanzenwirksame Struktur aufweist. Je nach der gewünschten Expression hat man die Wahl zwischen sogenannten konstitutiven Promotoren, die für eine andauernde Expression in praktisch allen Geweben sorgen, und spezifisch wirksamen Promotoren. Damit lässt sich die Expression des zu regulierenden Gens beispielsweise in einem bestimmten Entwicklungsstadium, gewebespezifisch oder als Folge eines von aussen einwirkenden Steuersignals (Temperatur, Stress, hormonale Signale, chemische Effektoren usw.) gezielt beeinflussen.

Die zweite Veränderung zur Wirkungssteigerung betraf die **Länge des Gens**. Es war schon erwähnt worden, dass das wirksame δ-Endotoxin erst im Mitteldarm der Insektenlarven aus einer viel grösseren Vorstufe (Pro-Toxin) gebildet wird. Man hat nun herausgefunden, dass die insektizide Wirkung auf dem vorderen (N-terminalen) Abschnitt des Proteinmoleküls beruht. Das Fehlen eines kurzen Abschnitts am N-terminalen Ende sowie der ganzen C-terminalen Hälfte des Moleküls schmälert seine Wirkung nicht. Entsprechend

kann der genetische Bauplan, das Gen für das δ-Endotoxin, verkürzt werden. Die Verkürzung hat mehrere praktische Vorteile. Zum einen ist das verkürzte Molekül stabiler, die Gefahr, dass es beim Ablesen des Erbträgers (Transkription) oder bei der eigentlichen Synthese des δ-Endotoxin-Proteins (Translation) zu einem Strangunterbruch kommt, ist wesentlich geringer. Zum anderen braucht die Herstellung eines kürzeren Moleküls weniger Energie und weniger metabolische Reserven. Das kann ins Gewicht fallen, da bei kräftiger Expression das δ-Endotoxin bis zu 1% des von der Pflanze gebildeten Proteins ausmachen kann.

Die dritte Veränderung ist technisch am anspuchsvollsten. Sie betrifft den **gezielten Austausch von DNA-Bausteinen,** um die Sequenz des Gens dem Kodongebrauch von Mais anzupassen. Zum Verständnis muss man folgendes wissen: Jede der zwanzig Aminosäuren, aus denen Proteine aufgebaut sind, wird durch eine Abfolge von drei Nukleinsäurebasen in der DNA-Sequenz eines Gens kodiert. Es gibt vier verschiedene Nukleinsäurebasen (Adenin, Guanin, Thymin, Cytosin), deren lineare Anordnung (Sequenz) wie die Buchstaben eines Textes den Informationsgehalt jedes Gens speichern. Zum Aufbau des doppelsträngigen DNA-Moleküls paaren sich die Basen in spezifischer Weise, nämlich Adenin-Thymin und Guanin-Cytosin. Die Variation von vier möglichen und jeweils drei am Aufbau eines Kodons beteiligten Nukleinsäurebasen ergibt 64 Kombinationsmöglichkeiten, deutlich mehr also, als für die Kodierung der 20 Aminosäuren erforderlich sind. Das bedeutet, dass einige Aminosäuren von mehr als einem Kodon kodiert werden. Man spricht hier von der Redundanz des genetischen Codes. Tabelle 4 gibt einige Beispiele:

Tabelle 4: Redundanz des genetischen Codes (Beispiele)

Aminosäure	**Kodon***
Arginin	AGA AGG CGA CGG CGC CGU
Leucin	UUA UUG CUU CUG CUC CUA
Serin	AGC AGU UCU UCG UCC UCA
Valin	GUA GUC GUU
Glutamin	CAG CAA
Tryptophan	UGG

* nach üblicher Konvention ist hier der Code der mRNA verwendet (A=Adenin, C=Cytosin, G=Guanin, U=Uracil; RNA besitzt Uracil anstelle von Thymin; Uracil paart wie Thymin mit Adenin)

Während beispielsweise für Arginin, Leucin und Serin je sechs verschiedene Kodons zur Verfügung stehen, werden andere Aminosäuren durch drei, zwei oder sogar nur ein spezifisches Kodon kodiert (vgl. Tabelle 4). Zur Synthese eines Proteins werden die an sogenannte tRNA (Transfer-RNA) gebundenen Aminosäuren entsprechend der Basensequenz der mRNA (messenger RNA), die wiederum eine komplementäre Kopie der eigentlichen Erbinformation der DNA ist, linear miteinander verknüpft. Dabei muss jede tRNA nach dem Prinzip der Komplementarität das für ihre Aminosäure richtige Kodon erkennen. Sie besitzt dazu eine spezifische Bindungsstelle, das Antikodon, welches dem Kodon der mRNA komplementär ist. Für jedes Kodon gibt es also genau *eine* passende tRNA, für Arginin also insgesamt sechs verschiedene tRNAs, die immer dann verwendet werden, wenn das entsprechende Kodon in der mRNA auftaucht. Falls keine tRNA mit dem richtigen Antikodon vorhanden ist, kommt es zur Unterbrechung der Proteinsynthese. Das bis dahin gebildete Proteinbruchstück ist nicht funktionsfähig und wird rasch wieder abgebaut.

Redundanz des genetischen Codes bedeutet: die gleiche Information wird durch mehrere verschiedene Kodons gespeichert. Konkret bedeutet dies, dass der Verlust einer bestimmten Kodierungsmöglichkeit, sagen wir GUU für die Aminosäure Valin, für den Organismus folgenlos bleiben wird, da immer noch die Kodons GUA und GUC die gleiche Information beinhalten. So wird verständlich, dass im Lauf der Evolution, durch fortgesetzte Mutation, manche Organismen - beispielsweise - für Valin bevorzugt das Kodon GUA verwenden, während andere GUC oder GUU vorziehen. So kommt es, dass der

Kodongebrauch in *Bacillus thuringiensis* erheblich vom Kodongebrauch in Mais abweicht. Die Folge ist, dass das bakterielle Gen im Mais nicht in ein funktionierendes δ-Endotoxin-Protein übersetzt werden kann. Erst die (synthetische) Anpassung der primären DNA-Sequenz des bakteriellen δ-Endotoxin-Gens an den Kodongebrauch im Mais erlaubt die Produktion des insektiziden Proteins in der Pflanze. Um es nochmals deutlich hervorzuheben: durch diese Anpassung wird lediglich die kodierende Basensequenz des Gens gezielt verändert, die Aminosäuresequenz des vom Mais produzierten Proteins bleibt exakt die gleiche wie die des bakteriellen Proteins. Denn nur die richtige Proteinsequenz gewährleistet ja die insektizide Wirksamkeit des δ-Endotoxins.

4.5 Die Übertragung isolierter Gene in Pflanzen

Nach der molekularen Feinarbeit bei der Isolierung eines Gens und seinem Einbau in ein expressionsfähiges Genkonstrukt braucht es die Kenntnisse und Fähigkeiten von Zellbiologen, um das Gen als neuen Erbträger im Erbgut einer Empfängerpflanze stabil einzubauen. Lange Jahre bildete dieser Schritt bei vielen Kulturpflanzen, insbesondere aber bei jenen aus der Gruppe der *Gramineen*, eine beträchtliche technische Hürde. Inzwischen sind **alle Getreidearten**, also Reis, Weizen, Gerste, Mais usw., **genetisch transformierbar**. Es haben sich sogar mehrere brauchbare Verfahren herausgebildet, die immer mehr zur Routine werden. Bei einem dieser Verfahren werden winzige Gold- oder Wolframkügelchen äusserlich mit der zu übertragenden DNA beladen und durch kräftige Beschleunigung in pflanzliche Zellen geschossen. Bei einem anderen Verfahren macht man sich die Fähigkeit des Bodenbakteriums *Agrobacterium tumefaciens* zunutze, das von Natur aus einen Teil seiner Erbinformation in Pflanzenzellen übertragen kann.

Es würde den Rahmen dieses Beitrags sprengen, auf die technischen Details der Genübertragung in Pflanzen einzugehen. Nur soviel sei gesagt: Jede Genübertragung (Transformation) beginnt in einer einzigen Zelle, die ein fremdes Genkonstrukt aufgenommen hat. Die Arbeit der Zellbiologen besteht nun darin, diese Zelle zu vermehren und aus ihr einen kompletten, voll funktionsfähigen pflanzlichen Organismus zu regenerieren. Dabei gilt es, die transgene Zelle gezielt zu fördern und sie von den vielen nicht-transformierten Zellen

abzutrennen. Meist bedient man sich dazu eines sogenannten **Selektionsmarkers**, der zusammen mit dem interessierenden Gen (hier: dem δ-Endotoxin-Gen aus *Bacillus thuringiensis*) übertragen wird. Es handelt sich dabei häufig um ein Gen, das eine selektierbare Eigenschaft wie Antibiotika- oder Herbizidresistenz befördert. Wird das Zellgemisch dem Wirkstoff ausgesetzt, überleben nur die transgenen Zellen, die dieses Gen exprimieren.

Bei der Regeneration von funktionsfähigen Pflanzen aus isolierten Zellen wurden in den letzten zehn Jahren beachtliche Fortschritte gemacht, ohne die die pflanzliche Gentechnik nicht den Sprung aus den Labors der Grundlagenforschung in die pflanzenzüchterische Praxis geschafft hätte. Ein Punkt verdient noch hervorgehoben zu werden: Gentechnik mit Pflanzen ist zuallermeist Gentechnik mit somatischen Zellen. Denn Pflanzen lassen sich, in fundamentalem Gegensatz zu Tieren, aus normalen Körperzellen regenerieren.

4.6 Expression des δ-Endotoxin-Gens in transgenen Pflanzen

Wie sich die oben beschriebenen molekularen Veränderungen am δ-Endotoxin-Gen auswirken, wurde in Versuchen zur Expression der verschiedenen Gen-Varianten in transgenen Mais- und Tabakpflanzen getestet (Tabelle 5). Bei allen Varianten war der bakterielle Promoter durch einen pflanzenwirksamen Promoter ersetzt worden.

Tabelle 5: Expression von modifizierten δ-Endotoxin-Genen aus Bacillus thuringiensis *in transgenem Tabak und Mais*

Form des Gens	Expression in transgenen Pflanzen*	
	Tabak	*Mais*
bakterielles Gen in voller Länge	-	-
bakterielles Gen, verkürzt	+	-
synthetisches Gen**, verkürzt	++	++

* gemessen als Produktion von spezifischer mRNA, als Produktion des d-Endotoxin-Proteins (immunologischer Nachweis durch spezifische Antikörper) sowie durch die insektizide Wirkung auf *Manduca sexta* (als Testlarven)

** DNA-Sequenz modifiziert gemäss Kodongebrauch in Mais

Die Versuche zeigen: Zur vollen Funktionsfähigkeit des δ-Endotoxins in Mais braucht es offensichtlich die beschriebenen spezifischen molekularen Anpassungen.

Die Wirkung des δ-Endotoxin-Gens in den transgenen Pflanzen ist eindrücklich: Tabakpflanzen zeigen kaum erkennbare Frassspuren, während Kontrollpflanzen, die das Gen nicht enthalten, nach wenigen Tagen kahlgefressen sind. Sowohl *Manduca sexta* (tobacco hornworm) als auch *Heliothis zeae* (earworm, cotton bollworm) reagieren gleichermassen empfindlich: Nach wenigen Bissen stellen die Larven das Fressen ein, versuchen auf Nachbarpflanzen abzuwandern und gehen nach kurzer Zeit zugrunde. In transgenem Mais kommt es nicht zu dem gefürchteten Minierfrass, das Einbohren der Maiszünslerlarven in den Stengel unterbleibt in den meisten Fällen. Künstlich mit Maiszünsler infestierte Testparzellen von resistentem transgenem Mais erbrachten einen Mehrertrag von 35% gegenüber normalem Mais, natürlich infestierte Parzellen der resistenten Sorte produzierten einen um 16% höheren Kornertrag als die nicht-resistente Vergleichssorte.

5. Ausblick

5.1 Ökonomische Vorteile

Bei der Beschreibung des Forschungsprojektes "Maiszünslerresistenz" konnten die meisten der vielen Arbeitsschritte nicht in ihrer vollen Komplexität dargestellt werden. Dennoch kann man den Eindruck gewinnen, dass es beachtlicher wissenschaftlich-technischer Anstrengungen bedarf, um transgene Pflanzensorten zu entwickeln. Warum dieser Aufwand?

Wir wollen uns zum Vergleich das **ökonomische Potential** in Erinnerung rufen, welches die genetisch verankerte Maiszünslerresistenz der neuen transgenen Sorten erschliesst. Falls es gelänge, die durch Maiszünsler in Europa und den USA verursachten Schäden vollständig zu vermeiden, könnten pro Jahr zwischen 7 und 11 Millionen Tonnen Mais mehr geerntet werden (Kornertrag). Dies entspricht der gesamten jährlichen Maisproduktion von Kanada, oder ca. 15 % des Maisbedarfs der USA (Bevölkerung: 240 Millionen). Wem Mehrertrag kein erstrebenswertes Ziel bedeutet, dem sei gesagt, dass bei insgesamt gleichbleibender Maisproduktion der Anbau von maiszünslerresistenten Sorten ca. 1 Million Hektar Akkerland freisetzen würde, die dann auf andere Weise genutzt werden könnten (andere Kulturen, Bioalkohol, Landschaftsschutz, Naturparks, usw.).

Dieses wirtschaftliche Potential kann allerdings nur erschlossen werden, wenn Landwirte mit dem Anbau der neuen resistenten Sorten einen **betriebswirtschaftlichen Vorteil** realisieren können. In erster Linie bieten diese Sorten dem Landwirt **Ertragssicherheit** bei Befall mit Maiszünsler, mit anderen Worten, Schutz vor möglicherweise eintretenden Ernteverlusten. Der Mehrpreis für das resistente Saatgut gleicht einer Versicherungsprämie: die Investition in das teurere Saatgut hilft Ernteeinbussen verhindern, sollte es zu einem bedrohlichen Maiszünslerbefall kommen. Aufgrund der besonderen Agrarstruktur haben ertragssichernde Investitionen in den USA vielleicht einen noch bedeutenderen Stellenwert als anderswo: Um im Frühjahr genügend Kapital für Saatgut, Düngemittel und Pflanzenschutz zur Verfügung zu haben, müssen viele Betriebe die zu erwartende Ernte bei den Banken verpfänden. Jeder Minderertrag würde die Rückzahlung der Kredite gefährden. Es sprechen also gute

betriebswirtschaftliche Gründe dafür, die resistenten Sorten anzubauen.

5.2 Ökologische Vorteile

Doch auch ökologische Gesichtspunkte sprechen für die transgenen Sorten:

- Das von der Pflanze selbst produzierte δ-Endotoxin-Protein wird nur jenen Larven zum Verhängnis, die an ihr fressen. Die Wirkung des *Bt*-Proteins ist zielgerichtet und spezifisch.
- Nützlinge werden durch das δ-Endotoxin nicht beeinträchtigt.
- Die Maiszünslerlarven werden in ihren jüngsten Entwicklungsstadien bekämpft, sobald sie beginnen zu fressen. In diesem Stadium sind die Larven besonders empfindlich, nur geringste Mengen des δ-Endotoxins sind erforderlich, um vollständigen Schutz zu gewährleisten. Das hat den durchaus erwünschten Nebeneffekt, dass die Pflanze nur wenig δ-Endotoxin produzieren muss und sich nur geringe Mengen in der Pflanze akkumulieren.
- Anders als chemische Bekämpfungsmassnahmen erreicht das von der Pflanze selbst produzierte δ-Endotoxin die Larven auch im Innern der Stengel. Der Schutz ist damit ungleich wirkungsvoller.
- Da die Larven zu ihrer Entwicklung fressen müssen, die einzige erreichbare Nahrungsquelle aber die transgenen Maispflanzen mit ihrem insektiziden δ-Endotoxin sind, kann sich keine Larve der Wirkung des *Bt*-Proteins entziehen. Unter diesen Umständen ist in absehbarer Zeit nicht damit zu rechnen, dass sich resistente Maiszünsler entwickeln und ausbreiten könnten.
- Der Maiszünsler wird nicht ausgerottet. Maiszünsler, die normale, nicht-resistente Maispflanzen zur Eiablage auswählen, produzieren wie bisher Nachkommen, die empfindlich auf das δ-Endotoxin reagieren. Das bedeutet, dass spontan auftretende resistente Mutanten des Insekts kaum eine Gelegenheit zu massenhafter Verbreitung haben, da sich die Resistenzgene in der nicht-resistenten Population ständig ausdünnen würden statt sich anzureichern.

Dem **Problemkreis der Resistenzbildung** wird besondere Aufmerksamkeit zuteil, um zu verhindern, dass resistente Formen des Maiszünslers die auf der Expression des δ-Endotoxin-Gens beruhenden Abwehrmechanismen der transgenen Maissorten wirkungslos machen.

Diese kurze Betrachtung der ökologisch-relevanten Eigenschaften von mais-zünslerresistenten transgenen Maissorten macht deutlich:

Genetisch resistente Kulturpflanzen sind ein Schritt weg von der Unspezifität chemischer Bekämpfungsmassnahmen und hin zur ökologisch verträglichen gezielten Schädlingsbekämpfung. Transgene Kulturpflanzensorten mit neuen Resistenzeigenschaften passen sich nahtlos ein in das Konzept des **Integrierten Pflanzenschutzes**. Das gilt nicht nur für das hier beschriebene Beispiel insektenresistenter Sorten; in gleicher Weise gilt diese Einschätzung für Sorten mit transgener Resistenz gegenüber Viren und bakteriellen oder pilzlichen Krankheiten.

In unzähligen Labor- und Gewächshausversuchen wurde das Verhalten der übertragenen Gene (δ-Endotoxin-Gen und Markergene) untersucht, insbesondere ihre Stabilität, ihre Regulation und Vererbung. Besonders intensiv wurde nach möglichen Nebenwirkungen gesucht. Inzwischen haben die transgenen insektenresistenten Tabak- und Maispflanzen aus der Ciba-Forschung mehrjährige Tests im Feldanbau durchlaufen. Sie fanden überwiegend in den USA, aber auch in Frankreich und Argentinien statt. Die ersten Feldversuche dienten vor allem dem Zweck, die Risiken der Freisetzung transgener Pflanzen unter praxisnahen, aber streng kontrollierten und wissenschaftlich überwachten Bedingungen zu beurteilen. Die Amerikaner haben für diese Vorgehensweise einen markanten, optimistisch-pragmatischen Imperativ: "Learning by doing". So tragen die Freilandversuche auch dazu bei, wichtige Erfahrungen mit dem staatlichen Zulassungsverfahren zu sammeln. Ebenso wichtig waren die Erfahrungen, die Ciba-Mitarbeiter bei ungezählten Veranstaltungen mit Presse, Landwirten, Nachbarn, Umweltgruppen und einer teils aufgeschlossenen, teils kritisch ablehnenden Bevölkerung gewinnen konnten.

Wie bereits weiter oben erwähnt, wurden die behördlichen Auflagen in den USA, basierend auf den Erfahrungen aus den Freilandversuchen der letzten 8 Jahre, 1993 erstmals deutlich herabgesetzt. Mit zunehmender Kenntnis über das Verhalten transgener Pflanzen unter

Freilandbedingungen normalisieren sich die Zulassungsanforderungen. Bald geht es in den Feldversuchen, wie bei allen Züchtungsprogrammen, vor allem darum, die Leistungsfähigkeit der zukünftigen neuen Sorten unter verschiedenen Boden-, Klima- und Anbaubedingungen zu prüfen, unter den Nachkommen diejenigen mit den besten Eigenschaften für die weitere Sortenentwicklung auszuwählen, sowie die transgene Insektenresistenz in möglichst viele standortangepasste Linien einzukreuzen.

Für Ciba ist es selbstverständlich, dass die Versuche mit transgenen Pflanzen sehr aufmerksam wissenschaftlich begleitet und mit besonderer Sorgfalt durchgeführt werden, die über das behördlich verlangte Mass hinausgeht.

Literatur

Ahl Goy P, Chasseray E and Duesing J (1994) Field trials of transgenic plants: an overview. Agro-Food-Industry Hi-Tech **5**: 10-15

Boulter D (1993) Insect pest control by copying nature using genetically engineered crops. Phytochemistry **34**: 1453-1466

Brunke KJ and Meeusen RL (1991) Insect control with genetically engineered crops. TIBTECH **9**: 197-200

Carozzi N, Warren GW, Desai N, Jayne SM, Lotstein R, Rice DA, Evola S and Koziel MG (1992) Expression of a chimeric CaMV 35S *Bacillus thuringiensis* insecticidal protein gene in transgenic tobacco. Plant Mol Biol **20**: 539-548

Cornelissen BJC and Melchers LS (1993) Strategies for control of fungal diseases with transgenic plants. Plant Physiol **101**: 709-712

Dale PJ, Irwin JA and Scheffler JA (1993) The experimental and commercial release of transgenic crop plants. Plant Breed **111**: 1-22

English L and Slatin SL (1992) Mode of action of delta-endotoxins from *Bacillus thuringiensis*: A comparison with other bacterial toxins. Insect Biochem Mol Biol **22**: 1-7

Evenhuis A and Zadocks JC (1991) Possible hazards to wild plants of growing transgenic plants. A contribution to risk analysis. Euphytica **55**: 81-84

Gatehouse AMR, Shi Y, Powell KS, Brough C, Hilder VA, Hamilton WDO, Newell CA, Merryweather A, Boulter D and Gatehouse JA (1993) Approaches to insect resistance using transgenic plants. Phil Trans R Soc London B **342**: 279-286

Harms CT (1989) Praktische Möglichkeiten der Biotechnologie im modernen Pflanzenschutz. Landwirtschaft Schweiz **2**: 743-747

Harms CT (1992) Engineering genetic disease resistance into crops: biotechnological approaches to crop protection. Crop Protection **11**: 291-306

Koziel MG, Beland GL, Bowman C, Carozzi NB, Crenshaw R, Crossland L, Dawson J, Desai N, Hill M, Kadwell S, Launis K, Lewis K, Maddox D, McPherson K, Meghji MR, Merlin E, Rhodes R, Warren GW, Wright M and Evola SV (1993) Field performance of elite transgenic maize plants expressing an insecticidal protein derived from *Bacillus thuringiensis*. Bio/Technology **11**: 194-200

Lambert B and Peferoen M (1992) Insecticidal promise of *Bacillus thuringiensis*. Facts and mysteries about a successful biopesticide. BioScience **42**: 112-122

Miflin BJ (1992) Plant biotechnology: Aspects of its application in industry. Proc Royal Soc Edinburgh **99B**: 153-163

Organisation for Economic Co-Operation and Development (OECD) Field releases of transgenic plants, 1986-1992: An analysis. OECD, Paris 1993

Organisation for Economic Co-Operation and Development (OECD) Safety considerations for biotechnology: Scale-up of crop plants. OECD, Paris 1993

Stetter J (1993) Trends in the future development of pest and weed control - an industrial point of view. Regul Toxicol Pharmacol **17**: 346-370

Williams S, Friedrich L, Dincher S, Carozzi N, Kessmann H, Ward E and Ryals J (1992) Chemical regulation of *Bacillus thuringiensis* δ-endotoxin expression in transgenic plants. Bio/Technology **10**: 540-543

Williamson M, Perrins J and Fitter A (1990) Releasing genetically engineered plants: Present proposals and possible hazards. Tree **5**: 417-419

van den Daele W, Pühler A und Sukopp H (Eds.) Verfahren zur Technikfolgenabschätzung des Anbaus von Kulturpflanzen mit gentechnisch erzeugter Herbizidresistenz. Wissenschaftszentrum Berlin für Sozialforschung, Berlin 1994 (Hefte 1-18)

van den Elzen PJM, Jongedijk E, Melchers LS and Cornelissen BJC (1993) Virus and fungal resistance: from laboratory to field. Phil Trans R Soc London B **342**: 271-228

Anschrift des Verfassers:

Dr. Christian T. Harms
Ciba-Geigy AG
Division Pflanzenschutz
PP 6.35
4002 Basel