

sag

schweizerische arbeitsgruppe gentechnologie

Verschobene Marktreife

Materialien zur zweiten und dritten Generation transgener Pflanzen

Benno Vogel & Christof Potthof

Herausgeber

**Gen-ethisches Netzwerk e.V.
und Schweizerische Arbeitsgruppe Gentechnologie SAG**

Unterstützt von

Bio Suisse

Bund für Umwelt und Naturschutz Deutschland - BUND

Greenpeace Schweiz

Pro Natura (Schweiz)

WWF Schweiz

Zukunftsstiftung Landwirtschaft (Deutschland)

Februar 2004



Gen-ethisches Netzwerk e.V.
Brunnensrasse 4
D-10119 Berlin
Tel: 0049-30-685 70 73
Fax: 0049-30-684 11 83
www.gen-ethisches-netzwerk.de



Schweizerische Arbeitsgruppe Gentechnologie
Postfach 1168
CH-8032 Zürich
Tel: 0041-1-262 25 63
Fax: 0041-1-262 25 70
www.gentechnologie.ch



BIO SUISSE
Margarethenstrasse 87
CH-4053 Basel
Tel: 0041-61-385 96 10
Fax: 0041-61-385 96 11
www.bio-suisse.ch



BUND
Am Kölnischen Park 1
D-10179 Berlin
Tel: 0049-30-275 86 40
Fax: 0049-30-275 86 440
www.bund.net



Greenpeace Schweiz
Heinrichstrasse 147
Postfach
CH-8031 Zürich
Tel: 0041-1-447 41 41
Fax: 0041-1-447 41 99
www.greenpeace.ch



Pro Natura
Postfach
CH-4018 Basel
Tel: 061 317 91 91
Fax: 061 317 92 66
www.pronatura.ch



WWF Schweiz
Hohlstrasse 110
Postfach
CH-8010 Zürich
Tel: 0041-1-297 21 21
Fax: 0041-1-297 21 00
www.wwf.ch



Zukunftstiftung Landwirtschaft
Marienstrasse 19
D-10117 Berlin
Tel: 0041-30-240 47 146
Fax 0041-30-275 90 312
www.zs-l.de

«Die Entwicklung neuer transgener Pflanzen wird ungebrochen weitergehen, ebenso wie Freilandversuche und biologische Sicherheitsforschung – aber zunehmend orientiert an einem neuen Leitbild, das verbesserte Ökobilanzen und den Nutzen für den Verbraucher sichtbar und überzeugend demonstriert.»

Joachim Schiemann, Biologische Bundesanstalt für Land- und Forstwirtschaft
Braunschweig

«Perhaps the greatest challenge we face lies not in the area of technology but in marketing.»

David Rowe, Dow AgroSciences

«If the industry could snap its fingers, and we could have Golden Rice and other products to try, then this industry would be pulling itself out. Unfortunately, we don't have these products.»

Sano Shimoda, Biotech Industry Analyst

«Food will become healthier and even therapeutic. For example, your diet might comprise a meal of spaghetti where the flour for the pasta contains ingredients that lower your chance for colon cancer by 75%, the tomatoes in the tomato paste include antioxidants that will decrease aging and the iced tea that you drink will ease your anxiety...With genetic engineering and the rapid discovery pace of genomics, there is no reason why we could not provide these benefits through enhanced diet.»

John A. Ryals, Paradigm Genetics.

«Soweit es derzeit abzuschätzen ist, kann davon ausgegangen werden, dass auch in Deutschland die öffentliche Akzeptanz der transgenen Pflanzen aus der „zweiten und dritten Generation“ grösser sein könnte als für diejenigen mit Herbizidtoleranz oder Insektenresistenz.»

Peter Brandt, Direktor und Professor am Zentrum Gentechnologie, Robert-Koch-Institut, Berlin

«There is evidence that GM crops with enhanced nutrition are being used as a Trojan horse to gain better public acceptance of the biotech industry as a whole.»

Sue Mayer, GeneWatch UK, und Sue Dibb, Food Commission.

Zusammenfassung

Seit Jahren zeigen Umfragen immer wieder dasselbe Bild: Die Mehrheit der europäischen Bevölkerung will keinen Gen-Food auf dem Teller. Den Grund für die breite Ablehnung verorten die Agrochemiekonzerne und Forschenden im fehlenden Nutzen für die Verbraucher. Da die bisherigen transgenen Pflanzen der ersten Generation vor allem veränderte agronomische Eigenschaften wie Herbizid- und Insektenresistenz aufweisen, bringen sie höchstens den Landwirten einen Nutzen. Dass die Verbraucher in Zukunft nicht mehr leer ausgehen und somit die Akzeptanz steigt, dafür wollen die Konzerne und Forschenden mit der zweiten und dritten Generation transgener Pflanzen sorgen. Nicht mehr die agronomischen Eigenschaften sollen im Fordergrund stehen, jetzt soll die Qualität der Pflanzen verändert werden. Mehr Vitamine, gesündere Fette und erhöhte Ballaststoffe lauten drei der Ziele. Auf den kommerziellen Anbauflächen sind diese Pflanzen jedoch nicht anzutreffen. Und auch auf den Freisetzungsfeldern sind sie kaum zu finden. Obwohl die zweite und dritte Generation seit Ende der 90er Jahre lautstark angekündigt werden, lässt sich auf den Freisetzungsfeldern der EU und der USA ein gegenteiliger Trend feststellen: die Anzahl der Versuche mit transgenen Pflanzen, deren Qualität verändert worden ist, nimmt seit Mitte der 90er Jahre ab. Weshalb diese Diskrepanz? Kurz: Weil die Veränderung der Qualität technisch schwierig ist, der ökonomische Erfolg im Ungewissen schwebt und die Interessen der Agrochemiekonzerne eigentlich woanders liegen. Etwas länger:

DuPont, Monsanto, Syngenta, Bayer, Dow und BASF – sie sind nicht nur die sechs grössten Agrochemiekonzerne der Welt, sie gehören auch zu den wichtigsten Playern, wenn es um das Geschäft mit transgenen Pflanzen geht. Durch Fusionen und Allianzen sowie den Kauf von Saatgutunternehmen und Biotechfirmen bestimmen sie heute weitgehend die Forschung und Entwicklung sowie die Kommerzialisierung von transgenen Pflanzen. Sie besitzen 90 Prozent der bisher für den Anbau zugelassenen transgenen Pflanzen, halten mehr als die Hälfte aller Patente auf transgenen Pflanzen in ihrem Eigentum und führen die Mehrheit der Freisetzungsversuche durch. Zudem versuchen sie vermehrt Einfluss auf den ganzen Versorgungsweg zu nehmen, indem sie Allianzen mit der Verarbeitungsindustrie und den Getreidehändlern eingehen. Kurzum: die grossen Agrochemiekonzerne kontrollieren das Geschehen und ihre Interessen bestimmen, welche transgenen Pflanzen mit welchen Eigenschaften auf den Markt kommen. Die Entwicklung einer transgenen Pflanze dauert sechs bis zwölf Jahre. Die Chance, dass eine erfolgreiche Entdeckung im Labor auch tatsächlich den Weg auf den Markt schafft, ist gering – nur mit einer von 250 Entdeckungen soll dies gelingen. Die Kosten für die Entwicklung betragen 50 bis 60 Millionen US-Dollar. Wer mit einer transgenen Pflanze Gewinn machen will, braucht grosse Märkte und gentechnisch veränderte Eigenschaften, die einen schnellen Rücklauf der Investitionen wahrscheinlich machen. Diese Bedingungen erfüllen Pflanzenarten, die einen grossen Einzelmarkt aufweisen, sowie die so genannten Input-Eigenschaften.

1983 ist zum ersten Mal eine Pflanze gentechnisch verändert worden. Was damals mit Tabak gelang, ist inzwischen bei allen mehr oder weniger wichtigen einjährigen Kulturpflanzenarten gelungen: ein zuvor aus einem anderen Organismus isoliertes

Gen in das pflanzliche Erbgut einzufügen. Die Eigenschaften, die das Ziel der gentechnischen Veränderung sind, lassen sich grundsätzlich in zwei Kategorien einteilen: Input-Eigenschaften und Output-Eigenschaften. Input-Eigenschaften sind die Charakteristika einer Pflanze, welche die Kultivierung und den Ertrag beeinflussen, aber nichts mit der Qualität des Endprodukts zu tun haben. Sie wirken sich auf den agronomischen Aufwand aus und sind vor allem für Züchter und Landwirte von Bedeutung. Anders ist das bei den Output-Eigenschaften. Sie sollen vor allem der Lebensmittelindustrie und den Verbrauchern einen Zusatznutzen bringen. Denn bei den Output-Pflanzen geht es nicht allein um die agronomische Leistung, sondern primär um die Qualität des Endproduktes – so etwa um die Eliminierung von unerwünschten Inhaltsstoffen, das Hinzufügen von ernährungsphysiologisch erwünschten Substanzen oder die Verbesserung von Verarbeitungseigenschaften. Eine besondere Form der Output-Eigenschaften findet sich beim Molecular Farming. Hier werden die Pflanzen gentechnisch so verändert, dass sie neue Substanzen produzieren, die industriell genutzt oder in der Humanmedizin als Impfstoff oder Medikament verwendet werden können.

Die bisher kommerzialisierten Pflanzen besitzen fast ausschliesslich Input-Eigenschaften – namentlich Herbizid- und Insektenresistenz. Entwickelt sind sie von den wenigen Grosskonzernen, die das Geschehen bestimmen. Die Gründe, weshalb gerade die Herbizid- und Insektenresistenz den Start der grünen Gentechnik ausmachen, sind folgende: Erstens können die Eigenschaften durch das Einfügen eines einzelnen Gens erzielt werden. Die verantwortlichen Gene waren bereits Mitte der 80er Jahre bekannt und isoliert. Zweitens bringt der Verkauf des insekten- und herbizidresistenten Saatguts einen zusätzlichen Erlös, den die Konzerne nicht nur leicht einfangen konnten, sondern dank dem sie auch rasch ihre Entwicklungskosten ausgleichen und einen kontinuierlichen Nettogewinn einstreichen konnten. Vor allem die herbizidresistenten Pflanzen bringen den Konzernen ein sattes Geschäft. Da sie sowohl die Herbizide wie auch das resistente Saatgut produzieren, können sie beides kombiniert verkaufen, die gleichen Distributionskanäle verwenden und die Preise regeln. Drittens: Da die herbizid- und insektenresistenten Pflanzen entweder den Ernteertrag erhöhen oder die Produktionskosten senken, brauchte es weder neue Ernte- noch neue Verarbeitungsmethoden. Die Entwicklung der beiden Eigenschaften war für die Konzerne ein attraktives Angebot. Dass die Interessen der Konzerne das Marktgeschehen bestimmen, zeigt sich auch bei den bereits angebauten Pflanzenarten. Es sind hauptsächlich Mais, Soja, Raps und Baumwolle. Alle vier Arten haben einen grossen Absatzmarkt. Die Konzerne konnten deshalb damit rechnen, dass sie die Entwicklungskosten schnell wieder ausgleichen und dann grosse Umsätze erzielen konnten. Das Resultat der von den Konzerninteressen gesteuerten Entwicklung: Im Jahr 2002 wuchsen weltweit auf 58,7 Millionen Hektar transgene Pflanzen. 99 Prozent dieser Pflanzen wiesen eine Insekten- und/oder einer Herbizidresistenz auf und gehörten einer der vier Arten Mais, Soja, Raps oder Baumwolle an. Vier Länder machten zusammen 99 Prozent der Anbaufläche aus: 66 Prozent der Fläche in den USA lagen, 23 Prozent in Argentinien, 6 Prozent in Kanada und 4 Prozent in China.

Pflanzen mit grossen Märkten, Input-Eigenschaften mit hohen Umsätzen - sie bestimmen nicht nur das aktuelle Marktgeschehen, sie herrschen auch in der Entwicklung von transgenen Pflanzen vor. In der EU werden rund 72 Prozent der

Freisetzungsversuche mit Mais-, Raps-, Kartoffel- und Zuckerrübensorten durchgeführt. In den USA liegt Mais mit jährlichen Anteilen zwischen 50 und 60 Prozent an der Spitze, gefolgt von Baumwolle und Soja. An Bedeutung gewonnen haben in den letzten Jahren Weizen und Gerste. Beide Arten weisen ebenfalls grosse Märkte auf. Was die Eigenschaft betrifft, so liegt der Trend nach wie vor bei den Input-Eigenschaften. In der EU waren sie in 77 Prozent der Freisetzungen Gegenstand der Untersuchung, wobei am häufigsten Resistenzen gegen Herbizide, Insekten und Pathogene getestet wurden. In den USA machen die Input-Eigenschaften rund 75 Prozent der Freisetzungsversuche aus. Am häufigsten freigesetzt werden hier insekten- und herbizidresistente Pflanzen.

Seit Anfang der 90er Jahre werden transgene Pflanzen mit Output-Eigenschaften im Freiland getestet. In rund einem Fünftel aller in den USA und in der EU durchgeführten Freisetzungen wurden sie untersucht. Drei transgene Pflanzen mit Output-Eigenschaften haben bisher weltweit die Anbauzulassung erhalten: Tomaten, die länger haltbar sind, Raps, der Laurinsäure bildet, und Soja, die mehr Ölsäure als üblich bildet. Keine der drei Pflanzen wird jedoch kommerziell angebaut. Die Entwicklung von Output-Eigenschaften verlief bisher weitgehend erfolglos. Laut Aussagen der Konzerne und Forschenden soll sich dies in Zukunft ändern. Denn sie kündigen seit Ende der 90er Jahre an, dass sie ihr Interesse vermehrt darauf ausrichten, Output-Eigenschaften zu entwickeln. Auf den Freisetzungsfeldern ist hingegen ein gegenteiliger Trend zu beobachten. Denn dort nimmt die Anzahl der Versuche mit Output-Eigenschaften seit 1995 kontinuierlich ab. In den USA sank der Anteil der Output-Eigenschaften zwischen 1994 und 2002 von 29 Prozent auf 14 Prozent. Das gleiche Bild herrscht in der EU. 1996 lag hier der Anteil noch bei rund 25 Prozent, sank dann aber in den folgenden fünf Jahren auf 12 Prozent.

Die Gründe für das verminderte Interesse an den Output-Eigenschaften weisen ökonomische, technische und biologische Faktoren auf. Gewisse Output-Eigenschaften dürften nur auf Nischen-Märkten mit tiefen Umsätzen erfolgreich sein, was die teure und langwierige Entwicklung zu einem risikoreichen und nicht unbedingt einträglichem Unternehmen macht. Andere Output-Eigenschaften wiederum dürften heute noch nicht konkurrenzfähig sein. Weiter setzt die Vermarktung der Output-Eigenschaften voraus, dass die transgenen Pflanzen getrennt geerntet werden und ein Identitätserhaltungssystem existiert. Das erhöht wiederum den Managementaufwand und die Kosten, was die Output-Eigenschaften weniger attraktiv macht. Die Veränderung von Output-Eigenschaften ist zudem wesentlich komplizierter als diejenige von Input-Eigenschaften. Während die Fremdgene für Input-Eigenschaften meistens in der ganzen Pflanze aktiv sein können bzw. müssen, bedarf es bei den Genen für qualitative Merkmale einer differenzierten Aktivität. Das heisst, die Gene sollten nur in bestimmten Geweben oder in bestimmten Entwicklungsstadien aktiviert werden. Um dies zu erreichen, braucht es spezifische Promotoren. Die sind jedoch noch längst nicht in jedem Fall verfügbar. Eine weitere technische Hürde ist, dass viele der gewünschten Qualitätseigenschaften das Einfügen mehrerer Fremdgene voraussetzen. Die Transformation mehrerer Gene bleibt aber ein schwieriges Unterfangen, da die vorhandenen Techniken Mängel aufweisen. Zudem muss bei der Herstellung vieler Output-Eigenschaften in komplexe und gut ausbalancierte Stoffwechselwege eingegriffen werden. Das geht nicht immer ohne unerwünschte Nebeneffekte. Ein

weiterer Faktor, der über den Erfolg von Output-Eigenschaften mit entscheidet, ist der Sicherheitsaspekt. Verglichen mit den Input-Eigenschaften bedingen die veränderten Output-Eigenschaften eine Weiterung der Sicherheits- und Risikofragen. Die bisherige Debatte um die transgenen Pflanzen der ersten Generation hat das Konzept der substantiellen Äquivalenz herangezogen. Dieses Konzept ist aber unzureichend, wenn es um die Beurteilung von transgenen Pflanzen mit Output-Eigenschaften geht. Da die spezifische Neuartigkeit bei diesen Pflanzen das Ziel der gentechnischen Veränderung ist, sind hier weit reichende methodische Innovationen für die Prüfung und Zulassung erforderlich.

In den nächsten fünf Jahren werden transgene Pflanzen mit Input-Eigenschaften weiterhin das Marktgeschehen dominieren. Die Palette der bereits kommerzialisierten Pflanzenarten dürfte um folgende neue Arten verlängert werden: Banane, Erbse, Erdnuss, Futterrübe, Gerste, Gurke, Kopfsalat, Luzerne, Pfeffer, Sonnenblume und Weizen. Die Input-Eigenschaften, die sie aufweisen werden, sind Insekten-, Herbizid-, Virus- und Pilzresistenz sowie erhöhter Ertrag. Was die Output-Eigenschaften betrifft, so könnten in den nächsten fünf Jahre folgende den Weg auf den Markt finden: verlängerte Haltbarkeit, verbesserte Verdaubarkeit, modifizierte Fettsäuren, Stärke- und Proteinstoffwechsel, reduzierter Mykotoxingehalt, effizientere Ethanolproduktion und veränderter Sekundärmetabolismus.

Die erfolgreiche Entwicklung und Vermarktung von transgenen Pflanzen mit Output-Eigenschaften gestaltet sich schwierig. Das Bemühen der Agrochemiekonzerne, solche Produkte zu entwickeln, ist klein – zumindest wenn man es mit den Mitteln vergleicht, die sie in die Entwicklung von Input-Eigenschaften investieren. In der EU zum Beispiel weist nur eine der 22 für die Zulassung beantragten transgenen Pflanzen eine Output-Eigenschaft auf. Auch weltweit gesehen dürften in den nächsten fünf Jahren nur wenige transgene Pflanzen mit Output-Eigenschaften auf den Markt kommen. Die Mehrheit dieser neuen Produkte wiederum ist entwickelt worden, um den Lebensmittel-, Futtermittel- und anderen industriellen Verarbeitern einen Zusatznutzen zu bringen. Die grosse Ankündigung, transgene Pflanzen mit direktem Nutzen für die Verbraucher zu entwickeln, entpuppt sich bisher vor allem als rhetorischer Versuch, das Image der grünen Gentechnik zu verbessern.

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	1
2. Die zweite und dritte Generation transgener Pflanzen	3
2.1 Input- und Output-Eigenschaften	3
2.2 Die erste Generation	4
2.3 Die zweite und dritte Generation	5
3. Wer sind die Protagonisten?	8
4. Was ist auf dem Markt?	11
5. Was wird freigesetzt?	15
5.1 Welche Pflanzenarten werden in der EU freigesetzt?.....	17
5.2 Welche Pflanzenarten werden in den USA freigesetzt?	17
5.3 Welche Eigenschaften werden in der EU getestet?	19
5.4 Welche Eigenschaften werden in den USA getestet?.....	21
5.5 Welche kombinierten Eigenschaften werden getestet?	22
5.6 Zwischenbilanz.....	23
6. Transgene Pflanzen in der Pipeline	25
6.1 Input-Eigenschaften	25
6.1.1 Herbizidresistenz	25
6.1.2 Insektenresistenz.....	27
6.1.3 Virusresistenz	29
6.1.4 Pilzresistenz.....	31
6.1.5 Bakterienresistenz	32
6.1.6 Stressresistenz	32
6.1.7 Weitere Input-Eigenschaften.....	34
6.2 Output-Eigenschaften	36
6.2.1 Lebensmittel	36
Goldener Reis	36
Goldener Senf	37
Fruktane – mehr Ballaststoffe für Kartoffeln und Zuckerrüben	38
Lycoplen-Tomate	39
Fettarme Pommes.....	40
Isoflavon-Soja.....	40
Gesündere Fette	40
Allergenfreie Pflanzen.....	43
Samenlose Früchte.....	43
6.2.2 Futtermittel	45
PhytaSeed trifft EnviroPig.....	45
Weniger Mykotoxine	46
Gerste für die Schweine	47
Luzerne mit Resveratrol.....	47
Veränderte Verdaubarkeit	47
Proteinqualität	47
Essbare Impfstoffe	49
6.2.3 Industrie	49
Stärke	49
Öle und Fette.....	50
Wachse.....	52
Vitamine.....	53
Süsstoffe: Brazzein-Mais	53
Bioplastik	53
Mais für die Ethanolproduktion.....	54
Industrielle Enzyme.....	55
6.2.4 Pharmazie	56
Rekombinante Therapeutika	57

Essbare Impfstoffe	58
Antikörper	59
Exkurs: Pharma-Pflanzen verunreinigen Nahrungsmittel	59
6. 3 Transparente, marker- und pollenfreie Pflanzen	62
6.3.1 CBI – die unbekanntes Gene.....	62
6.3.2 Markergene.....	63
6.3.3 Gene containment	64
7. Welche transgenen Pflanzen kommen auf den Markt?	68
7.1 Transgene Pflanzen auf dem europäischen Markt.....	71
8. Bilanz	75
9. Literatur	80
Anhang	88

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Züchtungsziele und Anwendungsgebiete der grünen Gentechnologie.....	4
Tabelle 2: Die drei Generationen transgener Pflanzen nach Reiner Emrich.	5
Tabelle 3: Marktpotential, Wachstum und Profitabilität im Jahr 2010 für die drei Kategorien Input Eigenschaften, Output-Eigenschaften und Molecular Farming.....	6
Tabelle 4: Umsätze der sechs grössten Agrochemie-Unternehmen der Welt im Jahr 2001.....	8
Tabelle 5: Umsätze der weltweit zehn grössten Saatgutfirmen in den Jahren 2000 und 2001.	8
Tabelle 6: Die sechs wichtigsten Firmen der grünen Gentechnik und ihre verschluckten Partner.	9
Tabelle 7: Eigenschaften der weltweit zugelassenen transgenen Pflanzen	12
Tabelle 8: Weltweite Anbauflächen der einzelnen transgenen Pflanzensorten im Jahr 2002.	13
Tabelle 9: Weltweite Anbauflächen der transgenen Pflanzen nach Eigenschaften dargestellt.	14
Tabelle 10: Wichtige Kombinationen von Eigenschaften, die in der EU zwischen 1991 und 2002 getestet wurden.	22
Tabelle 11: Wichtige Kombinationen von Eigenschaften, die in den USA zwischen 1991 und 2002 getestet wurden.	23
Tabelle 12: Eigenschaften transgener Pflanzen, die in Zukunft in der EU auf den Markt kommen könnten.....	24
Tabelle 13: Beispiele von transgenen Pflanzen mit Herbizidresistenzen.....	26
Tabelle 14: Beispiele von transgenen Pflanzen mit veränderten Input-Eigenschaften	35
Tabelle 15: Beispiele von transgenen Nahrungsmittelpflanzen mit veränderter Produktqualität.....	36
Tabelle 16: Beispiele von transgenen Futtermittelpflanzen mit veränderter Produktqualität	45
Tabelle 17: Beispiele von Enzymen, die in transgenen Pflanzen exprimiert worden sind	55
Tabelle 18: Vergleich der verschiedenen Produktionssysteme für rekombinante Substanzen	56
Tabelle 19: Beispiele von technologischen Ansätzen, um den vertikalen Gentransfer von transgenen Pflanzen zu verhindern oder zu reduzieren.....	65
Tabelle 20: Eigenschaften von transgenen Pflanzen, die in den nächsten fünf Jahren kommerzialisiert werden könnten.	69
Tabelle 21: Transgene Pflanzen, die in den nächsten fünf Jahren kommerzialisiert werden könnten...	70
Tabelle 22: Transgene Nahrungsmittelpflanzen, die in der EU zugelassen sind.....	72
Tabelle 23: Transgene Pflanzen, deren Anträge für die Kommerzialisierung in der EU hängig sind...69	
Tabelle 24: Prognostizierter Flächenanteil von transgenen Pflanzen in Europa	74
Tabelle 25: Weltweit zugelassene transgene Pflanzen.....	88
Tabelle 26: Transgene Pflanzen, deren Anträge für die Kommerzialisierung in den USA hängig sind..	91
Tabelle 27: Liste mit den wichtigsten Kombinationen von Eigenschaften in den USA.....	91
Tabelle 29: Freisetzungsversuche mit transgenem Gemüse.....	92
Tabelle 30: Freisetzungsversuche mit transgenen Früchten	93
Tabelle 31: Beispiele von transgenen Pflanzen mit Glyphosatresistenz.....	95
Tabelle 32: Beispiele von transgenen Pflanzen mit Glufosinatresistenz.....	95
Tabelle 33: Beispiele von transgenen Pflanzen mit Insektenresistenz.....	96
Tabelle 34: Beispiele von transgenen Pflanzen mit Virusresistenz	98

Tabelle 35: Beispiele transgener Pflanzen mit Pilzresistenz.....	99
Tabelle 36: Beispiele von transgenen Pflanzen mit Bakterienresistenz	100
Tabelle 37: Beispiele von transgenen Pflanzen mit Stressresistenz	102
Tabelle 38: Nutritionally enhanced products being developed by biotechnology.	103
Tabelle 39: Beispiele von transgenen Pflanzen mit veränderter Stärkezusammensetzung	106
Tabelle 40: Beispiele von transgenen Pflanzen, die Biopharmazeutika exprimierten	107
Tabelle 41: Beispiele von essbaren Impfstoffen, die in der Entwicklung stecken.....	107

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Der neue Agro-Markt.....	10
Abbildung 2: Weltweite Anbaufläche von transgenen Pflanzen zwischen 1996 und 2002.....	11
Abbildung 3: Freisetzungsanträge in der EU zwischen 1991 und 2002.....	16
Abbildung 4: Angenommene Freisetzungsanträge in den USA zwischen 1991 und 2002.....	17
Abbildung 5: Anteil der am häufigsten freigesetzten transgenen Pflanzen in den USA.....	18
Abbildung 6: Verteilung der Eigenschaften in den Freisetzungen in der EU	19
Abbildung 7: Verteilung der Eigenschaften in den Freisetzungen in den USA.....	20
Abbildung 8: Jährliche Verteilung der in den USA getesteten Eigenschaften	21

Abkürzungsverzeichnis

ABA	Abscisinsäure
ARS	Agricultural Research Service (USDA)
BNYVV	Beet necrotic yellow vein virus
BPMV	Bean pod mottle virus
Bt	Bacillus thuringiensis
BYDV	Barley yellow dwarf virus
BYMV	Bean yellow mosaic virus
CBI	Confidential business information
CMV	Cucumber mosaic virus
CSIRO	Commonwealth Scientific & Industrial Research Organisation
EPSPS	Enolpyruvylshikimatphosphat synthase
GFLV	Grapevine fanleaf nepovirus
HPT	Hygromycinresistenzgen
JRC	Joint Research Centre
NptII	Kanamycinresistenzgen
PAT	Phosphinothricinacetyltransferase
PHB	Polyhydroxybuttersäure
PEMV	Pea enation mosaic virus
PMTV	Potato mop-top virus
PRSV	Papaya ringspot virus
PVY	Potato virus Y

RKI	Robert Koch Institut
SPFMV	Sweetpotato feathery mottle virus
SrMV	Sorghum mosaic virus
TRV	Tobacco rattle virus
TSWV	Tomato spotted wilt virus
USDA	United States Department of Agriculture
VIP	Vegetative insektizide Proteine
WMV	Watermelon mosaic virus
WSMV	Wheat streak mosaic virus
ZYMV	Zucchini yellow mosaic virus
2,4-D	2,4-Dichlorophenoxyacetic acid

1. Einleitung

«Soweit es derzeit abzuschätzen ist, kann davon ausgegangen werden, dass auch in Deutschland die öffentliche Akzeptanz der transgenen Pflanzen aus der zweiten und dritten Generation größer sein könnte als für diejenigen mit Herbizidtoleranz oder Insektenresistenz, deren großflächiger Anbau und Vermarktung derzeit heftig diskutiert werden. Diese Vermutung erscheint insofern plausibel, als es für die Öffentlichkeit bei den Pflanzen der zweiten und dritten Generation eher einsichtig sein könnte, welcher Nutzen durch deren Anbau zu erwarten ist.» Diese Worte schrieb Peter Brandt, Direktor am Zentrums Gentechnologie des Robert Koch Instituts in Berlin, im Jahr 1999. Die transgenen Pflanzen, die damals auf den Markt kamen, wiesen vor allem Input-Eigenschaften wie Herbizid- und Insektenresistenz auf, und brachten den Verbrauchern keinen direkten Nutzen. Zudem wurden viele der behaupteten ökologischen Vorteile der Herbizid- und Insekten-resistenten Pflanzen kontrovers diskutiert und ihre Markteinführung warf Fragen über deren Sicherheit für die Umwelt und die Gesundheit auf. Das alles führte in der EU dazu, dass die Agrochemiekonzerne mit ihren ersten Gentech-Produkten nicht nur mit der breiten Opposition der Verbraucher konfrontiert waren, sondern auch erlebten, wie die Umweltminister entschieden, bis auf weiteres keine transgenen Pflanzen mehr für den großflächigen Anbau zuzulassen. Während die grüne Gentechnik in den USA zu blühen begann, steckte sie in Europa in der Knospe fest. Zeit für die Agrochemiekonzerne, das Image der grünen Gentechnik zu ändern. Mit dem einsetzenden Zulassungsmoratorium begannen Konzernchefs und Forschende die zweite und dritte Generation transgener Pflanzen anzukündigen. Diese neuen Generationen – so die Ankündigungen – werden sicherer werden und nicht mehr nur aus Pflanzen mit Input-Eigenschaften bestehen, sondern vermehrt auch aus solchen mit Output-Eigenschaften. Und diese brächten auch den Verbrauchern einen klaren Nutzen – etwa in dem die Pflanzen gesünder für die Ernährung werden oder Medikamente für die Humanmedizin produzieren.

Seit den ersten grossen Ankündigungen der zweiten und dritten Generation sind vier Jahre vergangen. Agrochemiekonzerne und Forschende feiern in diesem Jahr den 20. Geburtstag der grünen Gentechnik. In der EU naht das Ende des Zulassungsmoratoriums. Zeit für uns, einen Blick auf die zukünftigen transgenen Pflanzen zu werfen. Welche Produkte kommen in den nächsten fünf Jahren auf den Markt? Wem versprechen sie einen Nutzen? Welche Interessen stehen hinter ihrer Entwicklung? Drei der Fragen, die wir in den folgenden Materialien beantworten wollen. Die Grundlagen, die wir dazu verwenden, sind die wissenschaftliche Literatur, die Informationen, die via www.google.de zu finden sind, sowie die Freisetzungsdatabanken der EU und der USA. Da transgene Pflanzen vor der Kommerzialisierung im Freiland geprüft werden müssen, geben die Databanken einen guten Einblick darin, welche Produkte in der Entwicklung sind. Aufgebaut haben wir unsere Materialien wie folgt: im **Kapitel 2** erklären wir den Unterschied zwischen Input-Eigenschaften und Output-Eigenschaften und führen aus, was Forschende meinen, wenn sie von der zweiten und dritten Generation der transgenen Pflanzen sprechen. Das **Kapitel 3** gilt den Protagonisten der grünen Gentechnik. Wir stellen dar, wer hinter der Entwicklung von transgenen Pflanzen steckt, welche Investitionen in die grüne Gentechnik fließen und wie hoch die Umsätze im Saatgutmarkt sind. Im **Kapitel 4** geben wir die aktuelle

Marktsituation wieder. Wir legen dar, welche Pflanzenarten mit welchen Eigenschaften angebaut werden und in welchen Ländern die Anbauflächen liegen. Die Informationen aus den Freisetzungsdatabanken der EU und der USA bilden den Inhalt des **Kapitels 5**. Anhand dieser Informationen beantworten wir die Fragen, welche Pflanzenarten und welche Eigenschaften zurzeit freigesetzt werden bzw. in den letzten Jahren freigesetzt worden sind. In einer Zwischenbilanz rechnen wir anschliessend vor, welche Pflanzenarten und Eigenschaften in Zukunft das Marktgeschehen dominieren dürften. Konkreter wird es in **Kapitel 6**. Hier wollen wir die Trends fassbarer machen, indem wir für die einzelnen Eigenschaften darlegen, welche Strategien an welchen Pflanzenarten verfolgt und erprobt werden. Zudem versuchen wir hier aufzuzeigen, wie nah die einzelnen Produkte an der Marktzulassung sind. Für welche transgenen Pflanzen in den nächsten fünf Jahren der Antrag zum Inverkehrbringen gestellt werden könnte, schildern wir in **Kapitel 7**. Schliesslich ziehen wir im **Kapitel 8** Bilanz über die dargestellten Sachverhalte.

Die vorliegenden Materialien wollen einen Überblick über die transgenen Pflanzen geben, die in naher Zukunft auf den Markt kommen werden. Im Zentrum stehen die Darstellung der Forschungstrends, die Darlegung der Interessen, die hinter den Trends stecken, und die Versprechungen, die zu den zukünftigen transgenen Pflanzen gemacht werden. Was die vorliegenden Materialien nicht leisten können, ist eine kritische Hinterfragung der dargestellten Trends und des versprochenen Nutzens. Sie können aber eine Basis bieten, um in Zukunft folgende Fragen beantworten zu können: Braucht es die neuen transgenen Pflanzen wirklich? Wie sicher sind sie für die Umwelt und die Gesundheit der Menschen und Tiere? Welche neuen Probleme könnten entstehen? Welche Alternativen existieren?

2. Die zweite und dritte Generation transgener Pflanzen

1999 nahm in der EU der kommerzielle Einzug der Grünen Gentechnik ein vorläufiges Ende. Die Umweltminister der EU-Länder entschieden, bis auf weiteres keine transgenen Pflanzen mehr für den grossflächigen Anbau zuzulassen. Verantwortlich dafür waren zwei Faktoren: Einerseits die breite Skepsis und der grosse Widerstand in der europäischen Bevölkerung. Die Leute wehrten sich gegen die Kommerzialisierung einer neuen Technik, weil sie in deren Produkten keinen Nutzen sondern ein nicht akzeptierbares Risiko sahen. Andererseits die Daten aus neuen wissenschaftlichen Untersuchungen, die auf nicht erwartete Nebenwirkungen von transgenen Pflanzen hinwiesen. Beides zusammen führte dazu, dass verschiedene EU-Länder begannen, transgene Pflanzen strenger zu regulieren und gar zu verbieten. Schliesslich folgte der Entscheid der EU-Umweltminister.

Ende der neunziger Jahre, während in der EU die grüne Gentechnik ins Stocken kommt, fing die wissenschaftliche Gemeinde damit an, von der zweiten und dritten Generation der transgenen Pflanzen zu sprechen (z.B. Miflin et al. 1999, Dunwell 1999, Willmitzer 1999, Kishore & Shewmaker 1999, Riley & Hoffman 1999, Brandt 2000). Die Wissenschaftler warfen einen Blick in die Zukunft und prognostizierten, dass alles besser werden würde – die Akzeptanz in der europäischen Bevölkerung wird gewonnen, die Sicherheitsbedenken mit technischen Neuerungen aus dem Raum geschafft und die Anbauflächen mit transgenen Pflanzen vergrössert werden. Alles möglich dank der zweiten und dritten Generation der transgenen Pflanzen. Denn die neuen Generationen würden – so die Wissenschaftler – sicherer werden und nicht mehr nur aus Pflanzen mit Input-Eigenschaften bestehen, sondern vermehrt aus solchen mit Output-Eigenschaften. Und diese brächten den Leuten einen klaren Nutzen – etwa indem die Pflanzen gesünder für die Ernährung werden oder Medikamente für die Humanmedizin produzieren.

Eine zukünftige Verlagerung von Input- zu Output-Eigenschaften verkündeten Ende der 90er Jahre auch die Gentech-Firmen. So sagten Robert Shapiro, CEO von Monsanto, und Fritz Corrigan, Chef der Pflanzenbiotechnologiegruppe von Cargill, dass innerhalb von zehn Jahren ein Viertel aller produzierten Getreide Output-Eigenschaften haben werden (Morrison and Giovannetti, 1999). Und die Manager europäischer Saatgutfirmen kündeten an, dass sie ihre Innovationsstrategien vermehrt auf Output auslegen werden (Tait 2001; Chataway 2001).

Welche transgenen Pflanzen gehören zur ersten Generation? Welche werden der zweiten und dritten Generation zugerechnet? Und was versteht man unter Input- bzw. Output-Eigenschaften? Drei Fragen, mit denen sich die folgenden Abschnitte beschäftigen.

2.1 Input- und Output-Eigenschaften

Vor zwanzig Jahren ist zum ersten Mal eine Pflanze gentechnisch verändert worden. Was damals mit Tabak gelang, ist inzwischen bei allen mehr oder weniger wichtigen einjährige Kulturpflanzenarten gelungen: ein zuvor aus einem anderen Organismus isoliertes Gen in das pflanzliche Erbgut einzufügen. Die Ziele, welche durch den Eingriff ins Erbgut erreicht werden sollen, unterscheiden sich nicht grundsätzlich von denjenigen der klassischen Pflanzenzucht. Doch – so lassen die Gentechniker verlauten – sie können nun gezielter und schneller erreicht werden und erweitern zudem die Breite der machbaren Veränderungen. Was wollen die Gentechniker mit

dem Eingriff ins Erbgut verändern? Die Eigenschaften, welche das Ziel der gentechnische Veränderung sind, lassen sich grundsätzlich in zwei Kategorien einteilen: Input-Eigenschaften und Output-Eigenschaften (siehe Tabelle 1). Input-Eigenschaften sind die Charakteristika einer Pflanze, welche die Kultivierung und den Ertrag beeinflussen, aber nichts mit der Qualität des Endproduktes zu tun haben (Murphy 2003b). Sie wirken sich auf den agronomischen Aufwand aus, wie zum Beispiel auf den Einsatz von Herbiziden, Pestiziden oder Dünger. Die Input- oder agronomischen Eigenschaften sind vor allem für Züchter und Landwirte von Bedeutung. Anders ist das bei den Output-Eigenschaften. Sie sind zwar für Landwirte und Züchter ebenfalls von Interesse, aber sie sollen zusätzlich auch der Lebensmittelindustrie und den Konsumentinnen und Konsumenten etwas bringen. Denn bei den Output-Pflanzen geht es nicht allein um die agronomische Leistung, sondern primär um die Qualität des Endproduktes – so etwa um die Eliminierung von unerwünschten Inhaltsstoffen, das Hinzufügen von ernährungsphysiologisch erwünschten Substanzen oder die Verbesserung von Verarbeitungseigenschaften (siehe Tabelle 1). Eine besondere Form der Output-Eigenschaften findet sich beim Molecular Farming. Hier werden die Pflanzen gentechnisch so verändert, dass sie neu Substanzen produzieren, die industriell genutzt oder in der Humanmedizin als Impfstoff oder Medikament verwendet werden können.

Input-Eigenschaften	Output-Eigenschaften/Molecular Farming
<ul style="list-style-type: none"> • Herbizidresistenz • Schädlingsresistenz • Pilzresistenz • Bakterienresistenz • Nematodenresistenz • Virusresistenz • Trockentoleranz • Kälte-/Hitzetoleranz • Salztoleranz • Schwermetalltoleranz • Verbesserte Stickstoffaufnahme • Hybridzüchtung 	<ul style="list-style-type: none"> • Stärkemetabolismus • Fettsäurenmetabolismus • Nährstoffzusammensetzung/ -gehalt • Eliminierung unerwünschter Inhaltsstoffe • Verlängerte Haltbarkeit • Farbe • Reifeverzögerung • Verarbeitungseigenschaften • Herstellung therapeutisch wirksamer Substanzen • Herstellung industrieller Enzyme • Herstellung von erneuerbaren Rohmaterialien
<p style="text-align: center;">→ Verbesserung der agronomischen Eigenschaften</p>	<p style="text-align: center;">→ Verbesserung der Produkteigenschaften</p>

Tabelle 1: Züchtungsziele und Anwendungsgebiete der grünen Gentechnologie (nach Müller & Rödiger 2001).

2.2 Die erste Generation

Als erste Generation werden hauptsächlich die transgenen Pflanzen bezeichnet, die resistent sind gegen Herbizide und/oder Insekten (z.B. Emrich 2003, Robinson 2002,

Dunwell 1999). Sie bestimmen bis heute das kommerzielle Geschehen, machen sie doch nicht nur die Mehrheit der für den Markt zugelassenen transgenen Pflanzen aus, sie sind es auch, die hauptsächlich grossflächig angebaut werden (siehe Kapitel 4). Der versprochene Nutzen liegt damit allein auf Seite der Saatguthersteller und der Landwirte. Für die KonsumentInnen ergeben sich keine Vorteile. Zwei weitere Merkmale der ersten Generation: die meisten transgenen Pflanzen besitzen noch Antibiotikaresistenzgene und können noch ungehindert ihre Pollen verbreiten. Beides ist aus Sicherheitsbedenken unerwünscht.

2.3 Die zweite und dritte Generation

Welche transgenen Pflanzen zu welcher Generation gehören, darin sind sich die Wissenschaftler uneinig, die sich mit der Zukunft der grünen Gentechnik befassen. Die einen schreiben nur von der zweiten Generation und meinen damit alle transgenen Pflanzen, die in Zukunft auf den Markt kommen werden (Dunwell 2002, Robinson 2002, Brandt 2000). Andere unterscheiden zwischen einer zweiten und dritten Generation und rechnen dabei die Molecular Farming-Pflanzen der zweiten und andere zukünftige Sorten der dritten Generation zu (Vasil 2002). Dritte wiederum sprechen nicht von Generationen sondern von Wellen, mit denen die unterschiedlichen transgenen Pflanzen auf den Markt kommen sollen, wobei Input-Eigenschaften die erste Welle ausmachen, gefolgt von den Output-Eigenschaften in der zweiten und Molecular Farming-Pflanzen in der dritten Welle (Müller & Rödiger 2001). Eine weitere mögliche Einteilung: die erste Generation enthält diejenigen Pflanzen, die bereits auf dem Markt sind, die zweite diejenigen, die Erfolg versprechend im Feld getestet werden und die dritte diejenigen Pflanzen, die noch im frühen Entwicklungsstadium sind (Emrich 2003; siehe Tabelle 2). Wie auch immer die Einteilung erfolgt, allen gemeinsam ist, dass sie sich mit der Zukunft der transgenen Pflanzen befassen. Und die könnte so aussehen:

Erste Generation	Zweite Generation	Dritte Generation
<ul style="list-style-type: none"> • Bt-Technologie • Herbizidresistenz 	<ul style="list-style-type: none"> • Virusresistenz • Nematodenresistenz • Pilzresistenz • Insektenresistenz • Aminosäuren • Ölgehalt • Stärkemetabolismus 	<ul style="list-style-type: none"> • Kältetoleranz • Trockentoleranz • Salztoleranz • Erhöhter Ertrag • Haltbarkeit • Verdaubarkeit • Vitamine • Omega-3-Fettsäuren • Langkettige Fettsäuren • Industriefette • Enzyme • Bioplastik • Farbstoffe

Tabelle 2: Die drei Generationen transgener Pflanzen nach Reiner Emrich, Vizepräsident von BASF Plant Science (Emrich 2003).

Die Basis, auf denen die Pflanzengentechnologen die Entwicklung vorantreiben, ist in den letzten Jahren stark verbreitert worden (Frommer & Beachy 2003). Zum Beispiel

durch die Fortschritte in den Bereichen Genomics, Proteomics und Metabolomics. Sie haben in den letzten Jahren nicht nur die Kosten und den Zeitaufwand gesenkt, die für die Entdeckung neuer Gene notwendig sind, sondern haben auch zu einer großen Anzahl von neuen Genen geführt, die zur Verfügung stehen (Graff & Newcomb 2003). Zudem sind die Genome verschiedener Pflanzen komplett sequenziert worden und es existiert eine grosse Sammlung von EST's (*expressed sequence tags*) und Markersystemen (Frommer & Beachy 2003). Mit der genomischen und metabolischen Revolution sind auch viele Stoffwechselwege der Pflanzen molekularbiologisch aufgeklärt worden, womit die WissenschaftlerInnen immer mehr Gene kennen, die in den verschiedenen Stoffwechselwegen involviert sind – so zum Beispiel bei den Fettsäuren (Drexler et al. 2003, Thelen & Ohlrogge 2002, Coughlan & Kinney 2002), den Kohlenstoffen (Schulman 2002), den Aminosäuren (Shewry 2002, Jacobs et al. 2002), den Hormonen (Hedden & Phillips 2000) oder den Carotenoiden (Sandmann 2001). Die Fortschritte, darin sind sich die Wissenschaftler einig, werden in den nächsten Jahren zu einer breiten Palette von neuen transgenen Pflanzen führen – und zwar sowohl bei den Input- als auch bei den Output-Eigenschaften (Harlander 2002, Phillips 2001, Dandekar & Gutterson 2000). So sollen in Zukunft etwa transgene Sorten auf den Markt kommen, die sich selber gegen Pilze wehren können oder denen abiotischer Stress wie Hitze, Trockenheit oder Kälte nichts mehr anhaben kann, und auch nematodenresistente und Hohertrags-Sorten sollen entwickelt werden. Der Nutzen dieser agronomischen Eigenschaften wird auf Seite der Saatguthersteller und der Landwirte liegen. Doch nicht nur sie allein sollen in Zukunft profitieren. Dank der neuen transgenen Sorten sollen erstmals auch Lebensmittelverarbeiter und vor allem die KonsumentInnen in den Geschmack der Vorteile der grünen Gentechnik kommen. Zu den Produkten, die hierfür angekündigt werden, gehören: Ölpflanzen mit mehr gesunden Fettsäuren, Gemüse mit mehr gesunden Inhaltsstoffen, Pflanzen mit zusätzlichen Vitaminen oder Pflanzen mit Inhaltsstoffen, die vor Krankheiten wie Krebs schützen sollen (siehe Übersichten von Herbers 2003, Dunwell 2002, Amaya et al. 2002, Lindsay 2002, Jacobs et al. 2002). Und dann sollen in Zukunft auch noch transgene Pflanzen auf den Feldern wachsen, die Impfstoffe oder Medikamente für die Humanmedizin bilden. All diese Produkte – so hoffen die WissenschaftlerInnen – werden die Akzeptanz in der Bevölkerung erhöhen (Harlander 2002, Jacobs et al. 2002). Ebenfalls die Akzeptanz steigern sollen die technischen Entwicklungen, welche die Sicherheit der transgenen Pflanze erhöhen. Dazu gehören die Systeme für das Herstellen markerfreier Pflanzen, die Entwicklung von Markern, die nicht auf Antibiotikaresistenzgenen aufbauen, sowie von Techniken, welche die Ausbreitung der fremden Gene in andere Pflanzen verhindern sollen (Puchta 2003, Daniell 2002).

	Input Traits	Output Traits	Molecular Farming
Marktpotential	US\$ 30 Milliarden	US\$ 100 bis 500 Milliarden	
Wachstum	mässig	stark	sehr stark
Profitabilität	mittelmässig	hoch	Sehr hoch

Tabelle 3: Marktpotential, Wachstum und Profitabilität im Jahr 2010 für die drei Kategorien Input-Eigenschaften, Output-Eigenschaften und Molecular Farming (nach Müller & Rödiger (2001)).

Wenn die Entwicklung der neuen transgenen Sorten vermehrt in Richtung Output-Eigenschaften gehen soll, so hat dies auch ökonomische Hintergründe. Denn mit den

Pflanzen, deren Qualität verbessert ist oder die im Molecular Farming wertvolle Substanzen produzieren, kann sich die Saatgutindustrie neue Absatzmärkte erschliessen. Während der gesamte potentielle Markt für Input-Eigenschaften die 30 Milliarden US-Dollar-Grenze nie überschreiten dürfte, liegt das potentielle Marktvolumen für die qualitativ veränderten Pflanzen zwischen 100 und 500 Milliarden US-Dollar – soweit zumindest die Schätzungen von Müller & Rödiger (2001) in einer Analyse für die DZ Bank in Frankfurt (siehe Tabelle 3). Längerfristig sind somit die Output-Eigenschaften und das Molecular Farming weitaus interessantere Gebiete als die Input-Eigenschaften.

Wenn in Zukunft vermehrt transgene Pflanzen auf den Markt kommen sollen, deren Qualität verändert worden ist, dann müsste sich das heute bereits feststellen lassen – nämlich auf den Feldern, wo die transgenen Pflanzen vor der Kommerzialisierung getestet werden. Bevor das Freisetzungsgeschehen in der EU und in den USA näher beleuchtet wird (Kapitel 5), stellen wir kurz vor, wer die Protagonisten sind, die das Geschehen bestimmen (Kapitel 3), und welche Produkte heute bereits auf dem Markt anzutreffen sind (Kapitel 4).

3. Wer sind die Protagonisten?

Fusionen, Allianzen und Akquisitionen – sie haben in den letzten Jahren das Geschehen auf dem Saatgut- und Agrochemiemarkt beherrscht und dazu geführt, dass einige wenige Agrochemiekonzerne beide Märkte bestimmen. Rund acht Milliarden US-Dollar flossen allein in den letzten Jahren in den Konzentrationsprozess. Und zwischen 1997 und 1999 sollen die Agrochemiekonzerne für 18 Milliarden US-Dollar Saatgutfirmen aufgekauft haben (Orton 2003). Das Resultat: Die vier grössten Agrochemiekonzerne sind heute gleichzeitig auch die vier grössten Saatgutkonzerne der Welt (siehe Tabellen 4 und 5). Ihre Namen sind DuPont, Monsanto, Syngenta und Bayer. Auch die Nummern fünf und sechs der Agrochemieliste, BASF und Dow, mischen im Saatgutgeschäft mit. Dow liegt auf Platz zehn der weltweit grössten Saatgutfirmen. BASF ist erst in den letzten Jahren ins Saatgutgeschäft eingestiegen, plant aber zu einem führenden Unternehmen der Pflanzenbiotechnologie zu werden.

Firma	Einnahmen Agrochemicals (in Millionen US\$)	Einnahmen Saatgut (in Millionen US\$)	Total (in Millionen US\$)
Syngenta	5'385	938	6'623
Bayer	6'086	192	6'278
Monsanto	3'505	1'707	5'212
DuPont	1'922	1'920	3'842
BASF	3'114	0	3'114
Dow	2'627	215	2'842
Total	22'639	4'972	27'611

Tabelle 4: Umsätze der sechs grössten Agrochemie-Unternehmen der Welt im Jahr 2001 (nach Orton 2003).

	Firma	Umsatz im Jahr 2000 (in Millionen US\$)	Umsatz im Jahr 2001 (in Millionen US\$)
1	DuPont	1'938	1'920
2	Monsanto	1'608	1'707
3	Syngenta	958	938
4	Limagrain (heute Bayer CropScience)	677	764
5	Savia	474	449
6	Advanta	374	376
7	KWS	309	349
8	Delta & Pineland	301	306
9	Sakata	272	231
10	Dow	185	215

Tabelle 5: Umsätze der weltweit zehn grössten Saatgutfirmen in den Jahren 2000 und 2001 (nach Graff & Newcomb 2003).

DuPont, Monsanto, Syngenta und Bayer – sie sind auch die wichtigsten Player, wenn es um das Geschäft mit transgenen Pflanzen geht. Durch Fusionen sowie den Kauf von Saatgutunternehmen und Biotechfirmen (siehe Tabelle 6) bestimmen sie heute weitgehend die Forschung und Entwicklung sowie die Kommerzialisierung von

transgenen Pflanzen. Sie besitzen 90 Prozent der bisher weltweit kommerzialisierten transgenen Pflanzen. Mehr noch: In den USA sind sie zusammen für 56,7 Prozent der Forschung und Entwicklung im Bereich der grünen Gentechnik verantwortlich und besitzen mehr als die Hälfte aller Patente auf transgene Pflanzen (Graff & Newcomb 2003). Die Summen, die sie für Forschung und Entwicklung ausgeben, lassen sich den Schätzungen der DZ Bank entnehmen: Im Jahr 2000 soll Monsanto rund 300 Millionen US-Dollar für Forschung und Entwicklung der grünen Gentechnik ausgegeben haben, Syngenta 160 Millionen US-Dollar und Bayer CropScience 160 Millionen Euro (Müller & Rödiger 2001). Die Investitionen sind gut geschützt durch das Patentsystem und die quasi-monopolistische Kontrolle über den Saatgutmarkt, und sie lohnen sich auch: 2001 betrug der Gewinn aus dem Verkauf von transgenen Samen 673 Millionen US-Dollar (Orton 2003).

Syngenta	Bayer CropScience	Monsanto	DOW	DuPont	BASF Plant Science
Astra Zeneca Novartis Seeds Sandoz Ciba-Geigy Northrup King Rogers Rogers NK Zeneca Hilleshog Wilson Genetics	Aventis AgrEvo Hoechst-Roussel Agritope Exelixis Limagrain Plant Genetic Systems Harris Moran Rhone-Poulenc	Calgene Holdens DeKalb Asgrow Upjohn Agracetus	Agrigenetics Mycogen Biosource	Pioneer	American Cyanamid ExSeed Genetics Rohm & Haas

Tabelle 6: Die sechs wichtigsten Firmen der grünen Gentechnik und ihre verschluckten Partner.

Immer weniger transnationale Konzerne verfügen über immer grössere Marktanteile am Saatgutmarkt. Die zehn grössten Saatgutkonzerne kontrollierten 2001 rund 25 Prozent des weltweiten Umsatzes mit Saatgut, der insgesamt 30 Milliarden US-Dollar betrug (James 2003). Patente gehören zu den wichtigsten Motoren, die diesen Konzentrationsprozess vorangetrieben haben. Doch auch die hohen Kosten und das Risiko bei der Entwicklung von transgenen Sorten dürften dazu beigetragen haben (Graff & Newcomb 2003). Es kann sechs bis zwölf Jahre dauern, um eine transgene Sorte auf den Markt zu bringen. Die Kosten für den ganzen Weg vom Labor bis zur Marktlancierung können 50 bis 60 Millionen US-Dollar betragen (Larson 2002), in gewissen Fällen sogar bis zu 300 Millionen US-Dollar (Graff & Newcomb 2003). Hinzu kommt die geringe Erfolgchance, dass eine erfolgreiche Entdeckung im Labor auch tatsächlich den Weg auf den Markt schafft – nur mit einer von 250 Entdeckungen soll dies gelingen (Graff & Newcomb 2003). Und zu guter letzt bleibt die Unsicherheit, ob eine erfolgreich entwickelte Sorte vom Markt akzeptiert werden wird. Die hohen Kosten und das hohe Risiko können sich nur noch grosse Firmen leisten. Mit ein Grund, weshalb die gentechnische Pflanzenzucht zunehmend in einigen wenigen privaten Händen liegt. Die Zahl der kleinen, unabhängigen Saatgutfirmen ist in den letzten Jahren stark gesunken (Graff & Newcomb 2003) und auch die Rolle von öffentlichen Forschungsinstituten hat abgenommen (AEBC 2002). Letzteres verdeutlichen die folgenden Zahlen: Unter den 35 Organisationen, die in den USA die meisten Ressourcen in die Erforschung und Entwicklung der grünen Gentechnik stecken, finden sich zwar zwölf Universitäten, doch ihr Anteil ist mit sechs Prozent sehr klein (Graff & Newcomb 2003). Auch wenn es um die Freisetzung von transgenen Pflanzen geht, spielen die öffentlichen Institute nur eine kleine Rolle:

65 Prozent aller Freisetzungen, die zwischen 1991 und 2001 in der EU beantragt wurden, gehen auf das Konto von grossen Konzernen, kleine und mittlere Unternehmen beantragten sechs Prozent der Versuche, öffentliche Forschungsinstitute und Universitäten 16 Prozent (Menrad et al. 2002). In den USA liegt der Anteil des öffentlichen Sektors an den Freisetzungsversuchen bei 15 Prozent (Arundel 2002a). Die grossen Agrochemiekonzerne kontrollieren die Felder. Doch nicht nur das. Sie versuchen vermehrt auch Einfluss auf den ganzen Versorgungsweg zu nehmen – vom Anbau über den Handel bis zur Verarbeitung und zum Einzelhandel. Denn die Agroriesen haben in den letzten Jahren nicht nur Saatgutfirmen aufgekauft, sie sind auch Allianzen mit der Verarbeitungsindustrie und den Getreidehändlern eingegangen (Orton 2003). So hat Monsanto zum Beispiel ein Joint Venture mit Cargill getroffen und DuPont hat eine Zusammenarbeit mit Bunge angekündigt (Graff & Newcomb 2003). Während es beim Kauf der Saatgutfirmen noch um den Erwerb von Know-how, die Nutzung von Synergien und die Ankoppelung von Herbiziden an die transgenen Sorten ging, geht es jetzt um die beste Nutzung des neuen Agro-Marktes (siehe Abbildung 1). Oder anders gesagt: Die Allianzen mit der Verarbeitungsindustrie sind ein weiterer Schritt, die Kontrolle vom Gen bis zum Supermarktregal zu erlangen.

Der neue Agro-Markt

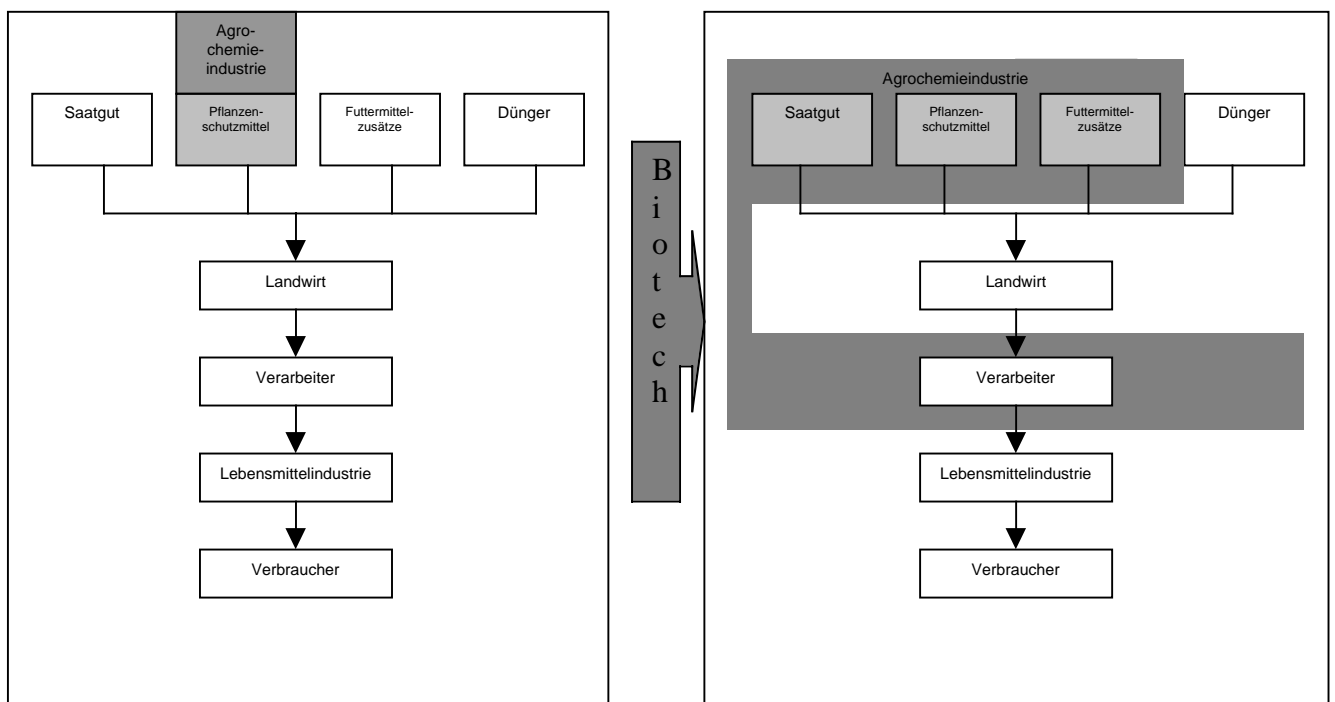


Abbildung 1: Der neue Agro-Markt – die Agrochemiekonzerne breiten sich aus, nicht nur horizontal, sondern auch vertikal (nach Müller & Rödigler 2001).

4. Was ist auf dem Markt?

Noch nie sei eine neue Technik in der Landwirtschaft derart schnell und derart breit angenommen worden wie die der transgenen Pflanzen – darin sind sich die US-amerikanischen Proponenten der grünen Gentechnik einig. Sie feiern dieses Jahr nicht nur den 20. Geburtstag der grünen Gentechnik, sie feiern auch, dass die weltweite Anbaufläche mit transgenen Pflanzen sich in den letzten sieben Jahren um das 35fache vergrößert hat. 1983 ist die erste transgene Pflanze im Labor hergestellt worden, 1996 begann der kommerzielle Anbau von transgenen Pflanzen erstmalig richtig Fuss zu fassen und nur sieben Jahre später pflanzten bereits rund 5,5 Millionen Landwirte in sechzehn Ländern transgene Pflanzen an und zwar auf 58,7 Millionen Hektar, was zweieinhalb mal der Fläche von Grossbritannien entspricht (James 2003). So durchschlagend der Erfolg der grünen Gentechnik auch zu sein scheint, stattfinden tut er nur in einigen wenigen Ländern und nur mit einigen wenigen Pflanzen. Das zeigt ein näherer Blick auf die Anbausituation im Jahr 2002.

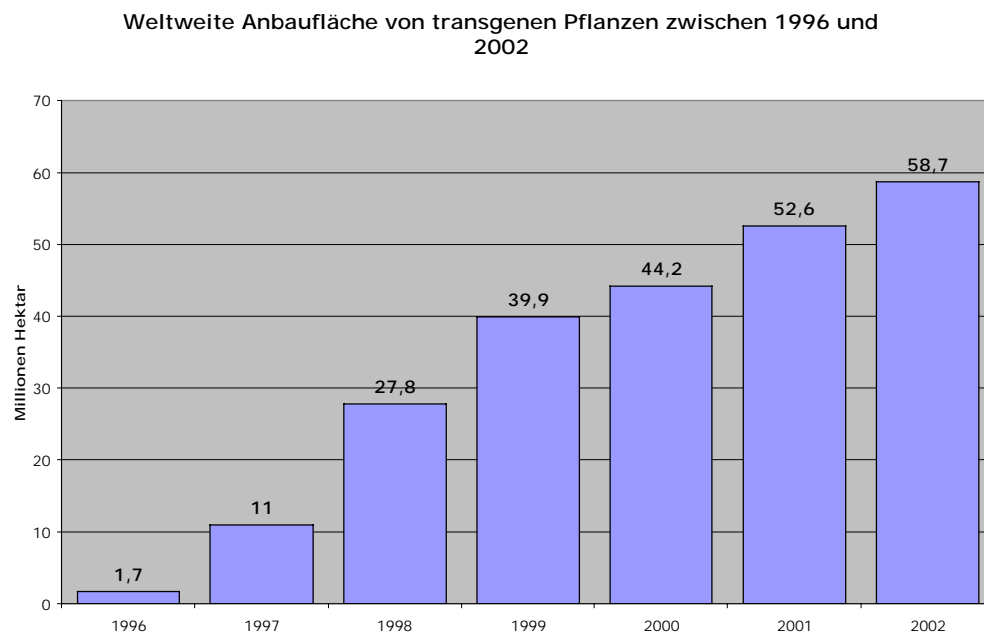


Abbildung 2: Weltweite Anbaufläche von transgenen Pflanzen zwischen 1996 und 2002 (nach James 2003).

Sechzehn Länder bauten im Jahr 2002 transgene Pflanzen an. Wenn es vor allem US-amerikanische Wissenschaftler sind, welche die hohe Adoptionsrate der transgenen Pflanzen loben, so erstaunt das nicht. Denn wie in den Jahren zuvor wies die USA auch 2002 die weltweit höchste Anbaufläche auf: 66 Prozent der Flächen, auf denen transgene Pflanzen wuchsen, lagen in den USA (James 2003). Neben den USA sind es nur noch drei weitere Länder, die einen nennenswerten Anteil an der weltweiten Anbaufläche mit transgenen Pflanzen haben. Argentinien, das einen Anteil von 23 Prozent aufweist, sowie Kanada (6 Prozent) und China (4 Prozent). Die USA, China, Kanada und Argentinien bauten somit 99 Prozent der transgenen Pflanzen an. Das restliche Prozent teilten sich die zwölf übrigen Länder, die im Jahr 2002 transgene Pflanzen anbauten (James 2003).

Die Verteilung der transgenen Pflanzen ist nicht nur konzentriert, wenn es um die Anbauländer geht, eine Massierung liegt auch vor, wenn man die Pflanzenarten betrachtet, die angebaut werden.

Bisher sind weltweit mehr als 11'000 Freisetzungsversuche durchgeführt worden (Orton 2003). Mehr als 80 verschiedene Pflanzenarten sind dabei schon getestet und mehr als 300 verschiedene Phänotypen erprobt worden. Wie viele verschiedene transgene Pflanzen es genau sind, die bisher im Freiland geprüft worden sind, lässt sich nicht eruieren. Was sich sagen lässt: Aus den mehr als 11'000 Versuchen haben bisher 62 transgene Pflanzen den Weg auf den Markt geschafft (Agbios 2003). Diese Pflanzen, die weltweit in einem oder mehreren Ländern für den großflächigen Anbau zugelassen sind, gehören 13 verschiedenen Arten an: Baumwolle, Chicorée, Flachs, Kartoffeln, Kürbis, Mais, Papaya, Raps, Rübsen, Soja, Tabak, Tomate und Zuckerrübe. Die wichtigsten Arten sind dabei Mais, Raps, Soja und Baumwolle. Mehr als die Hälfte der zugelassenen Sorten gehört einer dieser vier Arten an. Die Eigenschaften, welche die kommerzialisierten Pflanzen einzeln oder in Kombination besitzen, sind: Insektenresistenz, Herbizidresistenz, Virusresistenz, männliche Sterilität, verspätete Reife und veränderter Fettsäurenmetabolismus (siehe Tabelle 7). Die Input-Eigenschaften machen dabei klar die Mehrheit aus. Denn 55 der kommerzialisierten transgenen Pflanzen besitzen eine oder zwei Input-Eigenschaften und nur sieben haben eine Output-Eigenschaften (siehe Tabelle 7).

Input-Eigenschaften	Output-Eigenschaften
<ul style="list-style-type: none"> <u>Insektenresistenz</u>: Baumwolle (3), Mais (5), Kartoffeln (2) <u>Herbizidresistenz</u>: Baumwolle (3), Flachs (1), Mais (3), Raps (6), Rübsen (2), Reis (1), Soja (5), Tabak (1), Zuckerrübe (2) <u>Insekten- und Herbizidresistenz</u>: Baumwolle (1), Mais (6) <u>Virusresistenz</u>: Papaya (1), Kürbis (2) <u>Virus- und Insektenresistenz</u>: Kartoffel (2) <u>Herbizidresistenz und männl. Sterilität</u>: Chicorée (1), Mais (3), Raps (5) 	<ul style="list-style-type: none"> <u>Veränderter Fettsäurenmetabolismus</u>: Raps (1), Soja (1) <u>Verspätete Reife</u>: Tomate (5)

Tabelle 7: Eigenschaften der transgenen Pflanzen, die weltweit in einem oder mehreren Ländern zugelassen sind. Die Zahlen in den Klammern geben jeweils die Anzahl zugelassener «Events» pro Eigenschaft wieder. (Angaben nach den Daten von www.agbios.com; Stand Juli 2003).

Obwohl vierzehn Kulturpflanzenarten und fünf Eigenschaften für den Anbau zugelassen sind, finden sich auf den Feldern nur vier Arten und zwei Eigenschaften. So machten die Sorten der vier Kulturpflanzenarten Mais, Raps, Soja und Baumwolle im letzten Jahr 99 Prozent aller angebauten transgenen Sorten aus; Transgene Papaya und Kürbis waren für das restliche eine Prozent verantwortlich (James 2003). Und was die Eigenschaften betrifft, waren Insektenresistenz und/oder Herbizidresistenz in 99 Prozent aller angebauten transgenen Pflanzen zu finden; ein Prozent macht die Virusresistenz aus (James 2003). Stellt man die Lupe noch etwas schärfer, ergibt sich folgendes Bild: Es waren vor allem die herbizidresistenten Sojasorten, die im Jahr

2002 die Anbaufläche dominierten. Sie wuchsen weltweit auf einer Fläche von 36,5 Millionen Hektaren und hatten damit einen Anteil von 62 Prozent an der weltweiten Fläche mit transgenen Pflanzen (siehe Tabelle 8). Die nach dem herbizidresistenten Soja am zweithäufigsten angebaute transgene Sorte war Bt-Mais. Dieser insektenresistente Mais machte 13 Prozent der gesamten Anbaufläche mit transgenen Pflanzen aus. Mit je fünf bzw. vier Prozent Anteil folgen dann die herbizidresistenten Raps-, Mais- und Baumwollsorten sowie die Bt-Baumwolle. Insgesamt acht Prozent der Anbauflächen waren mit Baumwoll- und Maissorten bewachsen, die sowohl insekten- wie auch herbizidresistent sind. Auf jeweils weniger als einem Prozent wurden im Jahr 2002 zudem auch virusresistente Papaya- und Kürbissorten angebaut (siehe Tabelle 8).

Nutzpflanze	Weltweite Anbaufläche (in Millionen Hektar)	Anteil an der Gesamtfläche mit transgenen Pflanzen
Herbizidresistente Soja	36,5	62 %
Bt-Mais	7,7	13 %
Herbizidresistenter Raps	3	5 %
Herbizidresistenter Mais	2,5	4 %
Bt-Baumwolle	2,4	4 %
Herbizidresistente Baumwolle	2,2	4 %
Herbizidresistente Bt-Baumwolle	2,2	4 %
Herbizidresistenter Bt-Mais	2,2	4 %
Virusresistenter Kürbis	<0,1	<1%
Virusresistente Papaya	<0,1	<1%

Tabelle 8: Weltweite Anbauflächen der einzelnen transgenen Pflanzensorten im Jahr 2002 (nach James 2003).

Der Anteil der einzelnen Pflanzenarten an der Anbaufläche mit transgenen Pflanzen sieht wie folgt aus: Soja wuchs auf 62 Prozent der Fläche, Mais auf 21 Prozent, Baumwolle auf 12 und Raps auf 5 Prozent. Papaya und Kürbis machten jeweils weniger als ein Prozent aus.

Wie Tabelle 9 zeigt, war die Herbizidresistenz im Jahr 2002 die am weitest häufigsten angebaute Eigenschaft. Drei Viertel der transgenen Pflanzen wiesen diese Eigenschaft auf. Rechnet man die Sorten mit, die sowohl herbizid- wie insektenresistent sind, dann war die Herbizidresistenz sogar auf 83 Prozent der Flächen zu finden. Die Insektenresistenz machte je nach Rechnungsweise einen Anteil von 17 bzw. 25 Prozent der Gesamtfläche mit transgenen Pflanzen aus. Auf weniger als einem Prozent wurde die Eigenschaft Virusresistenz angebaut (Tabelle 9).

Eigenschaften	Weltweite Anbaufläche (in Millionen Hektar)	Anteil an der Gesamtfläche mit transgenen Pflanzen
Herbizidresistenz	44,2	75 %
Insektenresistenz	10,1	17 %
Herbizid- und Insektenresistenz	4,4	8 %
Virusresistenz	<0,1	<1%

Tabelle 9: Weltweite Anbauflächen der transgenen Pflanzen im Jahr 2002 nach Eigenschaften dargestellt (nach James 2003).

Die weltweite Ackerfläche beträgt 1,5 Milliarden Hektar. 3,9 Prozent dieser Fläche war im Jahr 2002 mit transgenen Pflanzen bewachsen – hauptsächlich mit Mais, Raps, Soja und Baumwolle, die resistent gegen Herbizide und/oder Insekten sind. Keine der kommerziell angebauten transgenen Pflanzen wies eine Output-Eigenschaft auf. Abgesehen von Baumwolle werden die angebauten transgenen Pflanzen primär als Tierfutter verwendet. Das Öl aus Raps und Soja wird für die Lebensmittelherstellung eingesetzt. Die transgenen Sorten wuchsen hauptsächlich in den USA und Argentinien sowie zu einem kleinen Anteil auch in China und Kanada. Durch den Verkauf des Saatguts für die transgenen Sorten soll 2002 ein Umsatz von 4.25 Milliarden US-Dollar erzielt worden sein (Orton 2003).

Bis jetzt sind transgene Pflanzen, die eine Output-Eigenschaft besitzen, unbedeutend. Nach James (2003) besaßen alle transgenen Pflanzen, die letztes Jahr grossflächig angebaut wurden, eine Input-Eigenschaften. Der von den Akteuren prognostizierte Trend hin zu mehr Output-Eigenschaften lässt sich auf dem Markt noch nicht beobachten. Wie sieht die Situation auf den Freisetzungsfeldern auf? Ob sich dort der Trend beobachten lässt, wird im folgenden Kapitel dargestellt.

5. Was wird freigesetzt?

Wer eine transgene Pflanze auf den Markt bringen will, muss sie vorab in Freisetzungsvorversuchen testen. Diese Versuche dienen dabei hauptsächlich dazu, die Stabilität des Fremdgens zu prüfen und die Eigenschaften der transgenen Pflanzen mit den Charakteristika der konventionellen Pflanzen zu vergleichen. Zudem werden während der Freisetzungsvorversuche auch Daten gesammelt, die Aufschluss über das von der transgenen Pflanze ausgehende Risiko für Mensch und Umwelt geben sollen. Die Durchführung der Feldversuche stellt den längsten und teuersten Schritt in der Entwicklung einer transgenen Pflanze dar. Abhängig von der getesteten Pflanzenart und der eingeführten Eigenschaft kann es sechs bis zwölf Jahre dauern, um eine neue transgene Sorte auf den Markt zu bringen (Graff & Newcomb 2003). Die Feldversuche beginnen etwa zwei bis drei Jahre nachdem die Pflanze im Labor hergestellt und dort auch getestet worden ist. Die Zeit zwischen dem ersten Feldversuch einer Pflanze und der Kommerzialisierung beträgt im Schnitt fünf bis sechs Jahre, kann bei einigen Pflanzen aber auch darunter liegen, bei anderen wiederum höher (Arundel 2002b).

Da jede transgene Pflanze vor der Marktzulassung auf dem Feld getestet werden muss, sind Daten über die Anzahl und Art der getesteten Pflanzen gute Indikatoren für die Produkte, welche in den nächsten zwei bis sechs Jahren kommerzialisiert werden könnten. Für die USA und die EU sind diese Daten vorhanden und zum Teil auch öffentlich zugänglich. In den USA registriert das Landwirtschaftsministerium (United States Department of Agriculture, USDA) jeden Freisetzungsvorversuch. Die Daten werden aufbereitet der Öffentlichkeit präsentiert und zwar auf der Homepage des Information Systems for Biotechnology (www.isb.vt.edu). In der EU sammelt das Joint Research Center im Auftrag der EU-Kommission die Anträge für Freisetzungsvorversuche. Die Daten sind auf der Website <http://gmoinfo.jrc.it> einsehbar. Neben dem Joint Research Center unterhält auch das Robert Koch Institut in Berlin eine Datenbank über die Freisetzungsvorversuche innerhalb der EU. Die so genannte SNIF-Datenbank findet sich unter http://www2.rki.de/cgi/lasso/snif/Search_e.lasso.

Die Daten aus diesen öffentlich zugänglichen Registern erlauben nicht nur, zukünftige Produkte vorherzusagen, sie ermöglichen auch, vergangene Forschungsbemühungen zu analysieren und wichtige Trends für die Zukunft abzuleiten. Ein Nachteil der Daten: es gibt keine Korrelation zwischen der Anzahl der Freisetzungsvorversuche und der Kommerzialisierung transgener Sorten. So brauchte es zum Beispiel mehrere hundert Freisetzungsvorversuche, um Tomaten zu entwickeln, die nicht weich werden während der Reife, aber nur 15 Versuche mussten gemacht werden, um eine virusresistente Papaya auf den Markt zu bringen (Arundel 2002a).

Im Folgenden wollen wir anhand der Daten über die Freisetzungsvorversuche zeigen, welche Pflanzenarten am meisten getestet werden, welche Eigenschaften die häufigsten sind und welche Trends sich für die nähere Zukunft abzeichnen. Wir greifen dabei auch auf die Analysen von Lhereux et al. (2003), Graff & Newcomb (2003) und Arundel (2002a/b) zurück. Diese WissenschaftlerInnen haben den Stand der Freisetzungsvorversuche bis Ende 2001 bzw. bis Mitte 2002 untersucht und in umfangreichen Studien dargestellt.

Bevor wir schauen, welche Pflanzen und welche Eigenschaften in der Freisetzungspipeline sind, werfen wir als erstes einen kurzen Blick auf die Anzahl der Freisetzungsvorversuche in den USA und der EU.

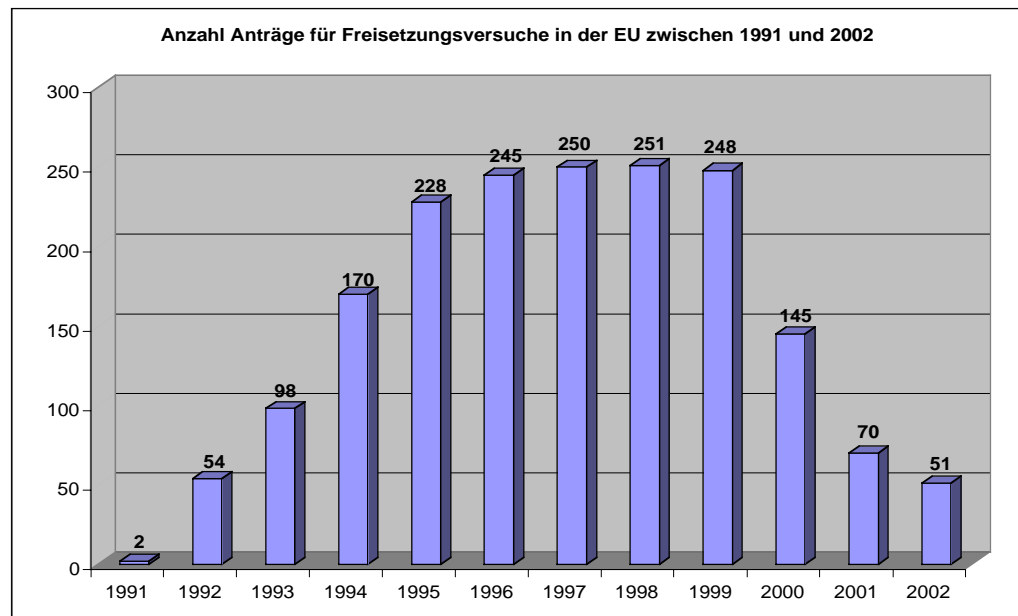


Abbildung 3: Freisetzungsanträge in der EU zwischen 1991 und 2002 (RKI 2003).

In der EU sind bisher insgesamt 1820 Anträge für die Freisetzung von transgenen Pflanzen registriert worden (RKI 2003; Stand August 2003). Wie Abbildung 3 zeigt, nimmt die jährliche Anzahl der Freisetzungsanträge seit 1999 drastisch ab. So waren 2002 rund 80 Prozent weniger Anträge eingegangen als noch 1999. Der Rückgang der Anträge ist vermutlich auf zwei Faktoren zurückzuführen (Lheureux et al. 2003): Erstens auf das Moratorium, das die EU-Umweltminister 1999 beschlossen hatten und das seither die Kommerzialisierung transgener Pflanzen blockiert. Zweitens dürfte auch die in der europäischen Bevölkerung weit verbreitete Skepsis gegenüber transgenen Pflanzen das Freisetzungsgeschehen beeinflusst haben. In diesem Jahr scheint die Anzahl der Anträge jedoch erstmals seit drei Jahren wieder zuzunehmen. Denn bis Ende September hat das Robert Koch Institut bereits 77 Anträge registriert, die einen Freisetzungsversuch im Jahr 2003 beantragen (RKI 2003).

Anders als in der EU lässt sich den USA keine Abnahme der Freisetzungsversuche beobachten (Abbildung 4). Hier herrscht weiterhin reges Tun auf den Feldern. Bisher sind in den USA 9125 Freisetzungsanträge angenommen worden (USDA 2003a; Stand Ende Juli 2003). Dass die Zahl um so vieles höher ist als in der EU, erklärt sich zum Teil mit der unterschiedlichen Registrierungskultur. Wird in den USA eine transgene Pflanze über mehrere Jahre hinweg auf dem Feld getestet, so verlangt das USDA für jedes Jahr einen Antrag. In der EU hingegen können die Anträge auch mehrere über die Jahre verteilte Freisetzungen beinhalten. Doch das unterschiedliche Vorgehen erklärt nicht alles. Berücksichtigt man nämlich, dass die durchschnittliche Dauer eines Feldversuchs in der EU 2,6 Jahre beträgt (Lheureux et al. 2003), so bleibt immer noch ein beträchtlicher Unterschied zwischen der EU und der USA. Das kleinere Engagement in der EU muss also noch andere Gründe haben. Zwei Faktoren, die einen grossen Einfluss haben dürften: der technische Rückstand, den EU-Firmen verglichen mit den nordamerikanischen Unternehmen haben, und der öffentliche Widerstand gegen Feldversuche in der EU (Arundel 2002b). Auf diese beiden Faktoren dürfte es auch zurückzuführen sein, dass viele EU-Firmen ihre transgenen

Pflanzen in den USA auf den Feldern testen. Ungefähr 12 Prozent der Freisetzungen in den USA werden von europäischen Firmen durchgeführt. Dasselbe lässt sich zwar auch umgekehrt feststellen, doch die europäischen Firmen führten 38 Prozent aller Versuche in den USA durch, während die amerikanischen Unternehmen nur gerade drei Prozent ihrer Freisetzungen in der EU machten (Arundel 2002b).

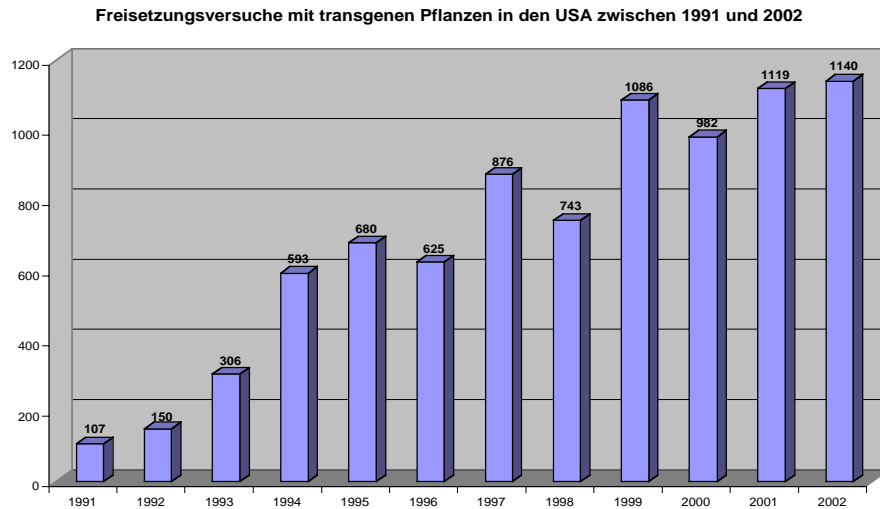


Abbildung 4: Angenommene Freisetzungsanträge in den USA zwischen 1991 und 2002 (nach Daten des USDA 2003a).

5.1 Welche Pflanzenarten werden in der EU freigesetzt?

In der EU wurden in den letzten zwölf Jahren vor allem transgene Mais-, Raps-, Kartoffel- und Zuckerrübensorten freigesetzt. 73,8 Prozent aller bisher in der EU durchgeführten Freisetzungen wurden mit einer Sorte dieser vier Arten gemacht, wobei Mais mit 26,9 Prozent die Spitze innehat, gefolgt von Raps mit 20,1, Zuckerrübe mit 15,4 und Kartoffel mit 11,4 Prozent (RKI 2003, Stand Ende Juli 2003). Das Verhältnis zwischen den vier Arten hat sich zwar von Jahr zu Jahr immer wieder geändert, doch die Dominanz der vier Arten ist stets und bis heute geblieben. In den Jahren 1991 bis 2001 lag der Anteil anderer Arten wie Tomate, Chicorée, Futterrübe, Baumwolle, Gemüse oder Weizen zwischen 1,1 bis 4,2 Prozent (Menrad et al. 2002). Seither sind Tomate und Futterrübe gänzlich von den Freisetzungsflächen verschwunden, Chicorée und Baumwolle sind je nur noch einmal getestet worden. Allein der Weizen konnte seine Stellung ausbauen; er war im Jahr 2002 auf rund zehn Prozent der Anträge zu finden (RKI 2003).

5.2 Welche Pflanzenarten werden in den USA freigesetzt?

Wie in Europa machen auch in den USA vier Pflanzenarten den grössten Teil der Freisetzungen aus, die in den letzten zehn Jahren durchgeführt worden sind: Mais, Kartoffel, Soja und Baumwolle. Allen weit voran ist der Mais: 4'189 Versuche wurden bisher vom USDA genehmigt, die das Testen von transgenem Mais zum Ziel hatten (USDA 2003a; Stand Ende Juli 2003). Die Freisetzungen mit Mais machen damit 45,9 Prozent aller bisher angenommenen Anträge aus. Mit rund 8 Prozent liegt die Kartoffel an zweiter Stelle. Dann folgen Soja mit 7,5 und Baumwolle mit 6,8 Prozent. Weitere Pflanzen mit einem nennenswerten Anteil sind: Tomate (5,7 Prozent), Weizen (3,2 Prozent), Luzerne (2 Prozent), Raps (2 Prozent) und Reis (1,7

Prozent). Ein differenzierteres Bild zeigt sich, wenn man den Anteil der verschiedenen Pflanzenarten über die letzten sieben Jahre hinweg betrachtet. Mais war während dieser Zeit stets die am häufigsten freigesetzte Pflanze, erhöhte seinen Anteil jedoch in den letzten beiden Jahren nochmals. 2001 waren 55 Prozent aller Freisetzungen Versuche mit transgenem Mais und letztes Jahr stieg der Anteil auf 60 Prozent. Ein anderes Bild zeigt sich bei der Kartoffel, die bisher insgesamt am zweithäufigsten freigesetzt worden ist. So erreichte die Anzahl der Versuche mit Kartoffeln 1999 zwar einen Höhepunkt (14,8 Prozent Anteil), seither sinkt sie aber gewaltig. In den letzten beiden Jahren waren es nur noch 2,7 bzw. 1,3 Prozent aller Versuche, in denen Kartoffeln getestet wurden (siehe Abbildung 5). Bei Soja und bei Baumwolle lassen sich keine eindeutigen Trends herauslesen. Anders wiederum bei der Tomate. Die Anzahl der Versuche, die mit ihr durchgeführt wurden, sanken in den letzten sieben Jahren kontinuierlich. Hatte die Tomate 1996 noch einen Anteil von 9,1 Prozent, so lag er letztes Jahr nur noch bei 1,5 Prozent und damit auch deutlich unter dem gesamten bisherigen Anteil der Tomate, der 5,7 Prozent beträgt. Ebenfalls gesunken ist die Anzahl der Versuche mit Raps. Im Jahr 1998 betrug ihr Anteil noch 4,2 Prozent, seither liegen die Werte jedoch nur noch bei rund einem Prozent (siehe Abbildung 5). Während die Versuche mit Tomaten und Raps sanken, stiegen diejenigen mit Weizen und Luzerne. Vor allem über die letzten vier Jahre hinweg wurden die beiden Pflanzen oft getestet. Über diesen Zeitraum hinweg lagen die Anteile von Weizen und Luzerne bei 4,9 bzw. bei 3 Prozent.

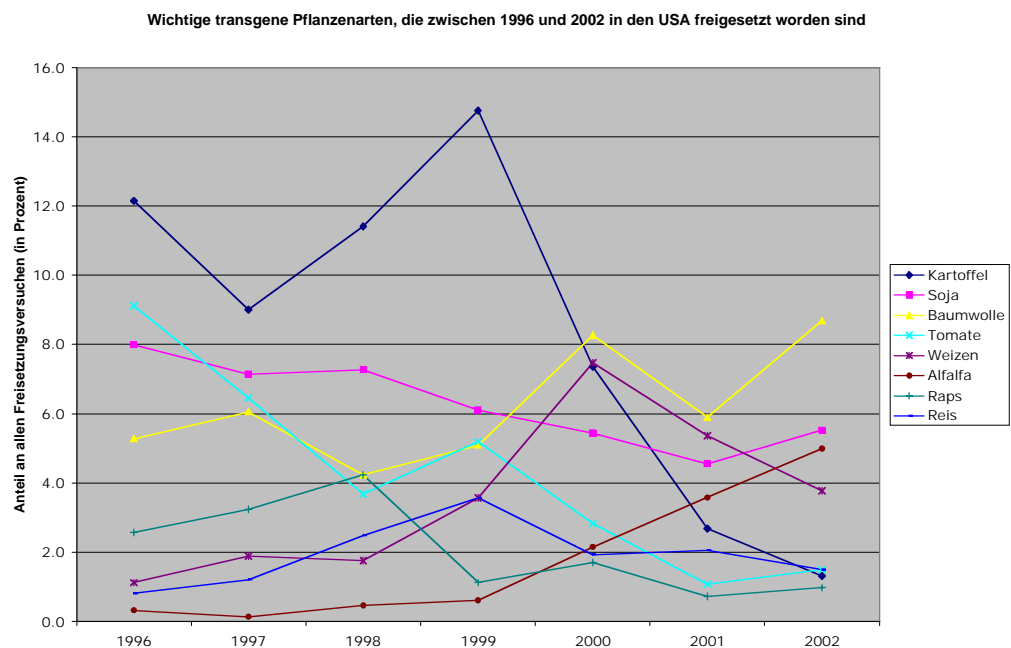


Abbildung 5: Für die acht neben Mais am häufigsten freigesetzten transgenen Pflanzen in den USA wird der prozentuale Anteil an den zwischen 1996 und 2002 genehmigten Anträgen gezeigt. Mais, die am häufigsten freigesetzte Pflanze in den USA, ist in der Abbildung nicht enthalten (Daten nach USDA 2003a).

5.3 Welche Eigenschaften werden in der EU getestet?

Resistenzen gegen Herbizide, Schädlinge und Pathogene sind die in der EU am häufigsten getesteten Eigenschaften. Zwischen 1991 und 2001 wurde in 42 Prozent aller Anträge eine Herbizidresistenz verbucht, in 10,8 Prozent der Fälle Insektenresistenz und bei 12,8 Prozent eine Resistenz gegen Pathogene (Lheureux et al. 2003). Insgesamt machen diese agronomischen Eigenschaften rund zwei Drittel aller Freisetzungsanträge in der EU aus. Die anderen Input-Eigenschaften weisen folgende Anteile auf: «erhöhter Ertrag/Resistenz gegen abiotischen Stress» liegt bei 3,8 Prozent und «männliche Sterilität» kommt auf 7,9 Prozent. Alles in allem liegt der Anteil der Input-Eigenschaften bei 77 Prozent. Die Output-Eigenschaften hingegen wurden zwischen 1991 und 2001 insgesamt nur in 19 Prozent der Freisetzungen getestet (Lheureux et al. 2003). Die restlichen 4 Prozent der Versuche wurden mit Markern durchgeführt. Bei den Versuchen mit Output-Eigenschaften hatten diejenigen transgenen Pflanzen den höchsten Anteil, deren Inhaltstoffe bzw. Nährstoffe verändert worden waren. Mit 11,7 Prozent lagen sie deutlich vor den Pflanzen mit industriellem Nutzen (3,8 Prozent) und denjenigen, die gesundheitsrelevante Substanzen produzieren (0,6 Prozent).

Verteilung der Eigenschaften in den EU-Freisetzungsanträgen zwischen 1991 und 2001

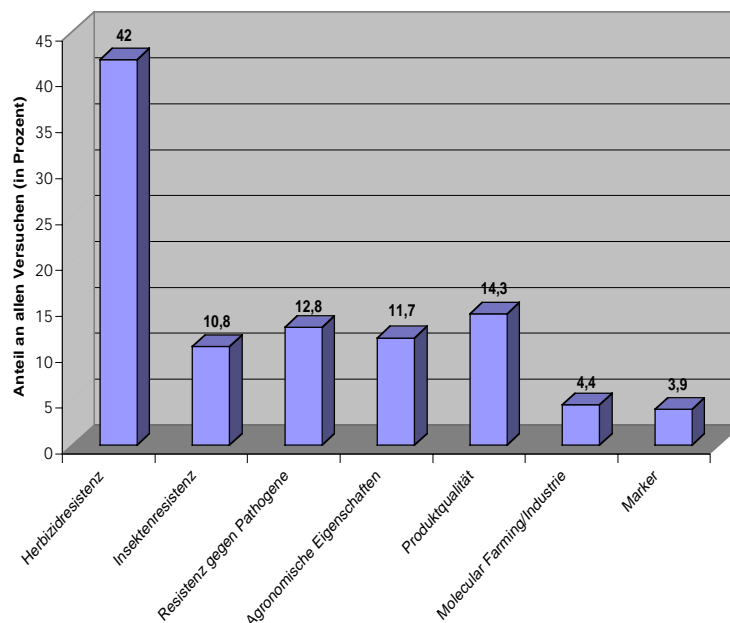


Abbildung 6: Verteilung der Eigenschaften in den Freisetzungsanträgen, die zwischen 1991 und 2001 in der EU angenommen worden sind (nach den Daten von Lheureux et al. 2003). Die agronomischen Eigenschaften beinhalten Pflanzen mit männlicher Sterilität, Resistenz gegen abiotischen Stress und erhöhten Ertrag. Die Resistenzen gegen Pathogene beinhalten Virus-, Pilz-, Bakterien-, und Nematodenresistenz.

Betrachtet man, wie sich die Verteilung der Eigenschaften in der EU über die einzelnen Jahre hinweg entwickelt hat, so zeigt sich folgendes Bild: Die jährlichen Anteile der Resistenzen gegen Herbizide, Schädlinge und Krankheitserreger sind zwischen 1991 und 2001 relativ konstant geblieben (Arundel 2002a). Eine leichte Zunahme ist hingegen bei den anderen Input-Eigenschaften zu verzeichnen, sind doch

die Anteile der männlich-sterilen und gegen abiotischen Stress resistenten Pflanzen seit 1996 gestiegen (Lheureux et al. 2003). Eine andere Tendenz zeigt sich bei den transgenen Pflanzen mit Output-Eigenschaften. Ihr Anteil stieg zwar anfangs der 90er Jahre an, erreichte dann aber 1996 einen Höhepunkt und fällt seither konstant (Lheureux et al. 2003, Arundel 2002a). In Zahlen: 1996 betrug der Anteil der Output-Eigenschaften noch rund 25 Prozent, fünf Jahre später waren es nur noch 12 Prozent (Lheureux et al. 2003). Die drastische Abnahme von Freisetzungsvorhaben mit Output-Eigenschaften betrifft fast alle Kategorien, speziell aber die Veränderung des Stärke- und des Fettsäurenmetabolismus (Menrad et al. 2002). Die Anzahl der Pflanzen mit veränderten Nähr- und Inhaltsstoffen sank von 1996 bis 2001 um mehr als die Hälfte (von 16 Prozent auf 6,5 Prozent). Noch drastischer ist die Abnahme bei den Pflanzen mit industrieller Nutzung. Ihr Anteil fiel von 6,3 auf 1,1 Prozent (Lheureux et al. 2003). Eine Output-Eigenschaft hingegen weist eine positive Tendenz auf: das «Molecular Farming» von gesundheitsrelevanten Substanzen. Transgene Pflanzen mit dieser Eigenschaft werden zwar nur sehr selten getestet, doch seit 1996 steigt ihre Anzahl konstant (Lheureux et al. 2003).

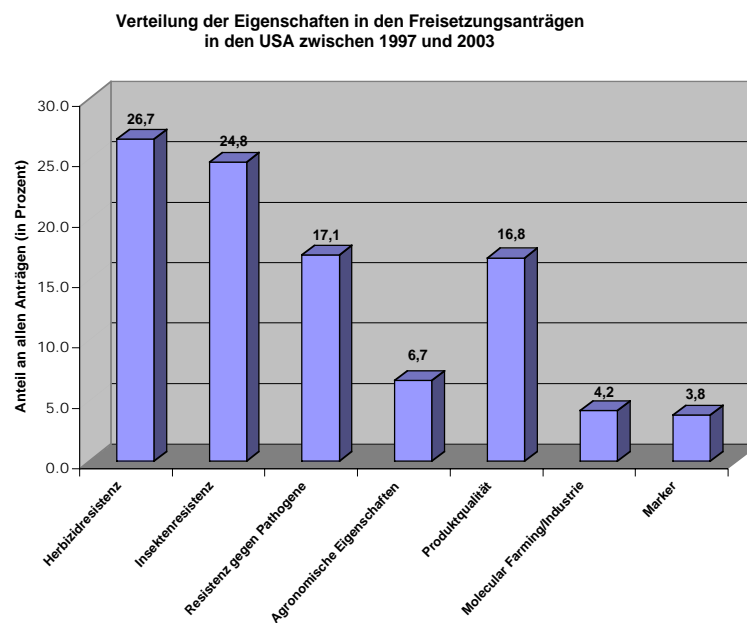


Abbildung 7: Verteilung der Eigenschaften in den Freisetzungsanträgen, die zwischen 1997 und 2003 (Stand Ende Juli 2003) in den USA angenommen wurden (Daten nach USDA 2003). Die «agronomischen Eigenschaften» beinhalten Resistenzen gegen abiotischen Stress, erhöhten Ertrag, männliche Sterilität, Stickstoffnutzung und weitere Input-Eigenschaften.

5.4 Welche Eigenschaften werden in den USA getestet?

Dominierende Input- und sinkende Output-Eigenschaften – diese Situation herrscht auch auf den Freisetzungsfeldern in den USA vor. Wie die Abbildung 7 zeigt, waren bisher Herbizid- und Insektenresistenz die in den USA am häufigsten getesteten Eigenschaften. Von allen Freisetzungsanträgen, die zwischen 1997 und 2003 in den USA angenommen wurden, machen sie 26,7 bzw. 24,8 Prozent aus. Nimmt man die Anteile der Pathogenresistenz und der agronomischen Eigenschaften hinzu, so machen die Input-Eigenschaften drei Viertel aller bisher in den USA durchgeführten Freisetzung aus. Was die Output-Eigenschaften betrifft, so kamen die transgenen Pflanzen mit veränderter Produktqualität auf einen Anteil von 16,8 Prozent und die Pflanzen, die im Molecular Farming eingesetzt wurden, auf 4,2 Prozent. Insgesamt hatte damit nur rund ein Fünftel der Versuche das Testen von Output-Eigenschaften zum Ziel.

Abbildung 8 zeigt, wie die in den USA getesteten Eigenschaften sich in den letzten neun Jahren entwickelt haben. Folgende Trends zeichnen sich ab: Seit 1995 sind Herbizid- und Insektenresistenz die Eigenschaften, die am häufigsten im Freiland getestet werden. Während die herbizidresistenten Pflanzen in den letzten sieben Jahren zwischen einem Anteil von 20 bis 30 Prozent schwankten, verlief die Entwicklung der insektenresistenten Pflanzen anfänglich konstanter und erlebt seit drei Jahren einen starken Anstieg – von 22 Prozent im Jahr 1999 auf 34 Prozent im Jahr 2002. In die umgekehrte Richtung verläuft die Entwicklung der Pathogenresistenzen: 1999 wurden noch 22 Prozent aller Versuche mit pathogenresistenten Pflanzen durchgeführt, drei Jahre später nur noch 8 Prozent. Dieser Rückgang ist vor allem auf das verminderte Interesse an der Entwicklung von virusresistenten Pflanzen zurückzuführen. Leicht gestiegen ist in den letzten Jahren der Anteil der Pflanzen mit verbesserten agronomischen Eigenschaften, wozu unter anderem die verstärkte Entwicklung von Hochertragsorten und stressresistenten Pflanzen beigetragen hat.

Jährliche Verteilung der Eigenschaften in den USA zwischen 1994 und 2002

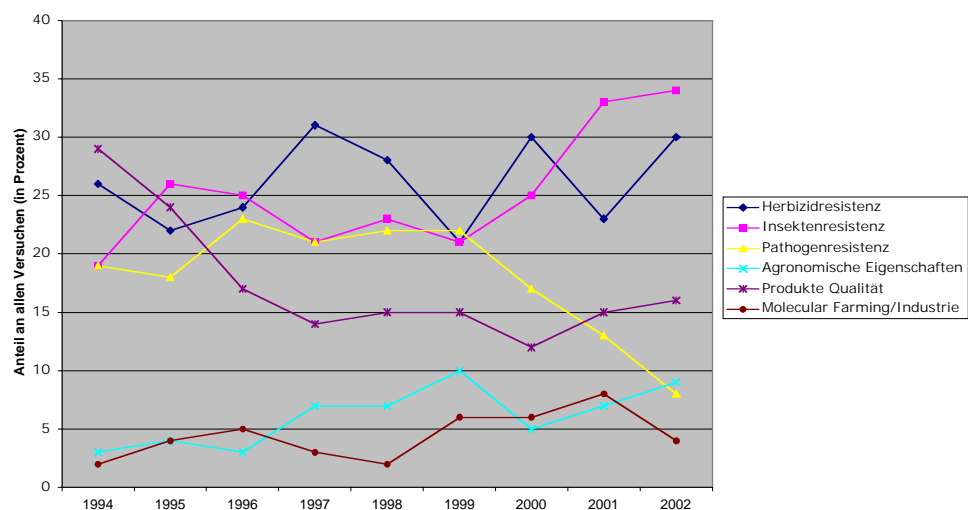


Abbildung 8: Jährliche Verteilung der Eigenschaften, die in den USA zwischen 1994 und 2002 im Freiland getestet wurden (nach Daten von USDA 2003a).

Die in den USA in den letzten Jahren am häufigsten getestete Output-Eigenschaft ist ein veränderter Proteingehalt. Dann folgen in absteigender Bedeutung: modifizierter Kohlenstoffmetabolismus, verspätete Reifung, neuer Nährstoffgehalt und veränderte Fettsäurezusammensetzung (Graff & Newcomb 2003). Wie in der EU sank auch in den USA die Anzahl der Freisetzungen mit Output-Eigenschaften. So erreichten die Pflanzen mit veränderter Produktqualität 1994 zwar einen Anteil von 29 Prozent und damit einen Höhepunkt, aber in den drei darauf folgenden Jahren sank ihr Anteil auf 14 Prozent, wo er seither mehr oder weniger stabil geblieben ist. Der Rückgang ist zum einen Teil darauf zurückzuführen, dass Mitte der 90er Jahre die Versuche mit den verspätet reifenden Tomaten abgeschlossen waren. Doch das scheint nicht der einzige Grund zu sein. Denn fast alle Eigenschaften, welche die Lebensmittelqualität betrafen, erlebten zwischen 1994 und 1996 einen Höhepunkt und dann eine Abnahme (Arundel 2002b).

5.5 Welche kombinierten Eigenschaften werden getestet?

Transgene Pflanzen können die verschiedenen Eigenschaften auch kombiniert enthalten. Welche kombinierten Eigenschaften zwischen 1991 und 2001 am häufigsten im Freiland getestet worden sind, haben Lheureux et al. (2003) untersucht – und zwar sowohl für die USA wie auch für die EU (siehe Tabellen 10 und 11 sowie die Tabellen 27 und 28 im Anhang).

In der EU wurden in 42 Prozent aller Notifikationen mehr als eine Eigenschaft erwähnt; 33,6 Prozent betrafen transgene Pflanzen mit zwei Eigenschaften und 8,4 Prozent solche mit drei Eigenschaften¹ (Lheureux et al. 2003). Die meisten der kombinierten Eigenschaften sind dabei in den folgenden Pflanzen zu finden: Mais, Kartoffeln, Raps und Weizen sowie zu einem kleineren Teil auch Zuckerrübe. Bei Mais war die Kombination von Insekten- und Herbizidresistenz am häufigsten, bei Raps diejenige von Herbizidresistenz und männlicher Sterilität (siehe Tabelle 10).

	Mais	Weizen	Raps	Zuckerrübe	Kartoffel
1 Eigenschaft	58,6 %	50 %	49,3 %	82,7 %	48,3 %
2 Eigenschaften	40,3 %	50 %	50,4 %	14,7 %	44,2 %
3 und mehr Eigenschaften	1,1 %	0 %	0,3 %	2,6 %	7,5 %
Anzahl Notifikationen mit mehr als einer Eigenschaft	191	10	185	47	103
Notifikationen total	462	20	365	272	199

Tabelle 10: Wichtige Kombinationen von Eigenschaften, die in der EU zwischen 1991 und 2002 getestet wurden (verändert nach Lheureux et al. 2003).

In den USA war die Kombination von Eigenschaften am wichtigsten bei Mais, Raps und Baumwolle sowie zu einem geringeren Teil auch bei Soja und Weizen. Bei Mais und Baumwolle war die Kombination von Insekten- und Herbizidresistenz am häufigsten, bei Raps diejenige von Herbizidresistenz und männlicher Sterilität und bei Soja war es der Verbund zweier Output-Eigenschaften: veränderte Fettsäurezusammensetzung und veränderter Proteinmetabolismus (siehe Tabelle 11).

¹ Nicht mitgezählt sind Pflanzen, die ein Markergen als zweite Eigenschaft enthalten.

	Mais	Weizen	Soja	Raps	Baumwolle
1 Eigenschaft	85,0 %	98,8 %	96,3 %	88,0 %	91,8 %
2 Eigenschaften	14,8 %	1,2 %	3,7 %	12,0 %	8,2 %
3 und mehr Eigenschaften	0,2 %	0 %	0 %	0 %	0 %
Anzahl Notifikationen mit mehr als einer Eigenschaft	601	3	24	22	48
Notifikationen total	4'018	256	644	184	587

Tabelle 11: Wichtige Kombinationen von Eigenschaften, die in der USA zwischen 1991 und 2002 getestet wurden (verändert nach Lheureux et al. 2003).

Lheureux et al. (2003) gehen davon aus, dass in den nächsten Jahren die Anzahl der im Freiland getesteten transgenen Pflanzen, die mehr als eine Eigenschaft besitzen, zunehmen wird. Zudem dürfte sich auch der Trend verstärken, dass transgene Pflanzen mit kombinierten Eigenschaften vermehrt kommerzialisiert und grossflächig angebaut werden (Lheureux et al. 2003, NAS 2002). Mit dem Trend werden neue Sicherheitsprobleme einhergehen. Denn die gestapelten Gene können in der Pflanze nicht-additiv und synergistisch wirken und in der Umwelt kumulative Effekte auslösen. Auf zwei Ebenen werden deshalb vermehrt Untersuchungen notwendig sein: auf der des Phänotyps der Pflanzen und auf der Ebene der Felder, auf denen die Pflanzen mit gestapelten Genen angebaut werden (NAS 2002).

5.6 Zwischenbilanz

Wie die Daten aus den Freisetzungsfeldern zeigen, konzentrierte sich die Entwicklung von transgenen Pflanzen hauptsächlich auf Input-Eigenschaften und auf die Pflanzenarten, die einen grossen Einzelmarkt haben. Der Anteil der Output-Eigenschaften ist in den letzten Jahren gesunken. In den nächsten vier bis fünf Jahren dürften deshalb in Europa kaum innovative Produkte auf den Markt kommen. Das zeigt Tabelle 12, welche die Prognose von Lheureux et al. (2003) wiedergibt.

2003 bis 2006	2007 bis 2011	Nach 2011
<u>Herbizidresistenz:</u> Mais, Raps, Soja, Weizen, Zuckerrübe, Futterrübe, Baumwolle und Chicorée	<u>Pilzresistenz:</u> Weizen, Raps, Sonnenblume und Fruchtbäume	<u>Stressresistenz:</u> Verschiedene Pflanzen
<u>Insektenresistenz:</u> Mais, Baumwolle und Kartoffeln	<u>Virusresistenz:</u> Zuckerrübe, Kartoffeln, Tomate, Melone und Fruchtbäume	<u>Erhöhter Ertrag:</u> Verschiedene Pflanzen
<u>Herbizid- und Insektenresistenz:</u> Mais und Baumwolle	<u>Herbizidresistenz:</u> Weizen, Gerste und Reis	<u>Molecular Farming:</u> Tabak, Mais, Kartoffeln und Tomaten
<u>Veränderter Stärke- oder Fettsäuregehalt:</u> Kartoffeln, Soja und Raps	<u>Modifizierte Stärke:</u> Kartoffeln und Mais	<u>Funktionelle Inhaltsstoffe:</u> Reis, Gemüse
<u>Fruchtreife:</u> Tomate	<u>Modifizierte Fettsäuren:</u> Soja und Raps	<u>Hypoallergene:</u> Verschiedene Pflanzen
	<u>Modifizierter Proteingehalt:</u> Raps, Mais und Kartoffeln	
	<u>Erhöhte Menge an Erucasäure:</u> Raps	

Tabelle 12: Eigenschaften transgener Pflanzen, die in Zukunft in der EU auf den Markt kommen könnten (nach Lheureux et al. 2003).

6. Transgene Pflanzen in der Pipeline

6.1 Input-Eigenschaften

6.1.1 Herbizidresistenz

Im Jahr 2002 waren drei Viertel der kommerziell angebauten transgenen Pflanzen resistent gegen ein Herbizid. Rechnet man die Sorten mit, die sowohl herbizid- wie insektenresistent sind, dann war die Herbizidresistenz sogar auf 83 Prozent der Flächen zu finden (James 2003). Die Mehrheit der angebauten herbizidresistenten Pflanzen war dabei resistent gegen Glufosinat oder Glyphosat (Murphy 2003b). Beides sind nicht-selektive Herbizide und wirken damit gegen alle Pflanzen. Glyphosat ist von Monsanto entwickelt worden und wird unter dem Namen «Roundup» verkauft. Bis heute sind folgende Pflanzenarten mit Resistenz gegen «Roundup» für den Anbau zugelassen worden: Baumwolle, Mais, Raps, Rübsen, Soja und Zuckerrübe. Das Herbizid Glufosinat ist ein Produkt von AgrEvo (heute Bayer CropScience), sein Handelsname lautet «Liberty Link» und es ist in folgenden kommerzialisierten Arten zu finden: Baumwolle, Chicorée, Mais, Raps, Rübsen, Reis, Soja und Zuckerrübe. Neben Glufosinat und Glyphosat sind noch Resistenzen gegen zwei weitere Herbizide auf dem Markt und zwar gegen die selektiv wirkenden Herbizide Sulfonylhurea (Baumwolle, Flachs) und Bromoxynil (Baumwolle, Raps).

Wie die Daten aus den Freisetzungsfeldern der USA und der EU zeigen, gehörten die herbizidresistenten transgenen Pflanzen in den letzten Jahren zu den am häufigsten getesteten (siehe Abschnitt 5.3 und 5.4). Dabei zeigt sich folgender Trend: Die wirtschaftlich erfolgreichen Resistenzen gegen Glufosinat und Glyphosat dominieren das Geschehen. Einerseits werden sie weiterhin entweder einzeln oder kombiniert mit anderen Eigenschaften in Sorten der Pflanzenarten getestet, die bereits kommerzialisiert sind. Andererseits werden sie aber auch in weiteren Pflanzenarten getestet. Dazu gehören zum Beispiel für Glyphosat: Erdbeere, Erbse, Futterrübe, Gurke, Kopfsalat, Reis, Tomate, Weizen und Zwiebeln (siehe Tabelle 31 im Anhang). Bei Glufosinat sind es: Acker-Rettich, Erbse, Pfefferminz, Schwarzer Senf, Tomate, Weizen und Zuckerrohr (siehe Tabelle 32 im Anhang). In der nächsten Zukunft dürfte somit eine Reihe von neuen transgenen Sorten auf den Markt kommen, die resistent gegen Glufosinat oder Glyphosat sind. Gemäss Duke et al. (2002) gibt es kein anderes System in der Entwicklung, das an den Erfolg der beiden Breitbandherbizide anknüpfen könnte.

Bei den selektiven Herbiziden gibt es eine grössere Anzahl von Substanzen, gegen die mit Fremdgenen eine Resistenz in Pflanzen erzielt worden ist. In den USA und der EU sind transgene Pflanzen für Freisetzungsversuche zugelassen worden, die zum Beispiel gegen eines der folgenden Herbizide resistent sein sollen: 2,4-D, Isoxazol, Dalapon, Cyanamid, Oxylin, Dicamba, Chloroacetanilid oder Imidazolinon (siehe Tabelle 13). Die Erfahrungen aus der Vergangenheit zeigen jedoch, dass viele transgene Pflanzen, die resistent gegen selektive Herbizide sind, aus ökonomischen, ökologischen oder toxikologischen Gründen nicht auf den Markt gelangen (Duke et al. 2002). Welche der transgenen Pflanzen aus Tabelle 13 in Zukunft kommerzialisiert werden könnten, ist ungewiss und müsste näher untersucht werden.

Herbizid	Pflanze	Hersteller	Land und Jahr
Bromoxynil	Raps	INRA	Frankreich 2000
Bromoxynil, Glufosinat, Glyphosat	Raps	Centre Technical Interprofessionnel des Oléagineux Métropolitains (CETIOM)	Frankreich 1999
Chloroacetanilide	Mais	Zeneca	USA 2000
Sommerwurzkontrolle	Sonnenblume	Semillas Pioneer SA	Spanien 1998
CBI	Baumwolle	Syngenta	USA 2002
CBI	Mais	Syngenta	USA 2001
CBI	Reis	Syngenta	USA 2002
CBI	Mais	BASF	USA 2002
CBI	Soja	Stine Biotechnology	USA 2001
Cynamid	Soja	University of Nebraska/Lincoln	USA seit 2002
Dalapon	Weizen	Instituto Nacional de Investigaciones Agrarias y Alimentarias INIA	Spanien 1999/2002
Dalapon	Mais	Syngenta	USA 2000
Dicamba	Soja	University of Nebraska/Lincoln	USA 2003
Imidazolinon	Soja	Stine Biotechnology	USA 2001
Imidazolinin	Mais	BASF	USA 2000
Isoxaflutol + Glyphosat	Soja	Bayer CropScience	Frankreich 2000
Isoxazole	Soja	Instituto Nacional de Investigaciones Agrarias y Alimentarias INIA	Frankreich 1997
Isoxazole	Raps	Rhone-Poulenc	Spanien 1997
Isoxazole	Soja	Aventis (Bayer CropScience)	USA 2000
Isoxazole +Glufosinat	Mais	Rhone-Poulenc	Spanien 1999
Oxynil	Baumwolle	Rhone-Poulenc	Griechenland 1999
Oxynil +Glufosinat	Raps	INRA	Frankreich 2001
Protoporphyrinogen oxidase inhibitor tolerant	Mais	Syngenta	USA 2000
Protoporphyrinogen oxidase inhibitor tolerant	Zuckerrübe	Syngenta	USA 2000
Sulphonylurea	Raps	Advanta Seeds	Niederlande 1999
2,4-D	Baumwolle	United Agri Products	USA 2001
2,4-D	Soja	United Agri Products	USA 2001

Tabelle 13: Beispiele von transgenen Pflanzen mit Herbizidresistenzen, die zwischen 1997 und 2003 in den USA oder in der EU im Freiland getestet worden sind (nach USDA 2003a, JRC 2003, RKI 2003). CBI steht für *confidential business information*. Nicht aufgeführt sind die zahlreichen Versuche mit transgenen Pflanzen, die gegen Glufosinat bzw. Glyphosat resistent sind. Siehe hierzu auch die Tabellen 31 und 32 im Anhang.

6.1.2 Insektenresistenz

Bisher sind weltweit achtzehn insektenresistente transgene Pflanzen für den Anbau zugelassen worden (siehe Tabelle 33 im Anhang). Alle diese Pflanzen besitzen ein fremdes Gen, das von *Bacillus thuringiensis* (Bt) stammt. Bt ist ein Bodenbakterium, das verschiedene Toxinkristalle bildet, die giftig wirken auf Pflanzenschädlinge wie Schmetterlingsraupen, Mücken und Käfer. Die ersten für die Bildung der Toxine verantwortlichen *cry*-Gene sind bereits Anfang der 80er Jahre isoliert und kloniert worden. Die erste transgene Bt-Pflanze entstand Mitte der 80er Jahre. Seither sind viele verschiedene Kulturpflanzenarten mit *cry*-Genen bestückt worden. Für den Anbau zugelassen sind bisher drei Bt-Baumwollsorten, zehn Bt-Maissorten, vier Bt-Kartoffelsorten und eine Bt-Tomate. Angebaut werden aber nur die Baumwoll- und Maissorten. Sie wuchsen im Jahr 2002 auf rund einem Viertel der weltweiten Anbaufläche, auf der transgene Pflanzen standen (James 2003). Die vier von Monsanto entwickelten Bt-Kartoffelsorten hingegen werden seit 2000 nicht mehr angebaut. Damals machten sie in den USA noch drei Prozent der totalen Kartoffelanbauflächen aus (Walker et al. 2002). Heute sind sie verschwunden, weil sowohl die Großverkäufer von Kartoffelprodukten als auch die Lebensmittelverarbeiter auf die Skepsis der VerbraucherInnen reagierten und sich weigerten, transgene Kartoffeln zu kaufen (Llewellyn & Higgins 2002). Neben den ökonomischen Gründen gab es auch noch agronomische Ursachen, die gegen die Bt-Kartoffeln sprachen. So mussten die Landwirte trotz der gentechnisch hergestellten Resistenz weiterhin Insektizide spritzen, weil nicht alle Schädlinge empfindlich auf Bt reagierten (Walker et al. 2002). Nach dem schwachen ökonomischen Auftritt der Bt-Kartoffel scheint sich Monsanto ganz aus dem Kartoffelgeschäft zurückzuziehen, um sich auf die erfolgreicherer Pflanzenarten zu konzentrieren (Llewellyn & Higgins 2002).

Welches Schicksal die ebenfalls von Monsanto entwickelte Bt-Tomate erlebt hat, ist uns nicht bekannt. Es ist aber anzunehmen, dass sie bisher – wie die Bt-Kartoffeln – an der fehlenden Marktakzeptanz gescheitert ist.

Während Bt-Kartoffeln und Bt-Tomate eine ökonomische Fehlentwicklung waren, sind die Bt-Baumwoll- und Maissorten bisher ökonomisch ein Erfolg. Doch wie lange der hält, ist ungewiss. Da die zugelassenen transgenen Bt-Sorten alle nur ein *cry*-Gen besitzen, könnten sich schon bald gegen Bt resistente Schädlinge entwickeln, womit die ganze Strategie wirkungslos würde. Das ist einer der Gründe, weshalb die Agrochemiekonzerne und die universitäre Forschung nach Alternativen zu Bt suchen. Zudem wollen sie das Repertoire auch erweitern, um Schädlinge mit gentechnischen Mitteln bekämpfen zu können, gegen welche die Cry-Proteine nicht wirken.

Mit welchen gentechnischen Strategien diese Ziele erreicht werden sollen, zeigt der Blick auf die Freisetzungsfelder: Neben der Herbizidresistenz ist die Resistenz gegen Insekten die am häufigsten im Freiland getestete Eigenschaft. In den USA ist sie in den letzten Jahren sogar zur Spitzenreiterin geworden. So sind seit 1999 über 1'500 Anträge für die Freisetzung von insektenresistenten Pflanzen gestellt worden, wobei 70 Prozent der Anträge Mais betrafen und 12 Prozent Baumwolle (USDA 2003a). Das verbleibende Fünftel teilen sich die restlichen Pflanzen wie zum Beispiel Aubergine, Erdnuss, Salat, Kartoffel, Tomate, Reis, Raps und Soja. Wie in den USA machte Mais in den letzten vier Jahren auch in der EU rund 70 Prozent aller Versuche mit insektenresistenten Pflanzen aus (RKI 2003). Welche Gene die getesteten transgenen Pflanzen besitzen, ist in den Datenbanken nicht immer einsehbar – oder zumindest nicht bei den drei wichtigsten Playern Monsanto, Syngenta und Dow. Denn die

berufen sich bei ihren Versuchen auf das Geschäftsgeheimnis und deklarieren die eingefügten Fremdgene als CBI (*confidential business information*). Trotzdem lassen sich einige der verfolgten Strategien schildern (siehe dazu auch Tabelle 33 im Anhang):

Neue Bt-Pflanzen: Neben Mais, Tomate, Kartoffel und Baumwolle wollen die Protagonisten noch weitere Bt-Pflanzenarten entwickeln. Zu den in den letzten Jahren neu im Freiland getesteten Bt-Pflanzen gehören Reis, Rübsen, Erdnuss, Walnuss, Broccoli, Aubergine und Sonnenblume.

Bt kombiniert mit Proteaseinhibitoren (PI): PI-Proteine wirken gegen Schadinsekten, indem sie in deren Verdauungsprozess eingreifen. Obwohl transgene Pflanzen mit PI-Genen seit rund fünfzehn Jahren getestet werden, konnte noch keine erfolgreich kommerzialisiert werden. PI's wirken weniger toxisch und auch langsamer als Bt-Toxine und chemische Insektizide. Zudem können sich Insekten rasch gegen transgene PI-Pflanzen anpassen (Walker et al. 2000, Llewellyn & Higgins 2002). Ein Ansatz, die bestehenden Probleme zu umgehen, ist gleich mehrere PI-Gene in dieselbe Pflanze einzufügen (Walker et al. 2002). Ein anderer Ansatz besteht darin, PI-Gene kombiniert mit Bt-Genen ins pflanzliche Erbgut einzuschleusen. Beide Ansätze werden zurzeit im Freiland getestet.

Lektine: Pflanzliche Lektine bilden eine heterogene Gruppe von Zucker-bindenden Proteinen. Viele Lektine wirken toxisch auf Insekten. Da sie auch auf solche Insekten wirken, bei denen Cry- und PI-Proteine wirkungslos bleiben, gelten sie für die Herstellung von transgenen Pflanzen als besonders interessant (Walker et al. 2002). Die Verwendung von Lektinen birgt jedoch ein Risiko, weil einige der Lektine auch toxisch auf Säuger wirken können (Sharma et al. 2000). Wie bei den Proteaseinhibitoren kombinieren die ForscherInnen auch die Lektine mit den cry-Genen, um eine bessere und breitere Resistenz zu erhalten (Llewellyn & Higgins 2002).

Vegetative insektizide Proteine (VIP): VIP's sind bakteriellen Ursprungs und wirken toxisch auf Insekten. VIP 1 und 2 hat man aus *Bacillus cereus* isoliert, VIP 3 stammt wie die Cry-Proteine aus *Bacillus thuringiensis* (Sharma et al. 2000). Letzteres wird von Syngenta genutzt und gilt als besonders potentieller Kandidat für die Entwicklung von kommerziell erfolgreichen transgenen Pflanzen. Denn VIP 3 hat eine einzigartige Wirkungsweise und ist hoch giftig für Spodoptera- und Agrotis-Arten (Walker et al. 2002, Sharma et al. 2000).

Stapelung von Bt-Genen: Um der Entwicklung von resistenten Insekten vorzubeugen, werden zunehmend auch transgene Pflanzen entwickelt, die mehr als ein Bt-Gen besitzen.

Die geschilderten Strategien werden zurzeit an verschiedenen Pflanzen im Feld erprobt (siehe Tabelle 33 im Anhang). Gemäss Syngenta gehören diese Produkte zur zweiten Generation der insektenresistenten Pflanzen (Syngenta 2003c):

1. Generation: Bt-Endotoxine
2. Generation: Bt-Endotoxine, VIP, andere insektizid wirkende Proteine
3. Generation: Eingriff in den Metabolismus der Sekundärmetabolite
4. Generation: Designer Toxine (Proteinengineering)

Noch nicht im Freiland getestet werden die transgenen Pflanzen, die von Syngenta der dritten und vierten Generation insektenresistenter Pflanzen zugeordnet werden. Dazu gehören diejenigen, bei denen in den Metabolismus der Sekundärmetabolite eingegriffen wird. Pflanzen bilden eine Vielzahl von Substanzen (Sekundärmetabolite), mit denen sie sich gegen Schadinsekten wehren. Mit Hilfe der Gentechnik wird nun versucht, so in den Stoffwechsel der Sekundärmetabolite einzugreifen, dass die transgenen Pflanzen sich besser gegen Insekten wehren können. Dieser Ansatz gilt zwar als viel versprechend, weist aber noch einige Probleme auf (Llewellyn & Higgins 2002). Eines davon ist, dass durch den Eingriff in den Metabolismus unerwünschte Nebeneffekte auftreten, die sich unter anderem negativ auf den Ertrag auswirken können (Llewellyn & Higgins 2002, Sharma et al. 2000).

Folgende insektenresistente Pflanzen könnten in den kommenden fünf Jahren auf den Markt kommen:

- Baumwolle: Syngenta hat für 2004 eine Baumwolle angekündigt, die dank dem VIP 3-Gen resistent gegen mehrere Insekten sein soll, darunter auch gegen Kapselbohrer und Eulenfalter. Monsanto und Dow haben je eine Baumwolle entwickelt, die mehr als ein Bt-Gen besitzt.
- Erdnuss: Die Universität von Georgia testet seit 1997 eine Sorte mit dem CryIA(c)-Gen, die resistent gegen *Elasmopalpus lignosellus* sein soll.
- Mais: DuPont hat zwei neue Maislinien entwickelt, die eine ist resistent gegen den Wurzelbohrer, die andere gleichzeitig gegen den Maiszünsler und die Ypsiloneule.
- Raps: Seit 1998 untersucht die Universität von Georgia im Freiland einen Raps, der dank dem CryIA(c)-Gen insektenresistent sein soll.
- Reis: Verschiedene Firmen und Forschungsinstitute führten in den letzten Jahren Freisetzungsversuche mit Bt-Reis durch.
- Soja: Monsanto testet seit 1998 transgene Sojabohnen im Freiland. Das verwendete Gen ist geheime Geschäftsinformation.
- Sonnenblume: Pioneer (DuPont) prüft seit 1999 insektenresistente Sonnenblumen, deren fremdes Gen unter das Geschäftsgeheimnis fällt.

6.1.3 Virusresistenz

Bisher sind fünf transgene virusresistente Pflanzensorten für den Anbau zugelassen worden: eine Papayasorte und zwei Kürbissorten in den USA sowie zwei Kartoffelsorten in den USA und in Kanada (Agbios 2003; Tabelle 34 im Anhang). Die beiden Kartoffelsorten sind zusätzlich resistent gegen den Kartoffelkäfer. Angebaut werden nur die Papaya- und Kürbissorten. Die beiden von Monsanto entwickelten Kartoffelsorten haben keinen Markt gefunden, wie bereits im Abschnitt zur Insektenresistenz geschildert wurde. Alle bisher kommerzialisierten virusresistenten Pflanzen besitzen jeweils Gene, die für Hüllproteine des abzuwehrenden Virus kodieren. Dank dieser Gene gelingt es den Pflanzen, sich gegen die eindringenden Viren zu schützen.

In den USA sind bisher über 1'200 Freisetzungsanträge für virusresistente Pflanzen eingereicht worden (USDA 2003a), wobei die Anzahl der Anträge in den letzten Jahren stark abgenommen hat: 1999 betrug der Anteil der virusresistenten Pflanzen 15 Prozent, ein Jahr später 9 Prozent und im Jahr 2002 nur noch 3 Prozent (USDA

2003a). In der EU sind bisher 135 Anträge für virusresistente Pflanzen eingereicht worden (RKI 2003). Folgende Ansätze werden zurzeit verfolgt, um virusresistente Pflanzen herzustellen:

Hüllprotein-Gen-vermittelte Resistenz: Bei dieser Methode wird das Gen für das Hüllprotein des Virus in die Pflanze eingeführt. Das Hüllprotein wird in der transgenen Pflanze hergestellt, so dass eine Virusinfektion vorgetäuscht und eine anschließende tatsächliche Infektion abgemildert wird.

Ribonuklease: Transgene Pflanzen, die Ribonukleasegene exprimieren, können gegen gewisse Viren resistent sein. Es wird vermutet, dass die Ribonuklease die doppelsträngige RNA, die während der Replikation bestimmter Viren entsteht, erkennt und abbaut und es dadurch zur Ausbildung einer Virusresistenz kommt.

Schutz durch defekte Transportproteine: Viele Viren brauchen Transportproteine, um sich von Pflanzenzelle zu Pflanzenzelle ausbreiten zu können. Baut man modifizierte Gene in die Pflanzen ein, die für nicht voll funktionstüchtige Transportproteine kodieren, ergibt sich eine Resistenz gegen Viren.

In Zukunft soll eine zweite Generation von virusresistenten transgenen Pflanzen entstehen. Anders als bei der ersten Generation soll dabei nicht mehr auf viralen Sequenzen aufgebaut werden, sondern auf der Möglichkeit, bestimmte virale Gene mittels Silencing-Mechanismen stillzulegen (Jeske 2002).

Welche virusresistenten transgenen Pflanzen in der EU und in den USA zurzeit im Freiland getestet werden, gibt die Tabelle 34 im Anhang wieder. Folgende Pflanzen könnten dabei in den nächsten vier Jahren auf den Markt kommen:

- Erbse: Die Universität von Idaho testet seit 1998 zwei Erbsensorten im Freiland, die resistent gegen PEMW bzw. gegen BYMV sein sollen. Die Resistenz gegen PEMV wird mit dem Hüllproteingen des Virus erzielt, bei der Resistenz gegen BYMV kommt ein Ribonukleasegen von *Schizosaccharomyces pombe* zum Einsatz.
- Erdnuss: Die Universität von Georgia führt seit 1998 Freisetzungsversuche mit Erdnuss durch, die dank dem Virus-eigenen Hüllproteingen resistent gegen TSWV sein sollen.
- Tomate: BHN Research untersucht in den USA seit 1999 Tomaten im Freiland, die sich dank dem Hüllproteingen gegen PVY wehren können. In Italien testet das Istituto Sperimentale per la Patologia Vegetale in Rom Tomaten mit Resistenz gegen CMV.
- Melone: Seminis Vegetable Seeds testet in den USA seit 1998 transgene Melonen, die resistent sind gegen CMV, PRSV und WMV2. Das verwendete Gen fällt unter das Geschäftsgeheimnis.
- Weizen: Die Universität von Idaho testet seit 1997 zwei Weizensorten. Die eine soll dank dem Hüllproteingen resistent gegen BYDV sein. Die andere besitzt ein Ribonukleasegen von *Schizosaccharomyces pombe* und soll resistent gegen die beiden Viren WSMV und BYDV sein.
- Zuckerrübe: Verschiedene Akteure führen Freisetzungsversuche mit transgenen virusresistenten Zuckerrüben durch.

6.1.4 Pilzresistenz

Bisher sind weltweit mehr als 600 Freisetzungsanträge genehmigt worden, die das Testen von pilzresistenten transgenen Pflanzen zum Ziel hatten (RKI 2003, USDA 2003). Trotz der zahlreichen Versuche ist noch keine pilzresistente transgene Pflanze kommerzialisiert worden. Die Herstellung solcher Pflanzen gestaltet sich als schwierig (Murphy 2003b). Ein Grund liegt in den komplexen Interaktionen, die sich bei einer Infektion zwischen Pilz und Pflanze auf der molekularen Ebene abspielen. Ein anderer darin, dass sich diese Interaktionen unterscheiden und zwar nicht nur von Pilzart zu Pilzart bzw. von Pflanzenart zu Pflanzenart. Die Interaktionen unterscheiden sich auch zwischen den verschiedenen Rassen einer Pilzart und den verschiedenen Varietäten einer Pflanzenart (Tenhaken 2002).

Bisher sind verschiedene Strategien getestet worden, um pilzresistente Pflanzen herzustellen. Sie lassen sich grundsätzlich in zwei Kategorien einteilen. Bei der einen baut man die Strategie auf Einzel-Gen-Abwehrmechanismen auf, bei der anderen auf Multi-Gen-Abwehrmechanismen (Tenhaken 2002). Zur ersten Kategorie gehören etwa die Insertion von Genen, welche die pilzliche Zellwand abbauen (z.B. Chitinasen und Glucanasen), das Einfügen von so genannten Abwehrpeptiden (z.B. Thionin, Defensin) oder das Einsetzen von Genen, welche zu einer erhöhten Menge von Abwehrstoffen wie Phytoalexinen oder Resveratrol führen (z.B. Stilbensynthase). Bei den Abwehrpeptiden wird in letzter Zeit vermehrt mit synthetisch hergestellten Genen gearbeitet (Rajasekaran et al. 2002). Mit den genannten Ansätzen konnten bisher nur Teilerfolge erzielt werden. So gelang es zum Beispiel noch kaum, breit wirkende Resistenzen zu erzielen (Murphy 2003b, Tenhaken 2002). Aus epidemiologischer Sicht ist zudem damit zu rechnen, dass die oben genannten Ansätze von den Pilzen rasch umgangen werden könnten. Um dies zu verhindern, wird geplant, mehrere Proteine mit antifungaler Wirkung gleichzeitig in die Pflanzen einzufügen. Ein anderer Weg, die Resistenzbildung der Pilze zu verhindern, findet sich in der zweiten Kategorie der Strategien, bei den Multi-Gen-Abwehrmechanismen (Tenhaken 2002). Hier geht es vor allem darum, die pflanzeigenen Abwehrmechanismen zu nutzen. Pflanzen reagieren mit einer Kaskade von verschiedenen Abwehrmechanismen auf das Auftreten von Schadpilzen. Die gentechnische Strategie ist es nun zum Beispiel, die Schwelle der Pflanzen konstitutiv herunterzusetzen, bei der sie ihre Abwehrmechanismen in Gang setzen (Tenhaken 2002). Wie bei der Herbizidresistenz scheint die Agrochemieindustrie dabei auch Strategien zu entwickeln, um transgene Pflanzen und chemische Mittel im Multipack verkaufen zu können. So hat Syngenta transgene Arabidopsis hergestellt, die dank dem eingebauten *nim*-Gen eine verstärkte systemisch erworbene Resistenz (*systemic acquired resistance*, SAR) gegen den falschen Mehltau besitzt. Diese Resistenz kann zudem nochmals verstärkt werden, wenn die Pflanze mit dem von Syngenta hergestellten Mittel «Bion» behandelt wird (Syngenta 2003b). Einige der oben geschilderten Ansätze werden zurzeit in Feldversuchen getestet. In Tabelle 35 im Anhang sind einige Beispiele aus den USA und der EU wiedergegeben. Welche der aufgelisteten transgenen Pflanzen in den kommenden fünf Jahren auf den Markt kommen könnten, ist schwer abzuschätzen, da keine Daten über die Ergebnisse aus den Versuchen vorhanden sind. Aufgrund der Kontinuität der Freisetzungsversuche sind folgende Pflanzen gute Kandidaten:

- Sonnenblume: Pioneer (DuPont) testete in den USA zwischen 1998 und 2002 Sonnenblumen, die resistent gegen *Sclerotinia* sind (das verwendete Gen ist *confidential business information*).

- Weizen: Syngenta testet seit 1999 Weizen, der resistent gegen Fusarium ist (das verwendete Gen ist *confidential business information*).
- Kopfsalat: Harris Moran untersuchte zwischen 1998 und 2002 Salat mit Resistenz gegen Sclerotinia (das Fremdgen ist die Oxalatoxidase von Weizen).
- Banane: Gemäss BIO (2003) soll DNA Plant Technology in den nächsten Jahren eine transgene Banane auf den Markt bringen, die resistent gegen Sigatoka ist.
- Raps: Gemäss Lhereux et al. (2003) sollen bis 2007 transgene Rapsorten auf den Markt kommen, die resistent gegen Pilze sind.

Obwohl bisher viel Aufwand betrieben wurde, um bei Kartoffel eine transgene Resistenz gegen *Phytophthora infestans* zu erzielen, sind bisher immer noch keine transgene *Phytophthora*-resistenten Sorten in Marktnähe.

6.1.5 Bakterienresistenz

In den USA und der EU widmeten sich bisher rund 110 Freisetzungen dem Testen von bakterienresistenten transgenen Pflanzen. Bisher ohne Erfolg. Denn noch ist keine transgene Pflanze mit Bakterienresistenz kommerzialisiert worden. Die Gründe hierfür sind ähnlich wie bei den Pilzresistenzen (siehe oben). Das strategische Vorgehen ebenfalls: es werden Einzelgen-Abwehrmechanismen erprobt, synthetische Gene werden getestet und es kommen Gene zum Einsatz, welche die Multigen-Abwehrmechanismen positiv beeinflussen sollen (Rajasekaran et al. 2002, Tenhaken 2002).

Die Tabelle 36 im Anhang zeigt, welche bakterienresistenten Pflanzen in den USA und in der EU im Freiland getestet werden. Aufgrund der Angaben in den Freisetzungsdatabanken lassen sich zurzeit keine eindeutigen Kandidaten herauslesen, die in den kommenden fünf Jahren auf den Markt kommen könnten.

6.1.6 Stressresistenz

Pflanzen werden dann als stressresistent bezeichnet, wenn sie trotz widriger Umweltbedingungen wachsen und gute Erträge bringen. Anders gesagt: der Ausdruck «Stress» bezieht sich bei Pflanzen auf externe Umweltbedingungen wie Trockenheit, Temperaturwechsel (Kälte, Hitze), Salzigkeit und Schwermetalle (PEW 2001). Trockenheit und Salzigkeit sind die weltweit am verbreitetsten Stressfaktoren und erschweren an vielen Orten des Südens den Anbau von Kulturpflanzen (PEW 2001, Murphy 2003b). Die erwartete Klimaänderung und veränderte Landnutzungen könnten in den kommenden Jahren dazu führen, dass Trockenheit und Salzigkeit zunehmen. So könnten laut Schätzungen in den nächsten 25 Jahren bis zu 30 Prozent des anbaufähigen Landes durch Versalzung verloren gehen (Altman 1999).

Trotz der bestehenden und erwarteten Probleme sind stressresistente transgene Pflanzen bisher kaum auf den Freisetzungsfeldern aufgetaucht. In der EU machen sie weniger als vier Prozent aller bisher beantragten Freisetzungen aus (RKI 2003), in den USA weniger als zwei Prozent (USDA 2003a). In den USA wurden zudem etliche der Versuche nicht mit Nahrungsmittelpflanzen durchgeführt, sondern mit Gräsern für Golfplätze oder für Zierrasen.

Weshalb die Anzahl der Versuche mit stressresistenten Pflanzen so gering ist, lässt sich vermutlich auf zwei Gründe zurückführen. Einerseits sind umweltbedingte Stressfaktoren vor allem im Süden ein Problem, womit der Markt für stressresistente Pflanzen kaum grosse Einkünfte verspricht. Die grossen Agrochemiekonzerne haben

entsprechend nur wenig Interesse an der Entwicklung von stressresistenten Pflanzen gezeigt. Andererseits ist die Herstellung von Stressresistenz schwierig. Bisher hat man vor allem einfache Strategien verfolgt, um transgene stressresistente Pflanzen herzustellen: Durch das Einfügen eines einzelnen Fremdgens sollten die transgenen Pflanzen stressresistent werden. Die Resistenzen gegen Trockenheit, Hitze, Kälte und Salzigkeit beruhen aber auf einem komplexen Zusammenspiel von mehreren Genen und Stoffwechselwegen (Murphy 2003b, Datta 2002, PEW 2001). Stehen Pflanzen zum Beispiel unter Trockenheitsstress, aktivieren sie mindestens vier unabhängige Stoffwechselwege, die wiederum eine Reihe von Genen anschalten. Aufgrund der Komplexität bleibt es deshalb unklar, ob die einfachen gentechnischen Ansätze, die auf einem Gen beruhen, überhaupt zum Erfolg führen können (Murphy 2003b). Viele der bisherigen Bemühungen dürften deshalb bereits in der Labor- oder in der Gewächshausphase fehlgeschlagen haben, womit nur wenige Pflanzen den Weg auf die Freisetzungsfelder fanden.

Die Herstellung von stressresistenten transgenen Pflanzen steckt weitgehend in der Phase der Grundlagenforschung und damit erst am Anfang der Entwicklung (Menrad et al. 2002). Neuere Ansätze, die zurzeit im Labor oder auf den Freisetzungsfeldern erprobt werden, beruhen nicht mehr allein auf dem Einfügen eines Fremdgens, das direkt an der Abwehr von Stress beteiligt ist. Vielmehr versuchen die WissenschaftlerInnen nun auch diejenigen Gene zu verändern, die ganz am Anfang der Stoffwechselwege stehen und deshalb für die Aktivierung mehrerer an der Stressresistenz beteiligten Gene verantwortlich sind (Thomashow 2002, Datta 2002, Yamaguchi-Shinotaki et al. 2002). Welche Ansätze auch verfolgt werden, stressresistente transgene Pflanzen sind in den nächsten Jahren nicht auf dem Markt zu erwarten. Man kann davon ausgehen, dass die Kommerzialisierung frühestens ab 2010 beginnen wird (Menrad et al. 2002).

Welche transgenen stressresistenten Pflanzen zurzeit im Freiland getestet werden, ist in der Tabelle 37 im Anhang wiedergegeben. Im Folgenden werden einige der Ansätze kurz geschildert:

Osmolyte: Pflanzen versuchen Trocken- und Salzstress abzuwehren, indem sie Wasser auf zellulärer Ebene zurückhalten. Bei der Entwicklung von stressresistenten Pflanzen haben deshalb die Substanzen besondere Aufmerksamkeit erhalten, mit denen die Pflanzen Wasser in den Zellen halten (PEW 2001). Das sind zum Beispiel Zucker, gewisse Aminosäuren oder Glycinbetaine. Zahlreiche transgene Pflanzen sind hergestellt worden, deren fremde Gene für Proteine kodieren, welche osmoprotektierende Substanzen bilden (zum Beispiel: Cholinoxidase, Betainaldehyddehydrogenase, Arginindecaboxylase oder Mannitol-1-Phosphat-Dehydrogenase).

LEA und Chaperone: *Late Embryogenesis Abundant* (LEA) Proteine schützen Makromoleküle (Enzyme, Lipide und mRNAs) vor Dehydrierung. Transgener Reis, der ein LEA-Gen von Gerste besitzt, ist toleranter gegen Trockenheit und Salzstress (Datta 2002). Ähnlich wie LEA schützen auch Chaperone Makromoleküle vor Wasserentzug. So zeigen zum Beispiel transgene Pflanzen mit Hitzeschockproteinen eine erhöhte Toleranz gegen Hitze (Datta 2002).

ABA: Werden Pflanzen gestresst, stellen sie mehr Abscisinsäure (ABA) her. Dieses Pflanzenhormon erhöht die Toleranz gegen Kälte, Salz und Trockenheit (McCourt 2002). GentechnikerInnen planen nun, den Stoffwechsel von ABA so zu verändern, dass die resultierenden transgenen Pflanzen stressresistenter werden.

Membranproteine: Pflanzen enthalten in ihren Membranen verschiedene Proteine, die unter Stresssituationen den osmotischen Druck regulieren (Datta 2002). Ein Beispiel ist das AtNHX1 Protein von *Arabidopsis thaliana*. WissenschaftlerInnen von der Universität Toronto haben dieses Gen in das Erbgut von Raps und Tomaten inseriert mit dem Resultat, dass diese Pflanzen resistenter gegen Salzstress waren (Zhang et al. 2001).

Transkriptionsaktivatoren/Regulatorgene: Befinden sich Pflanzen unter abiotischem Stress, so werden verschiedene, von einander unabhängige Stoffwechselwege eingeschaltet, um den Stress abzuwehren. An den einzelnen Stoffwechselwegen sind jeweils mehrere verschiedene Gene bzw. Proteine beteiligt. Kontrolliert werden die Stoffwechselwege jedoch nur von ein paar wenigen, zentralen Proteinen (Transkriptionsaktivatoren, Regulatorproteine). WissenschaftlerInnen wollen nun genau diese zentralen Proteine verändern, um so auf die ganze Kaskade der pflanzlichen Stressantwort Einfluss zu nehmen. Zwei Beispiele: Die Firma Mendel Biotechnology testet in den USA zurzeit einen transgenen Raps im Feld, der das cbf-Gen von *Arabidopsis thaliana* exprimiert. cbf steht für *cold regulated binding factor*. Das CBF-Protein aktiviert bei Kälte eine Reihe von Genen, deren Produkte den Raps vor den tiefen Temperaturen schützen sollen. An der Michigan State University wird ebenfalls mit einem Transkriptionsfaktor gearbeitet. Hier testen die WissenschaftlerInnen eine Gurke im Freiland, in deren Erbgut sie das *C-repeat-binding-factor*-Gen von *A. thaliana* eingefügt haben. Das fremde Gen beziehungsweise dessen Produkt soll verschiedene andere Gene aktivieren und somit die Gurke gegen Salzstress resistent machen.

6.1.7 Weitere Input-Eigenschaften

Neben den bisher geschilderten Fällen werden zurzeit eine Reihe weiterer Input-Eigenschaften im Feld getestet. Dazu gehören zum Beispiel transgene Pflanzen mit männlicher Sterilität. Sie dienen der Herstellung von Hybridpflanzen, die normalerweise mehr Ertrag bringen als die nicht-hybriden Sorten (Murphy 2003b). Aventis (Heute Bayer CropScience) hat bereits fünf transgene männlich sterile Rapslinien auf den Markt gebracht (Agbios 2003). Alle enthalten das *Barnase*-Gen des Bakteriums *Bacillus amyloliquefaciens*. In Zukunft dürften weitere männlich sterile Pflanzen (Raps und Mais) auf den Markt kommen. Ebenfalls um höheren Ertrag geht es bei den transgenen Pflanzen, die mit der so genannten *Dwarfing*-Technik hergestellt werden. *Dwarfing* steht für verkleinertes Wachstum und hat bereits bei der so genannten Grünen Revolution eine Rolle gespielt. Damals führte die Einführung von kürzer wachsenden Weizensorten zu mehr Ertrag. Die Gene, die dafür verantwortlich sind, heissen *rht* (*reduced height*) und wurden Ende der 90er Jahre isoliert. Bei Weizen hatten sie zwei Wirkungen: sie führten einerseits zu kürzeren und kräftigeren Pflanzen, womit mehr Dünger verabreicht werden konnte, ohne dass die Pflanzen umkippten. Andererseits sorgten die Gene dafür, dass die Weizenpflanzen mehr Energie in die Entwicklung der Samen steckten und somit den Ertrag erhöhten. Nach der Isolierung der Gene wollen die GentechnikerInnen nun transgene Pflanzen herstellen, welche die *rht*-Gene exprimieren (PEW 2001). Weitere Beispiele von freigesetzten transgenen Pflanzen mit veränderten Input-Eigenschaften sind in Tabelle 14 wiedergegeben.

Pflanze	Gentechnische Veränderung (Quelle des Gens)	Zweck der Veränderung	Hersteller	Land und Jahr
Kartoffel	ohne Angaben	erhöhter Ertrag	Max-Planck-Gesellschaft	BRD 1998
Kopfsalat	ohne Angaben	erniedrigter Nitratgehalt	INRA	FRA 1999
Mais	Barnase (<i>B. amyloliquefaciens</i>) PAT*	männl. Sterilität	Biogemma	USA 2002
Mais	CBI (CBI)	erhöhter Ertrag	Monsanto	USA 2000
Soja	CBI (CBI) EPSPS*	veränderte Wachstumsrate	Monsanto	USA 2002
Soja	CBI (CBI) EPSPS*	erhöhter Ertrag	Monsanto	USA 2000
Raps	Alaninaminotransferase (Gerste) NptII*	veränderter Stickstoff- metabolismus	Arcadia Biosciences	USA 2002
Raps	Barnase (<i>B. amyloliquefaciens</i>)	männl. Sterilität	verschiedene Firmen	EU
Raps	ohne Angaben	Zwergwachstum	Plant Genetic System	Belgien 1999
Reis	CBI (CBI)	männl. Sterilität	Bayer Crop Science	USA 2002
Reis	ADP-Glucose-Pyrophosphorylase (Mais)	erhöhter Ertrag	Louisiana State University	USA 2002
Wassermelone	ohne Angaben	erhöhter Ertrag	Sementi Nunhems	Italien 1999
Weizen	ADP-Glucose-Pyrophosphorylase (Mais) PAT*	erhöhter Ertrag	Montana State University	USA 2000

Tabelle 14: Beispiele von transgenen Pflanzen mit veränderten Input-Eigenschaften, die zurzeit in den USA oder in der EU im Feld getestet werden. Die mit * gekennzeichneten Gene sind Markergene. CBI steht für *confidential business information*. Nach Daten aus den Freisetzungsdatabanken von USDA (2003) und RKI (2003) sowie von JRC (2003).

6.2 Output-Eigenschaften

6.2.1 Lebensmittel

Die gentechnischen Veränderungen der Qualität von Nahrungsmittelpflanzen zielen darauf ab, den Nährstoffgehalt zu erhöhen, Allergene aus den Pflanzen zu entfernen und den Lebensmitteln verschiedene funktionelle Eigenschaften hinzuzufügen. Tabelle 15 zeigt Beispiele von transgenen Pflanzen, deren Produktqualität verändert ist und die zurzeit in den USA oder in der EU in Freisetzungsversuchen getestet werden. Die Tabelle 38 im Anhang gibt zudem eine Reihe von transgenen Nahrungsmittelpflanzen wieder, die sich in der Entwicklungspipeline befinden. In den nachfolgenden Abschnitten werden einige der transgenen Nahrungsmittel mit veränderten Output-Eigenschaften näher beschrieben.

Pflanze	Gentechnische Veränderung (Quelle des Gens)	Zweck der Veränderung	Hersteller	Land und Jahr
Aubergine	Tryptophan-2-Monooxygenase (ohne Angaben)	Parthenokarpie	Istituto Sperimentale per l'Orticultura	Italien 1999
Erdbeere	ohne Angaben	Parthenokarpie	Universita Ancona	Italien 2002
Himbeere	Tryptophan-2-Monooxygenase (ohne Angaben)	Parthenokarpie	Universita Ancona	Italien 1999
Kartoffel	ohne Angaben	Fruktanbildung	Max-Planck-Gesellschaft	DE 1998
Kartoffel	Ohne Angaben	Erhöhter Carotenoid-Gehalt	Technische Universität München	DE 2002
Kartoffel	UDP-Glucose-Glucosyltransferase (Kartoffel) NptII*	weniger Alkaloide	ARS	USA 1997
Karotte	ohne Angaben	veränderte Haltbarkeit	Bejo Zaden	NL 2000
Kohl	ohne Angaben	veränderte Haltbarkeit	Bejo Zaden	NL 1999
Kopfsalat	Ferritin (Soja) NptII*	Erhöhter Eisengehalt	Harris Moran	USA 2002
Melone	Tryptophan-2-Monooxygenase (ohne Angaben)	Parthenokarpie	Istituto Sperimentale per l'Orticultura	Italien 1999
Soja	CBI (CBI)	Erhöhter Stanolgehalt	Monsanto	USA 2000
Soja	Palmitoylthioesterase (Soja) Delta-12 Saturase (Soja) PAT*	veränderter Gehalt an Ölsäure	University of Nebraska/Lincoln	USA 2002
Tomate	CBI (CBI) NptII*	Parthenokarpie	Seminis Vegetable Seeds	USA 2000
Tomate	Tryptophan-2-Monooxygenase (ohne Angaben)	Parthenokarpie	Istituto Sperimentale per l'Orticultura	Italien 2000
Tomate	Sucrosephosphatsynthase (Mais) NptII*	verändertes Frucht-zuckerprofil	BHN Research	USA 2002
Wassermelone	CBI (CBI) NptII*	Parthenokarpie	Seminis Vegetable Seeds	USA 2001
Zuckerrübe	ohne Angaben	Fruktanbildung	IATA	Italien 1999

Tabelle 15: Beispiele von transgenen Nahrungsmittelpflanzen mit veränderter Produktqualität, die zurzeit in den USA oder in der EU im Freiland getestet werden. Die mit einem Stern gekennzeichneten Gene sind Markergene. CBI steht für *confidential business information*. (Angaben nach (USDA 2003a, RKI 2003, JRC 2003).

Goldener Reis

Reiskörner enthalten weder Vitamin-A noch dessen Vorläufersubstanz Beta-Karotin. In Regionen, wo sich die Bevölkerung fast ausschliesslich von Reis ernähren muss, leiden viele Menschen unter Vitamin-A-Mangel und seinen Folgen – Augenkrankheiten, Wachstumsstörungen und Immunschwäche. Vor allem Kinder und Schwangere sind betroffen. Die Weltgesundheitsorganisation (WHO) schätzt, dass jährlich weltweit zwischen 250'000 und 500'000 Kinder erblinden, weil sie zu wenig

Vitamin A haben (WHO 2003). Die WHO verfolgt im Wesentlichen drei Strategien, den Vitamin-A-Mangel zu beheben: sie verteilt mit Vitamin-A angereicherte Lebensmittel, versorgt die Kinder mit hoch dosierten Vitamin-A-Kapseln und fördert das Anlegen von Kleingärten. Eine technologische Lösung anbieten, das wollen Forschende der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich und der Universität Freiburg. Sie haben zwei Gene aus der Narzisse sowie ein bakterielles Gen ins Erbgut von Reis eingefügt und somit einen Stoffwechselweg kreiert, mit dem Reispflanzen in ihren Körnern Beta-Karotin produzieren können (Ye et al. 2000). Da der gentechnisch veränderte Reis eine gelbe Farbe hat, haben ihn die Forschenden «Golden Rice» genannt. Ob das goldene Produkt tatsächlich – wie die Forschenden versprechen – den Vitamin-A-Mangel beheben wird, ist fraglich. Einige Punkte sprechen dagegen: Die Ursachen für Hunger und Unterernährung ist nicht das Fehlen von Nahrungsmitteln sondern die Armut. Der Goldene Reis könnte zwar mehr Vitamine zum selben Preis zur Verfügung stellen, aber von diesem Vorteil können nur diejenigen profitieren, die auch die finanziellen Mittel dazu haben (van Wijk 2002). Ein weiteres Problem, das der Goldene Reis nicht lösen kann: Für die Verdauung, die Aufnahme und den Transport von Beta-Karotin braucht eine ausgewogene Diät, zu der Fette und Proteine gehören. Viele der Vitamin-A-Mangel erkrankten Kindern leiden jedoch auch unter Proteinmangel und Magendarminfektionen, welche die Aufnahme von Beta-Karotin und dessen Umwandlung in Vitamin-A schmälern. In Ländern, wo es bereits ausreichend Beta-Karotin-reiche Lebensmittel gibt, ist denn auch die limitierte Bioverfügbarkeit von Beta-Karotin die Hauptursache für Vitamin-A-Mangel (van Wijk 2002). Noch bleibt zudem ungeklärt, ob die Menschen die gelblichen Reiskörner auch akzeptieren werden oder ob es bei der Einführung des Goldenen Reis eine breite Informationskampagne braucht (van Wijk 2002). Unbeantwortet bleibt heute auch die Fragen, ob der Goldene Reis ein Risiko für die menschliche Gesundheit und die Umwelt darstellt oder nicht (van Wijk 2002). Zurzeit wird der Goldene Reis in Freisetzungsversuchen getestet. Bis er die Marktreife erlangt, dürfte es noch vier bis fünf Jahre dauern.

Goldener Senf

Wie beim «*Golden Rice*» geht es auch bei der Entwicklung von Goldenem Senf um die erhöhte Produktion von Vitamin-A in den gentechnisch veränderten Sorten. Das Projekt dazu hatte Monsanto im Jahr 2000 lanciert in Kooperation mit der Universität von Michigan State, dem Tata Energy Research Institut in Indien und der US-amerikanischen Behörde für internationale Entwicklung (Mackey 2002). Ausgangspunkt des Projekts war ein von Monsanto entwickelter transgener Raps, dessen Samen 50mal mehr Karotine enthalten als diejenigen von normalem Raps. Obwohl die Kommerzialisierung dieses Rapses mehrfach angekündigt worden ist, blieb sie bislang aus. Die Technologie, die zu diesem Karotin-reichen Raps führte, hat Monsanto jedoch dem Projekt zur Verfügung gestellt. Statt bei Raps soll sie nun beim Indischen Senf (*Brassica juncea*) zum Einsatz kommen. Indischer Senf wird in Ländern wie Indien, Nepal oder Bangladesch angebaut und liefert zum Beispiel in Indien das am zweithäufigsten konsumierte Öl (Mackey 2002). Die weite Verbreitung des Indischen Senfs sowie die gute Aufnahme von Karotin in Ölen sind aus Sicht der Projektanten zwei wichtige Voraussetzungen, um mit dem Projekt erfolgreich die Vitamin-A Versorgung zu verbessern. Bisher steckt das Projekt aber noch in der Labor- und Gewächshausphase.

Fruktane – mehr Ballaststoffe für Kartoffeln und Zuckerrüben

Fruktane, auch Fruktosane oder Polyfruktosane genannt, sind nach Stärke die am weitesten verbreiteten Speicherkohlenhydrate höherer Pflanzen. Sie kommen vor allem in Knoblauch, Zwiebeln, Chicorée, Topinambur und Artischocken reichlich vor. Das Besondere an den Fruktanen ist: sie können von den menschlichen Verdauungsenzymen nicht geknackt werden und passieren deshalb den Magen und Dünndarm unverändert. Anders ausgedrückt: Fruktane sind zwar Kohlenhydrate, da sie aber nicht verdaut werden, schlagen sie kaum auf den Kalorienhaushalt. Eine weitere besondere Eigenschaft der Fruktane ist ihre probiotische Wirkung. Fruktane regen die Verdauung an, weil sie im Dickdarm gute Bakterien auf Kosten von schlechten Bakterien fördern. Einige Wissenschaftler meinen zudem, dass Fruktane die Blutfettwerte verbessern und das Risiko für Dickdarm-Krebs verringern. Abgesehen von den Blähungen, die nach übermäßigem Verzehr auftreten können, gelten Fruktane als unbedenklich (Dibb & Mayer 2000). Aufgrund all dieser Eigenschaften gelten Fruktane als eine viel versprechende Zutat für funktionelle Lebensmittel (Ritsema & Smeekens 2003).

Inulin und Oligofruktose sind zwei der Kohlenhydrate die zur Gruppe der Fruktane gehören. Beide werden heute in Joghurts und Milchdesserts als «funktionelle» Lebensmittelzutaten eingesetzt – Oligofruktose, die süß schmeckt, als Zuckeraustauschstoff und Inulin als Fettaustauschstoff. Gewonnen werden die beiden Stoffe aus Chicorée, der vergleichsweise hohe Mengen dieser Fruktane besitzt.

Nicht nur die Lebensmittelindustrie zeigt reges Interesse an den probiotisch wirkenden und kalorienarmen Fruktanen, auch die GentechnikerInnen haben die Stoffe entdeckt (siehe dazu Ritsema & Smeekens 2003, Schulman 2002, Heyer 2000). Zum Beispiel am Zentrum für Pflanzenzucht in Wageningen, wo WissenschaftlerInnen ein Artischocken-Gen, das für die Fruktanbildung mit verantwortlich ist, in Zuckerrübe transferiert haben (Sevenier et al. 1998). Die Zuckerrübe produzierte dann Zucker mit halb soviel Kalorien wie sonst. Wie die niederländischen WissenschaftlerInnen stellten auch ihre italienischen Kollegen vom Istituto per l'Agrometeorologia e l'Analisi Ambientale Applicata all'Agricoltura eine transgene Zuckerrübe her, die Fruktane bildet. Diese transgene Zuckerrübe wurde 1998 im Freiland getestet (RKI 2003). Forschende von der Firma Florimond Desprez VEUVE & Fils wiederum testeten in den Jahren 2000 und 2001 eine transgene Chicoréesorte im Freiland, deren Fruktanbildung verändert war (RKI 2003). In England hat Advanta Seeds 1996 die Bewilligung erhalten, bis ins Jahr 2005 transgene Zuckerrüben zur Fruktanbildung im Freiland zu testen (Dibb & Mayer 2000). Ob es bei allen bisher erwähnten Versuchen nur um die Entwicklung von Lebensmitteln geht, ist unklar. Fruktane sind auch Basismaterialien für Leime, Polymere und Textilien. Es könnte daher sein, dass transgene Fruktan-Pflanzen auch hergestellt werden, um eine billige Quelle für diese Kohlenhydrate zu haben (Dibb & Mayer 2000). Eine Fruktan-Pflanze, die zumindest als funktionelles Lebensmittel angepriesen wird, ist die transgene Kartoffel des Max-Planck-Instituts in Golm. Dort haben Forschende zwei Gene aus der Artischocke in die Kartoffel eingefügt, so dass diese in ihren Knollen nun bis zu fünf Prozent Inulin bildet (Hellwege et al. 2000). Die transgene Fruktan-Kartoffel wird zurzeit in Deutschland im Freiland untersucht. Bis sie auf den Markt kommt, dürften noch einige Jahre vergehen.

Kartoffeln mit weniger Bitterstoffen

Je nach genetischer Herkunft besitzen Kartoffeln mehr oder weniger grosse Mengen an Glykoalkaloiden. Da Glykoalkaloide bitter schmecken, haben diejenigen Kartoffel-

sorten geringe Marktchancen, die grosse Mengen dieser Substanzen produzieren. Doch in Zukunft sollen auch sie eine Chance erhalten. Denn Wissenschaftlern des US-amerikanischen Landwirtschaftsministeriums ist es gelungen, Kartoffeln gentechnisch so zu verändern, dass sie weniger Bitterstoffe produzieren (Moehs et al. 1997). Sie inserierten den Kartoffeln ihr eigenes Solanidin-Glycosyltransferase-Gen in antisense Richtung ins Erbgut. Die transgenen Kartoffeln bildeten danach weniger Solanin und Chaconin, zwei der wichtigsten Bitterstoffe. Die Freisetzungsversuche begannen 1997 und halten bis heute an (USDA 2003a). Die Bitterstoff-arme Kartoffel könnte demnach in nächster Zeit auf den Markt gelangen.

Lycopen-Tomate

«Vergesst die Attacke der Killer-Tomate, dies ist die Attacke der gesunden Tomate». So begann die Universität von Purdue auf ihrer Internetseite über die neueste Errungenschaft zu berichten, die ihre WissenschaftlerInnen erzielt hatten. Was sie getan hatten, um die Tomate gesund zu machen, war folgendes: Sie fügten ein Gen ins Erbgut der Tomate ein, das aus der Hefe stammt und für die S-Adenosylmethionin-Decarboxylase kodiert (Mehta et al. 2002). Diese Decarboxylase sollte dafür sorgen, dass die transgene Tomate während der Reife mehr Polyamine bildet und dadurch länger am Stock reifen kann. Zur freudigen Überraschung der Forschenden verlängerte das fremde Gen aber nicht nur die Haltbarkeit der Tomate, es machte auch, dass die Tomate dreimal mehr Lycopen bildete als sonst. Lycopen ist ein Karotinoid und verantwortlich für die rote Farbe der Tomate. Doch es war nicht diese Eigenschaft, welche den überraschenden Nebeneffekt des gentechnischen Eingriffs interessant machte. Dafür war eine andere Eigenschaft verantwortlich: Lycopen ist auch ein besonders aktives Antioxidant und kann mehr als zehnmal soviel freie Radikale abwehren als Vitamin E, das lange als beste Waffe hierfür galt. Dem Lycopen werden deshalb verschiedene, die Gesundheit fördernde Wirkungen zugeschrieben – unter anderem die Prävention vor Herz-Kreislaufkrankungen und Prostata-Krebs sowie der Schutz vor UV-Strahlung. Lycopen kommt nicht nur in Tomaten, sondern auch in Guavas, Papayas, Grapefruits und Wassermelonen vor. Eine besonders reiche Quelle für Lycopen sind zudem die Früchte der Ölweide.

Seit mehrere Untersuchungen eine präventive Wirkung von Lycopen zeigen konnten, ist das Interesse an dieser Substanz stark gestiegen. Die Forschenden von der Universität von Purdue sind denn auch nicht die einzigen, die an Lycopen-Tomaten arbeiten. Auch WissenschaftlerInnen von der Universität London und von Syngenta zum Beispiel stellten eine Tomate her, die mehr Lycopen produziert (Fraser et al. 2002). Sie verwendeten dazu ein Phytoensynthasegen des Bakteriums *Erwinia uredovora*.

2002 haben US-AmerikanerInnen die Lycopen-Tomate zum Gentechprodukt des Jahres gewählt. Die Umfrage dazu hatte das Council for Biotechnology Information lanciert – eine Organisation, die unter anderem von BASF, Monsanto, Syngenta und DuPont gesponsert wird.

Die Herstellung von Tomaten mit erhöhtem Lycopengehalt steckt noch in den Anfängen. Die Tomate der Universität von Purdue ist zwar schon im Freiland getestet worden, doch bis solche Tomaten reif für die Zulassung sind, dürften noch einige Jahre vergehen. Ob sie dann auch tatsächlich in den Regalen stehen werden, ist fraglich, wie aus einem Tagungsbericht der DECHEMA hervorgeht (DECHEMA 2003): «Die veränderten Tomaten hätten dann jedoch die Wirkung eines Arzneimittels, was allein aus Haftungsgründen nicht marktfähig wäre. Im Gegensatz dazu

könnten Tomaten mit angereichertem Lycopengehalt aus der Laborzucht für die Extraktion des Lycopens verwendet werden. Derart hergestelltes Lycopin wäre wiederum marktfähig».

Fettarme Pommes

In Kartoffelknollen ist die Stärke ungleich verteilt. Bei der Zubereitung von Chips oder Pommes Frites führt die ungleichmässige Verteilung dazu, dass Bereiche mit geringerem Stärkegehalt länger frittiert werden müssen und daher mehr Fett aufnehmen (Transgen 2003). Monsanto hat nun eine transgene Kartoffel entwickelt, die bis zu 60 Prozent mehr Stärke enthält als gewöhnlich. Wird sie frittiert, nimmt sie weniger Fett auf als ihre unveränderten Artgenossen (PEW 2001). Monsanto hat die transgene Kartoffel in den USA im Feld getestet. Ob das Produkt auf dem Markt eine Chance hätte, ist fraglich, da die grossen Fast-Food-Ketten in den USA keine transgenen Kartoffeln verarbeiten (Transgen 2003).

Isoflavon-Soja

Isoflavone sind natürliche, sekundäre Pflanzenstoffe, die der Familie der Flavonoide angehören. Vorkommen tun sie hauptsächlich in Hülsenfrüchten wie Soja, Linsen und Rotklee. Von Interesse sind sie, weil sie als Phytohormone wirken und eine ganze Reihe von positiven Effekten haben sollen: Isoflavone sollen die Wechseljahrsbeschwerden verringern, stabile Knochen fördern, das Risiko für Brustkrebs reduzieren, das Cholesterol im Blut senken und Herzkrankheiten vorbeugen. Verschiedene Isoflavonpräparate sind heute bereits auf dem Markt.

Die Samen von Sojabohnen und daraus gewonnene Proteinprodukte sind die wichtigste Isoflavonquelle für die menschliche Ernährung. Der Isoflavongehalt der Sojabohnen variiert jedoch je nach Sorte und Anbaubedingungen. Zudem gehen während der Verarbeitung der Sojabohnen Isoflavone verloren. Der Verlust kann bis zu 50 Prozent betragen. Diese Probleme könnten gelöst werden, wenn der Isoflavongehalt erhöht und seine Variabilität in den verschiedenen Sorten reduziert würde. Forschende von DuPont haben deshalb das Gen, das für die Synthese der Isoflavone verantwortlich ist, isoliert und kloniert (Jung et al. 2000). In Zukunft wollen sie es dazu nutzen, den Isoflavongehalt von Sojabohnen zu erhöhen. Zudem wollen sie das Gen in weitere Nutzpflanzenarten einfügen, um den Lebensmittelherstellern eine Alternative zu Soja zur Verfügung zu stellen. Kim Nill, Marketingdirektor der US-amerikanischen Sojabohnen-Assoziation schätzt, dass das erste transgene Isoflavon-Soja im Jahr 2005 auf den Markt kommen wird (Nill 2000). Bereits heute auf dem Markt erhältlich sind konventionell gezüchtete Sojabohnen, deren Isoflavongehalt erhöht ist (N.N. 2003).

Gesündere Fette

Rund 40 Pflanzen bilden Öle und Fette, die für die menschliche Nahrung geeignet sind. Genutzt werden jedoch nur wenige. So stammen etwa 60 Prozent der weltweiten Produktion pflanzlicher Öle aus Soja, Raps, Sonnenblume und Erdnuss. Rund 25 Prozent der Pflanzenölproduktion gehen auf Kokosnuss und Palmöl zurück, 10 Prozent werden aus Mais und Baumwolle gewonnen. Nischenplätze nehmen Olive, Leinsamen und Sesam ein (Coughlan & Kinney 2002; Thelen & Ohlrogge 2002). Über 80 Prozent der weltweit gehandelten Samenöle werden für Nahrungsmittel verwendet: mehrheitlich als Kochöle, als Margarine oder für verarbeitete Produkte (Dibb & Mayer

2000). Der Marktwert der weltweit produzierten Pflanzenöle liegt bei 40 bis 45 Milliarden US-Dollar (Murphy 2003b, Thelen & Ohlrogge 2002).

Jede Pflanze bildet ihre arteilgenen Öle bzw. Fette, die vor allem durch den unterschiedlichen Gehalt an bestimmten gesättigten und ungesättigten Fettsäuren charakterisiert sind. Die hauptsächlich angebauten Ölpflanzen bilden im Wesentlichen folgende Fettsäuren: Laurin-, Myristin-, Palmitin-, Stearin-, Öl-, Linol- und Linolensäure. Je nach Öl bzw. Fett ist der jeweilige Gehalt dieser einzelnen Fettsäurearten sehr unterschiedlich.

Einige der von Pflanzen gebildeten Öle bzw. Fette gelten als ungesund für die menschliche Ernährung, anderen wiederum wird eine gesundheitsfördernde Eigenschaft zugesprochen. Das Ziel der Gentechnik ist es, das Fettsäurenprofil der Pflanzen so zu ändern, dass hauptsächlich gesunde Fette in unsere Nahrung gelangen. Zudem werden die Fettsäurenprofile auch den Wünschen der Lebensmittelverarbeiter angepasst.

Zwei transgene Pflanzen mit verändertem Fettsäurenprofil sind bereits für den Markt zugelassen – ein transgener Raps von Monsanto und eine transgene Sojabohne von Pioneer/DuPont. Der transgene Raps ist so verändert worden, dass er Laurinsäure bildet. Diese Fettsäure wird normalerweise aus Kokosnuss oder Palmöl gewonnen. Monsanto beabsichtigte, den transgenen Raps der Lebensmittelindustrie anzubieten für die Herstellung von Backfetten, Konfekten und Margarinen. Obwohl der transgene Raps nach der Zulassung im Jahr 1995 in den USA angebaut wurde, wird er heute nicht mehr ausgesät. Dies könnte sich ändern, falls das Laurin-reiche Rapsöl jemals eine günstigere Alternative zum importierten tropischen Öl wird und damit das Interesse der Lebensmittelindustrie wecken würde (Dibb & Mayer 2000). Wie der Raps von Monsanto hat auch die transgene Sojabohne von Pioneer/DuPont bisher den kommerziellen Durchbruch nicht geschafft. Die Sojabohne ist so verändert worden, dass sie mehr Ölsäure als üblich bildet. Ölsäure ist ein einfach-ungesättigtes Fett, das auch in Oliven und Raps in grösseren Mengen vorkommt. Der Vorteil der transgenen Sojabohne gegenüber ihren unveränderten Artgenossen ist folgender: Ihr Öl ist hitzestabiler, benötigt somit in der Verarbeitung zum Bratöl kein Hydrogenierungsschritt und reduziert deshalb die Herstellungskosten (Dibb & Mayer 2000). Auch wenn Ölsäure positiv auf die menschliche Gesundheit wirken soll, schätzt DuPont den gesamten Einfluss auf unsere Ernährung als bescheiden ein, falls die transgene Sojabohne weit verbreitet Anwendung fände (Dibb & Mayer 2000). Bisher wird die Ölsäuren-reiche Sojabohne jedoch nur auf geringen Flächen angebaut. Schuld daran sind die grossen Fast-Food-Ketten in den USA. Sie haben nämlich entschieden, keine Produkte aus transgenen Pflanzen zu verwenden.

Agrochemiekonzerne haben beträchtliche Mittel in die Entwicklung von transgenen Pflanzen mit verändertem Fettsäurenprofil gesteckt. Das ökonomische Potential sowie die Ansicht, dass die Qualität leicht veränderbar ist, waren die treibenden Kräfte hinter den Investitionen. In den letzten Jahren ist jedoch klar geworden, wie schwierig die Veränderung der Fettsäurenprofile sein kann (Murphy 2003a). So müssen Forschende zum Beispiel immer wieder beobachten, wie transgene Pflanzen eine neue Fettsäure zwar wie erwünscht produzieren, dann aber auch gleich wieder abbauen, weil sie die neue Fettsäure als «fremd» betrachten (Murphy 2003a). Nichtsdestotrotz laufen zurzeit etliche Freisetzungsversuche mit transgenen Ölpflanzen. Zu welchem Zweck die Versuche durchgeführt werden, lässt sich anhand der Informationen aus den Freisetzungsdatenbanken nicht sagen – einerseits sind die verwendeten Gene oft als

Geschäftsgeheimnis deklariert, andererseits spezifizieren die Datenbanken den Zweck nur selten. Damit bleibt unklar, ob die freigesetzten Ölpflanzen als Lebensmittel oder als Industriepflanzen zum Einsatz kommen sollen. Einige Produkte, die in der Pipeline stecken, lassen sich dennoch aufzählen:

Pioneer/DuPont hat eine Sojabohne entwickelt, die weniger Linolensäure bildet als sonst und deren Öl somit stabiler ist und weniger schnell ranzig wird (Dibb & Mayer 2000). Linolensäure ist mehrfach ungesättigt und gehört zu den für den Menschen essentiellen Fettsäuren. Obwohl das Öl aus der transgenen Soja geringere Mengen einer essentiellen Fettsäure bildet, wird es als gesundheitsfördernd angepriesen. Der Grund ist folgender: Pflanzenöle, die viel Linolensäure enthalten, müssen hydrogeniert werden, wenn man sie zur Herstellung von Margarine, Back- oder Frittierfett einsetzen will. Durch diesen Härtingsprozess wird die Struktur der Linolensäure verändert und es bilden sich so genannte Trans-Fettsäuren. Diese Trans-Fettsäuren wiederum gelten als bedenklich, weil sie das Risiko für Herz-Kreislaufkrankungen erhöhen (Murphy 2003a). Ebenfalls um Trans-Fettsäuren geht es beim transgenen Raps, den Monsanto entwickelt hat. Der Raps ist dabei so verändert worden, dass sein Öl viel Stearinsäure enthält (PEW 2001). Öle mit viel Stearinsäure sind bei Raumtemperatur stabiler, sie brauchen bei der Verarbeitung weniger Hydrogenierungsschritte und weisen somit im Endprodukt weniger Trans-Fettsäuren auf (Coughland & Kinney 2002). Das Öl aus dem transgenen Raps soll dereinst eingesetzt werden für die Herstellung von Margarine, Brotaufstrichen, Konfekten und Backprodukten (Dibb & Mayer 2000). Raps ist nicht die einzige Pflanze, bei der man versucht, den Stearingehalt zu erhöhen. In der Entwicklung befinden sich auch Stearin-reiche Soja-, Rüben- und Baumwollsorten (Drexler et al. 2003, Liu et al. 2002).

Neben der Herstellung von Ölen mit weniger Trans-Fettsäuren werden zurzeit auch transgene Pflanzen entwickelt, die viel Omega-3-Fettsäuren enthalten (Murphy 2003a, Drexler et al. 2003). Omega-3-Fettsäuren sind langkettige, mehrfach ungesättigte Fettsäuren. Von Interesse sind sie, weil ihnen günstige Wirkungen auf das Herz-Kreislauf-System nachgesagt werden, wie beispielsweise die Verhinderung arteriosklerotischer Krankheiten. Die Hauptvertreter der Omega-3-Fettsäuren sind Eicosapentaen-, Docosahexaen- und Alpha-Linolensäure. Während Letztere in pflanzlichen Ölen vorkommt, sind die ersten Beiden vor allem in Fischen wie Hering, Makrele, Lachs und Sardinen zu finden. Da die Überfischung der Meere die Menge an gesunden Fischölen verringern und verteuern wird, wollen die Agrochemiekonzerne eine Alternative bieten und transgene Pflanzen herstellen, die reich an Omega-3-Fettsäuren sind (Murphy 2003a). BASF zum Beispiel kündigt auf seiner Webseite an, dank der grünen Gentechnik in Zukunft «eine bessere Versorgung mit den lebenswichtigen Omega-3-Fettsäuren zu ermöglichen». Bis es soweit ist, sind jedoch noch Hürden zu nehmen. Die Gene für die Herstellung von Eicosapentaen- und Docosahexaensäure sind zwar bekannt. Ein Problem ist aber, dass der Stoffwechsel der transgenen Pflanzen fremde Fettsäuren oft gleich wieder abbaut. BASF unterstützt deshalb ein Projekt, das auch von der EU gefördert wird und den Titel CONFAB trägt – *controlling novel fatty acid breakdown*. Die Entwicklung der gesunden Pflanzenöle steckt somit noch in den Anfängen. Murphy (2003a) geht davon aus, dass bis Ende des Jahrzehnts transgene Ölpflanzen hergestellt werden können, die Eicosapentaen- und Docosahexaensäure bilden.

Eine weitere Kategorie pflanzlicher Lipide, die für die Lebensmittelindustrie von Interesse ist, sind die Phytosterole. Sie scheinen den Blut-Cholesterinspiegel zu

senken, wodurch sie das Risiko für Herzkrankheiten senken. In verschiedenen Ländern sind Margarinen lanciert worden, denen Phytosterole zugesetzt werden. Gewonnen werden diese Phytosterole aus Pinien- oder Sonnenblumenöl. Da die Gewinnung teuer ist, will man nun mit transgenen Pflanzen eine billigere Quelle schaffen (Murphy 2003a). Die Herstellung von Phytosterol-reichen Pflanzen steckt weitgehend am Anfang der Entwicklung und wird zurzeit noch bei Tabak erprobt. Eine Ausnahme bildet jedoch eine Sojabohne von Monsanto. Sie ist so verändert worden, dass sie mehr Stanol (gesättigtes Sterol) bildet. Monsanto hat diese transgene Sojabohne im Jahr 2000 bereits im Freiland getestet. Ob sie zur Marktreife gebracht werden soll, ist unklar. Unseres Wissens noch nicht freigesetzt worden sind bisher transgene Pflanzen, die Myristin- und Caprinsäure anreichern. Im Labor zumindest wird eifrig an diesen Fettsäuren geforscht (Drexler et al. 2003, Coughlan & Kinney 2002). Eingesetzt werden sollen sie für diätetische oder kosmetische Zwecke.

Allergenfreie Pflanzen

Da die meisten Lebensmittelallergien durch Proteine verursacht werden, sind gentechnische Strategien denkbar, das allergene Potential von Pflanzen zu reduzieren – entweder durch die Veränderung oder durch die Stilllegung der Gene, die für die allergenen Proteine kodieren. Verschiedene Ansätze sind bisher schon verfolgt worden. Vor allem Reis, Soja und Weizen stehen im Visier der GentechnologInnen (PEW 2001). Bei Soja zum Beispiel haben Forschende der US-Amerikanischen Landwirtschaftsbehörde zusammen mit DuPont ein Gen stillgelegt, das für mehr als die Hälfte aller Sojabohnenallergien verantwortlich sein soll (Suszkiw 2002). DuPont soll die hypoallergene Soja in Hawaii im Freiland testen. Noch in der Forschungsphase steckt die Entwicklung von transgenem Weizen, der kein Gluten mehr bildet. Gluten kann Zöliakie auslösen, eine allergieähnliche Erkrankung des Dünndarms. Etwa 0,1 Prozent der deutschen Bevölkerung sind von dieser speziellen Nahrungsmittelunverträglichkeit betroffen (Transgen 2003). Um diesen Menschen den Verzehr von Weizenprodukten zu ermöglichen, hat das deutsche Bundesforschungsministerium ein Forschungsprojekt lanciert, in dem glutenfreier transgener Weizen entwickelt werden soll.

Die Entwicklung von hypoallergenen Nahrungsmittelpflanzen ist mit mehreren Schwierigkeiten konfrontiert. So gelingt die Unterdrückung des entsprechenden Gens nicht immer vollständig. Da die Aktivierung von Genen entwicklungs- und umweltbedingt erfolgen kann, lässt sich eine vollständige Unterdrückung nicht garantieren. Häufig besitzen Pflanzen nicht nur ein allergenes Protein, sondern gleich mehrere. Wollte man eine gänzlich allergenfreie Pflanze herstellen, müssten alle entsprechenden Gene stillgelegt werden können. Auf Grund der Schwierigkeiten ist in den nächsten Jahren kaum mit der Lancierung von hypoallergenen transgenen Pflanzen zu rechnen. Reiner Emrich, Vizepräsident von BASF Plant Science, schätzt, dass solche Produkte erst nach 2010 auf den Markt kommen dürften (Emrich 2003).

Samenlose Früchte

Wenn im Pflanzenreich Früchte ohne Samen entstehen, dann spricht man von Parthenokarpie. Samenlosigkeit findet sich jedoch nur bei wenigen Kulturpflanzen – zum Beispiel bei Banane, Ananas, Feige oder bei manchen Gurkensorten. Da KonsumentInnen samenlose Früchte bevorzugen, wollen die GentechnikerInnen nun weitere Kulturpflanzen samenlos machen. Doch die Erfüllung der KonsumentInnenwünsche ist nicht der einzige Zweck. Samenlose Pflanzen weisen noch weitere ökonomisch

interessante Eigenschaften auf. Da es keine Befruchter mehr braucht, sollen die samenlosen Pflanzen auch unter wechselnden klimatischen Bedingungen stabile Erträge bringen. Zudem reduzieren sie die Produktionskosten im Gewächshaus, weil die teuren Ausgaben für die Befruchtung wegfallen. Und sie erhöhen den Profit der Verarbeitungsindustrie, welche nicht nur die Kosten für die Entfernung der Samen sparen kann, sondern auch ihre Prozesse effizienter nutzen kann, weil die Ernteperiode von samenlosen Früchten länger dauert.

Von gewissen nicht-parthenokarpen Pflanzen wie zum Beispiel der Tomate ist bekannt, dass sich dann samenlose Früchte gewinnen lassen, wenn die unbefruchteten Blüten mit dem Pflanzenhormon Auxin besprüht werden. Diese Eigenschaft machen sich die GentechnikerInnen zu Nutze. Dabei stehen ihnen zwei Gene zur Verfügung. Das eine ist das *rol*-Gen des Bakteriums *A. rhizogenes*. Das *rol*-Gen kann gewisse Effekte von Auxin nachahmen, die Funktionsweise ist allerdings unbekannt. Fügt man es zum Beispiel in Tomaten ein und sorgt dort dafür, dass es nur in Fruchtknoten und jungen Früchten aktiv ist, so bilden sich samenlose transgene Tomaten (Carmi et al. 2003). Das zweite Gen, mit dem transgene samenlose Früchte entstehen sollen, ist das *iaaM*-Gen. WissenschaftlerInnen vom Research Institute for Vegetable Crops in Monsampolo del Tronto haben das *iaaM*-Gen so in das Erbgut von Auberginen eingefügt, dass diese das Fremdgen nur in der Plazenta und den Fruchtknoten aktivieren (Acciarri et al. 2002). Die transgene Aubergine bildet in der Folge samenlose Früchte.

Die Herstellung von transgenen samenlosen Früchten wird zurzeit an zahlreichen Pflanzenarten erprobt (siehe Tabelle 15). Freisetzungsversuche laufen für: Aubergine, Erdbeere, Himbeere, Melone, Kiwi, Tomate, Wassermelone und Weintraube (USDA 2003a, JRC 2003).

6.2.2 Futtermittel

Wie bei den Lebensmitteln versuchen die Agrochemiekonzerne auch die Qualität von Futtermitteln mit Hilfe der Gentechnik zu optimieren. Tabelle 16 zeigt Beispiele von entsprechenden transgenen Futtermittelpflanzen, die zurzeit in Freisetzungsvorversuchen getestet werden. In den nachfolgenden Abschnitten werden einige der qualitativ veränderten Futtermittelpflanzen näher beschrieben.

Pflanze	Gentechnische Veränderung (Quelle des Gens)	Zweck der Veränderung	Hersteller	Land und Jahr
Gerste	Phytasegen (ohne Angaben)	reduzierter Phytatgehalt	John Innes Centre	GB 2001
Gerste	CBI (CBI) PAT*	verbesserte Verdaubarkeit	Ventria Bioscience	USA 2001
Gerste	Hitzestabile Glucanase (B. amyloliquefaciens) PAT*	verbesserte Verdaubarkeit	Washington State University	USA 2001
Luzerne	Resveratrolsynthase (Erdnuss) NptII*	Produktion von Resveratrol	Iowa State University	USA 1998
Luzerne	Caffeoyl-O-Methyltransferase (Luzerne)	reduzierte Ligningehalt	Forage Genetics International	USA 2001
Mais	CBI (CBI) CBI*	veränderte Samen-zusammensetzung	Syngenta	USA 2001
Mais	CBI (CBI) CBI*	erhöhter Phosphorgehalt	Pioneer (DuPont)	USA 1998
Mais	CBI (CBI) NptII*	reduzierter Phytatgehalt	Monsanto	USA 1999
Mais	CBI (Mittagsblume) PAT*	reduzierter Phytatgehalt	Dow	USA 2001
Mais	CBI (CBI) PAT*	reduzierte Mykotoxine	Pioneer (DuPont)	USA 1998
Mais	ohne Angaben	veränderter Ligningehalt	Biogemma	Frankreich 2002
Mais	ohne Angaben	erhöhter Aminosäuregehalt	Biogemma	Frankreich 2000
Mais	CBI (CBI) NptII*	erhöhter Lysingehalt	Monsanto	USA 1999
Mais	CBI (CBI)	erhöhter Tryptophangehalt	Monsanto	USA 1999
Mais	CBI (Mais)	verbesserte Futtermittelqualität	Pioneer (DuPont)	USA 2001
Soja	CBI (CBI)	veränderte Samen-zusammensetzung	Monsanto	USA 1999
Weizen	CBI (CBI) PAT*	verbesserte Verdaubarkeit	Ventria Bioscience	USA 2001

Tabelle 16: Beispiele von transgenen Futtermittelpflanzen mit veränderter Produktqualität, die zurzeit in den USA oder in der EU im Freiland getestet werden. Die mit einem Stern gekennzeichneten Gene sind Markergene. CBI steht für *confidential business information*. (Angaben nach (USDA 2003a, RKI 2003, JRC 2003).

PhytaSeed trifft EnviroPig

Phytate sind bei Pflanzen weit verbreitet und dienen als Speicher von Phosphaten. Zudem binden sie auch Mineralstoffe wie Kalzium, Eisen und Zink. Besonders reich an Phytaten sind die Samen von Getreide, Ölsaaten und Hülsenfrüchten. Obwohl diese typischen Futtermittel somit ausreichend Phosphat besitzen, werden sie heute dann mit Phosphor angereichert, wenn sie in den Trögen von Hühnern und Schweinen landen. Der Grund: Hühnern und Schweinen fehlt das Enzym Phytase, das den Phosphor aus den Phytaten lösen könnte. Fressen Hühner und Schweine Samen, die reich an Phytaten sind, scheiden sie Phosphor ungenutzt wieder aus. Die mit dem Kot ausgeschiedenen Mengen können dabei so gross sein, dass sie zum Umweltproblem werden – zumindest in Regionen mit hohem Tierbesatz. Denn der überschüssige

Phosphor kann den Boden belasten und die Gewässer eutrophieren. Heute versucht man das Problem zu lösen, indem man dem Mischfutter gentechnisch hergestellte Phytase beigibt. Nehmen Hühner und Schweine dieses Enzym auf, so sorgt es im Magen für die Hydrolyse und damit auch für die Verfügbarkeit des Phosphats. Natuphos von BASF ist eines der Produkte, das heute auf dem Markt ist. Gewonnen wird es aus einem gentechnisch veränderten Pilz: *Aspergillus niger*, der ein zusätzliches Phytasegen besitzt. Das heute weltweit vermarktete Natuphos dürfte nicht das einzige gentechnische Produkt bleiben. Denn verschiedene Konzerne arbeiten zurzeit daran, den Phytasegehalt direkt in den Pflanzen zu erhöhen. Ein Beispiel ist der PhytaSeed-Raps, der das Phytasegen von *Aspergillus niger* exprimiert (Zhang et al. 2002). Wird er einem Mischfutter aus Mais und Soja zugegeben, so können die Tiere Phosphor besser nutzen. Andere Versuche, den Phytatgehalt in den Pflanzen zu reduzieren, laufen bei Mais, Weizen, Soja und Gerste (PEW 2001, (USDA 2003A, JRC 2003). So testeten Monsanto und Dow zwischen 1999 und 2002 je einen entsprechenden transgenen Mais im Freiland. Und in Grossbritannien untersuchte zum Beispiel das John Innes Centre eine transgene Gerste, die ein Phytasegen exprimiert (siehe Tabelle 16). Syngenta hat angekündigt, bis 2005 eine transgene Maissorte auf den Markt zu bringen, die wenig Phytat bildet.

Nicht nur rekombinante Enzyme und transgene Pflanzen sollen das vom Schweinekot verursachte Umweltproblem lösen. Forschende an der Universität Guelph wählten noch einen dritten Weg, um den Phosphoreintrag gentechnisch zu reduzieren. Sie transferierten nämlich ein bakterielles Phytasegen direkt ins Erbgut von Schweinen, die seither den Phosphor selber aus dem Phytat lösen konnten (Golovan et al. 2001). Ob diese EnviroPigs genannten Schweine auf dem Markt eine Chance hätten, ist mehr als fraglich.

Dass es auch konventionelle Ansätze gibt, den Phosphorausstoss der Schweine- und Hühnerställe zu vermindern, zeigen Forschende an der Universität von Saskatchewan. Dort arbeiten sie nämlich daran, auf konventionellem Wege eine Gerstesorte zu züchten, die wenig Phytat besitzt. Die Gerstesorte soll 2006 auf den Markt kommen (Murphy 2003). Bereits auf dem Markt erhältlich sind konventionell gezüchtete Maissorten mit reduziertem Phytatgehalt (Thomas & Bradford 2001).

Weniger Mykotoxine

Als Mykotoxine werden die Substanzen bezeichnet, mit denen Pilze ihre keimenden Sporen vor Mikroorganismen schützen. Mykotoxine wirken jedoch nicht nur auf die Kleinstlebewesen, sie können auch für Tiere und den Menschen giftig sein. Je nach Art und Menge des Mykotoxins rufen die giftigen Substanzen Übelkeit oder Erbrechen hervor, wirken krebserregend oder stören den Hormonhaushalt. Mykotoxine sind vor allem in der Getreideproduktion ein Problem. Denn dort führen Fusarien, Mykotoxin bildende Pilze, immer wieder zu Kontaminationen der Ernte. Heute existieren verschiedene Ansätze, den Befall mit Fusarien zu bekämpfen oder zu reduzieren. So sind Sorten gezüchtet worden, die weniger anfällig auf Fusarien sind. Auch durch eine geeignete und flexible Fruchtfolge lässt sich der Pilzbefall eindämmen. Zudem sind biologische Kontrollen vorhanden: werden gewisse harmlose Mikroben ausgebracht, so hindern diese die Fusarien daran, das Getreide zu befallen (Thomas & Bradford 2001). In Zukunft soll auch ein gentechnischer Ansatz zur Verfügung stehen. Denn Pioneer (DuPont) hat angekündigt, in den nächsten Jahren eine transgene Maissorte zu lancieren, die weniger anfällig auf Mykotoxine sein soll.

Gerste für die Schweine

Eigentlich kann Gerste nicht an Schweine verfüttert werden. Denn Gerste bildet in den Zellwänden das Polysaccharid Beta-Glukan und den Schweinen fehlt ein Enzym, um Beta-Glukan abzubauen. Forschende von der Washington State University wollen nun dafür sorgen, dass auch die Schweine in den Genuss von Gerste kommen. Sie haben dazu ein bakterielles Gen in Gerste eingeführt, das für eine hitzestabile Glucanase kodiert. Der Test gelang: Schweine, die den Malz der transgenen Gerste frassen, wuchsen genau so gut wie Schweine, die mit Mais und Soja gefüttert wurden (PEW 2001). Da die transgene Glucanase-Gerste bereits seit 1997 im Freiland untersucht wird (USDA 2003a), könnte sie demnächst auf den Markt gelangen.

Luzerne mit Resveratrol

Resveratrol gehört zu den Flavonoiden und wird der Klasse der Phytoalexine zugeordnet. Pflanzen bilden die Substanz, weil sie antibiotisch wirkt und somit der Abwehr von Krankheiten dient. In Luzerne kommt Resveratrol normalerweise nicht vor. Geändert haben dies Forschende von der Noble Foundation. Sie haben aus der Erdnuss das Gen für die Resveratrolsynthese isoliert und in das Erbgut der Luzerne eingebracht (Hipskind & Paiva 2000). Das Ziel des Gentransfers: die Luzerne sollte Resveratrol produzieren und dadurch Pathogene besser abwehren können.

Resveratrol wirkt nicht nur antibiotisch, sondern auch antioxidativ. Anders ausgedrückt: Die transgene Luzerne bildet mit Resveratrol auch eine Substanz, von der angenommen wird, dass sie Tiere und Menschen vor antioxidativer Belastung schützt, den Fettstoffwechsel unterstützt und das Immunsystem stärkt.

Die Resveratrol-Luzerne wird seit 1998 im Feld getestet (USDA 2003a). Falls sie die Marktreife erreicht, könnte sie als Gesundheit förderndes Futtermittel direkt an Tiere verfüttert werden. Eine andere Anwendung könnte sein, das Resveratrol aus der transgenen Luzerne zu isolieren und dann als Lebensmittelzusatzstoff zu verwenden.

Veränderte Verdaubarkeit

Die Verdaubarkeit von Futtermittelpflanzen kann verbessert werden, indem man den Ligningehalt reduziert. Lignine sind polyphenolische Substanzen, kommen in der pflanzlichen Zellwand vor und können von Tieren nicht verdaut werden. Ein gentechnischer Ansatz, den Ligningehalt zu verringern, ist, die Expression der Caffeyl-O-Methyltransferase niedrig zu halten. Erprobt wird er zurzeit von Forschenden der Firma Forage Genetics International. Sie testen seit 2001 eine entsprechende transgene Luzerne im Freiland, die weniger Lignin besitzen soll (USDA 2003a). Wie die Forschenden von Forage Genetics International versuchen auch ihre Kollegen von Ventria Bioscience transgene Pflanzen mit verbesserter Verdaubarkeit herzustellen. Sie arbeiten mit Weizen und Gerste. Welchen Ansatz sie verwenden, bleibt unklar. Klar ist, dass sie ihre transgenen Sorten seit 2001 im Freiland testen und die gentechnische Veränderung zum Geschäftsgeheimnis erklärt haben (USDA 2003a). Auch bei Mais wird die Verdaubarkeit gefördert. Biogemma untersucht in Frankreich eine transgene Maissorte im Freiland, die resistent gegen Glyphosat ist und einen veränderten Ligningehalt aufweist (JRC 2003).

Proteinqualität

Samen sind die wichtigste Proteinquelle für Nutztiere. Der Proteingehalt der Samen verschiedener Pflanzen variiert dabei stark; bei Getreide beträgt er 10 bis 12 Prozent, bei Hülsenfrüchten und Ölsamen 20 bis 25 Prozent und bei Soja bis zu 50 Prozent

(Shewry 2002). Der Nährstoffgehalt der Samen wiederum ist abhängig davon, welche Aminosäuren die Proteine enthalten (Jacobs et al. 2002). Oft fehlen den Pflanzenproteinen eine oder zwei der zehn Aminosäuren, die für die menschliche und tierische Ernährung essentiell sind. Weizen, Mais und Gerste zum Beispiel enthalten nur wenig Lysin und Threonin, Hülsenfrüchte besitzen wenig Cystein, Methionin und Tryptophan (Dewaele et al. 2002, Amaya et al. 2002).

Tiere müssen Lysin, Methionin und Tryptophan aufnehmen, da sie diese Aminosäuren nicht selber bilden können. In der Tierproduktion ist der Bedarf an diesen Aminosäuren entsprechend hoch. Gestillt wird er heute, indem den Futtermitteln chemisch oder biotechnisch hergestellte Aminosäuren zugesetzt werden. Dieses Vorgehen ist jedoch sehr kostenintensiv. Deshalb wird nun mit Hilfe gentechnischer Methoden versucht, die Herstellung der essentiellen Aminosäuren direkt in die Futtermittelpflanzen zu verlegen. Vorgegangen wird dabei wie folgt:

Pflanzenzellen stellen die Synthese von Lysin, Methionin und Tryptophan ab, wenn die Menge dieser Aminosäuren eine gewisse Höhe erreicht hat. Verantwortlich für den Synthesestopp ist eine Feedback-Regulation: Erreichen die Aminosäuren eine gewisse Konzentration, so stoppen sie die Enzyme, die für ihre Bildung verantwortlich sind. Gewisse Bakterien und Pflanzen besitzen nun Enzyme, bei denen die Feedback-Regulation nicht wirkt. Sie produzieren auch dann weiter Aminosäuren, wenn deren Konzentration die kritische Schwelle erreicht hat (Jacobs et al. 2002). Werden die Gene, welche für diese Enzyme kodieren, in Weizen, Mais, Raps oder Soja transferiert, stellen diese die entsprechenden Aminosäuren im Übermass her. Ein Problem bei diesem Vorgehen ist, dass die Aminosäuren ungebunden in der Pflanzenzelle vorliegen und deshalb auch wieder abgebaut werden (Jacobs et al. 2002). Zwei Strategien werden verfolgt, um das Problem zu lösen. Die eine besteht darin, die Menge derjenigen Enzyme zu verringern, welche für den Abbau der Aminosäuren verantwortlich sind. Die zweite Strategie ist, Gene für solche Proteine ins Erbgut einzufügen, die reich an der entsprechenden Aminosäure sind, diese deshalb binden und somit vor dem Abbau schützen (Jacobs et al. 2002, Dewaele et al. 2002, Shewry 2002).

Mit Hilfe der Gentechnik soll nicht nur das Aminosäurenprofil verändert werden, auch die Proteinmenge will man gentechnisch erhöhen. So führten WissenschaftlerInnen zum Beispiel ein Albumin in die Kartoffel ein, wodurch deren Proteingehalt um rund 40 Prozent anstieg (PEW 2001).

Sowohl in den USA wie auch in der EU laufen verschiedene Freisetzungsversuche mit transgenen Pflanzen, deren Proteinstoffwechsel verändert wurde – sei es, um das Aminosäurenprofil zu ändern, oder sei es, um die Proteinmenge zu erhöhen. Durchgeführt werden die Versuche vor allem von den grossen Konzernen Monsanto, Syngenta und DuPont. Da sie die verwendeten Fremdgene fast immer als Geschäftsgeheimnis betrachten, ist aus den Datenbanken nicht ersichtlich, welche Strategien die Konzerne genau verfolgen. In der Tabelle 16 sind einige der Versuche aufgelistet.

Bis 2007 dürften für folgende transgene Pflanzen Zulassungsanträge gestellt werden: Pioneer hat angekündigt, Mais- und Sojasorten auf den Markt zu bringen, die einen erhöhten Lysingehalt besitzen. Monsanto wird nach eigenen Angaben ebenfalls eine Sojasorte mit erhöhtem Lysingehalt kommerzialisieren. Zudem testet Monsanto in den USA seit 1999 bis heute sowohl eine Maissorte mit erhöhtem Tryptophangehalt als auch eine Sojasorte mit veränderter Samenzusammensetzung (USDA 2003a). In

Indien will die Jawaharlal Nehru Universität in Neu Delhi eine transgene Kartoffel kommerzialisieren, deren Proteingehalt erhöht ist.

Essbare Impfstoffe

In ferner Zukunft dürften transgene Pflanzen auf den Markt kommen, die als essbare Impfstoffe im Futtermittel an die Tiere verfüttert werden. Bisher sind zum Beispiel für folgende tierische Krankheiten transgene Pflanzen hergestellt worden (Thomas & Bradford 2001): Maul- und Klauenseuche, Schweinepest, Geflügel-Influenza, Schweine-Diarrhö und Tollwut. Einige der essbaren Impfstoffe werden zurzeit schon in veterinärmedizinischen Versuchen getestet. Bis sie jedoch in den Futtertrögen landen, dürften noch einige Jahre vergehen (Thomas & Bradford 2001).

6.2.3 Industrie

Die Vorräte an fossilen Rohstoffen schwinden, die massenhafte Nutzung von Kohle und Erdöl heizt unser Klima auf und der Müllberg wächst, weil die aus Erdöl hergestellten Kunststoffe nicht abbaubar sind – drei Gründe, nachwachsende Rohstoffe zu fördern. Drei Gründe auch, die von der Gentechindustrie angeführt werden, wenn es um die Herstellung von transgenen Pflanzen geht. Mit ihnen will die Industrie optimierte Stärke, massgeschneiderte Öle und abbaubaren Plastik produzieren, um so zu einer umweltfreundlichen Produktion von Rohstoffen beizutragen. Auch Enzyme, Wachse und Spezialstoffe sollen aus transgenen Pflanzen gewonnen werden und die Nützlichkeit der grünen Gentechnik unterstreichen. So nützlich die Anwendungen scheinen mögen und so hoch sie von den Proponenten angepriesen werden, so gross ist schliesslich die Überraschung, dass das Engagement im Bereich der nachwachsenden Rohstoffe eher bescheiden ist. Beispiel EU: 1996 betrug der Anteil der transgenen Pflanzen mit veränderten Ölen und Stärke noch 16 Prozent, dann sank er innerhalb von fünf Jahren auf 6.5 Prozent (Lheureux et al. 2003). Auch die Anzahl der Pflanzen, die für die Herstellung von Enzymen und anderen industriellen Zwecken freigesetzt werden, sank in diesem Zeitraum – von 6.3 Prozent im Jahr 2007 auf 1.1 Prozent im Jahr 2001 (Lheureux et al. 2003). In den USA ist das Engagement ebenfalls klein. Hier wurden bisher nur rund 9 Prozent aller Freisetzungsversuche mit transgenen Pflanzen durchgeführt, die industriell für die Gewinnung von Ölen, Stärken, Polymeren oder Enzymen genutzt werden könnten (Arundel 2002b). Welche Strategien verfolgt die grüne Gentechnik im Bereich der nachwachsenden Rohstoffe und welche Industriepflanzen sind in der Pipeline? Diesen beiden Fragen widmen sich die folgenden Abschnitte.

Stärke

Zwanzig Millionen Tonnen Stärke werden jährlich weltweit aus Pflanzen extrahiert – hauptsächlich aus Weizen, Mais und Kartoffeln (Heyer 2000). Der Marktwert liegt bei rund 5 Milliarden US-Dollar. In der EU und den USA werden 25 bis 30 Prozent der Stärke für industrielle Zwecke verwendet (Murphy 2003b).

Das Einsatzgebiet der Stärke ist breit. Als Glasur, Sossenbinder oder Dickungsmittel steckt sie in Lebensmitteln. Umgewandelt in Glucose oder Fruktose findet man sie in Brauereien. Sie hilft bei der Herstellung von hochwertigen Papieren, wird bei der Textilverarbeitung verwendet und kommt in Baustoffen, Arzneimitteln und Kosmetika zum Einsatz. Dem breiten Einsatzgebiet entsprechend ist das Interesse gross, transgene Pflanzen herzustellen, deren Stärke den Wünschen der Industrie entspricht.

Stärke besteht aus Amylose und Amylopektin. Für die menschliche Ernährung sind beide Bestandteile gleichwertig. Nicht so für die Industrie. Sie kann beide gemeinsam nicht effektiv nutzen. Für die industrielle Weiterverarbeitung müssen die Bestandteile deshalb von einander getrennt werden. Der Trennungsprozess ist jedoch aufwändig und belastet die Umwelt. Eines der Ziele ist deshalb, transgene Pflanzen herzustellen, die entweder nur Amylose oder nur Amylopektin herstellen. Weil Amylopektin vielfältiger eingesetzt werden kann, lag der Fokus der Forschung bisher bei der Herstellung von transgenen Pflanzen, deren Amyloseproduktion unterbunden ist. Vor allem in Europa sind bereits etliche solche Pflanzen im Freiland getestet worden (Heyer et al. 1999). Bereits 1998 beantragte die niederländische Firma Avebe bei der EU-Kommission, den Anbau einer Amylose-freien Kartoffel zuzulassen. Die Kommission lehnte den Antrag jedoch ab, weil die transgene Kartoffel ein Gen enthielt, das Resistenz gegen das Antibiotikum Amikazin verleihen kann. Erfolgreicher dürfte der Antrag der schwedischen Firma Amylogen verlaufen. Wie Avebe hat auch sie mit Hilfe der Antisense-Strategie eine Kartoffel hergestellt, deren Gene für die Amyloseproduktion stillgelegt sind. Der Antrag zum Anbau ist in der EU hängig. Der wissenschaftliche Ausschuss für Pflanzen der EU-Kommission hat dem Antrag bereits zugestimmt (SCP 2002). Spricht auch die EU-Kommission ein Ja, dürfte die Amylose-freie Kartoffel demnächst auf europäischen Feldern wachsen. Amylogen plant, nach der Zulassung jährlich 50'000 bis 70'000 Tonnen der transgenen Kartoffel zu produzieren. Die daraus gewonnene Stärke wird an die Papierindustrie geliefert werden, die Faserstoffe werden in die Futtertröge gehen.

Pflanzen ohne Amylosen sind nicht das einzige Ziel, das mit gentechnischen Methoden erreicht werden soll. Um Stärken nach Mass zu produzieren, wollen Konzerne und Universitäten auch den Phosphatgehalt sowie die Anzahl und die Art der Seitenketten des Amylopektins verändern (Schulman 2002). Und sie versuchen so in das Erbgut der Pflanzen einzugreifen, dass diese mehr Stärke als üblich produzieren. Vor allem in der EU sind in den letzten Jahren zahlreiche Freisetzungsversuche mit Pflanzen durchgeführt worden, deren Kohlenhydratstoffwechsel verändert wurde. Zu welchem Zweck die getesteten Pflanzen hergestellt wurden, lässt sich jedoch nicht für alle Fälle eruieren. Denn die Freisetzungsdatenbanken geben die entsprechenden Informationen nicht preis. Was sich dennoch schreiben lässt: In der EU ist die Anzahl der Freisetzungen mit transgenen Stärke-Pflanzen seit 1996 drastisch gesunken (Menrad et al. 2002). Wie auch immer, in den nächsten Jahren ist damit zu rechnen, dass Amylogen mit seiner Kartoffel nicht alleine bleiben wird und weitere Konzerne den Anbau für transgene Pflanzen mit verändertem Kohlenhydratstoffwechsel beantragen werden. Mögliche Beispiele: In den USA testet Biogemma zurzeit zwei Maissorten im Feld, deren Stärkeertrag erhöht bzw. deren Amylopektinstruktur verändert sein soll. BASF untersucht je eine Reis- und Maissorte mit erhöhtem Stärkegehalt (USDA 2003a). In der EU testet Amylogen Kartoffeln mit veränderter Amylopektinstruktur und Biogemma prüft einen Mais, dessen Amylosegehalt reduziert ist (JRC 2003).

Öle und Fette

Rund fünfzehn Prozent der jährlich hergestellten pflanzlichen Öle und Fette werden für industrielle Zwecke verwendet (Murphy 2002). Sie dienen als Rohstoffe für die Herstellung von Tensiden, Seifen, Zahnpasta und Shampoos, kommen in Kosmetika vor und finden Verwendung als Schmierstoffe und Treibstoff. Dem weiten Einsatzgebiet entsprechend gelten pflanzliche Öle und Fette als wichtige nachwachsende

Rohstoffe. Je nach Verwendungszweck müssen pflanzliche Öle ganz bestimmte Fettsäurenmuster aufweisen. Zudem müssen sie gegen mineralische Öle konkurrieren können, indem sie andere Eigenschaften aufweisen als diese oder indem sie zu Produkten verarbeitet werden können, die aus mineralischen Ölen nur schwer herzustellen sind. Ein weiteres Interesse der chemischen Industrie: die Pflanzen sollten das gewünschte Öl möglichst homogen bilden (Drexler et al. 2003).

Die weltweite Produktion von pflanzlichen Ölen basiert auf wenigen Kulturpflanzen. Soja, Raps, Ölpalme und Sonnenblume machen heute über 85 Prozent der Produktion aus (Murphy 2002). Bisher wurden Ölpflanzen züchterisch vor allem so bearbeitet, dass ihre Öle für Lebensmittel geeignet sind. Mit Hilfe der grünen Gentechnik soll sich dies jedoch ändern. Sie will die Fettsäurenprofile der bereits heute wichtigen Ölpflanzen so verändern, dass sie den Wünschen der Industrie entsprechen. Doch nicht nur das. Sie will gewissen Ölpflanzen auch grössere Absätze erschliessen. Ein Beispiel: Den in Deutschland angebauten Ölpflanzenarten, vor allem Raps und Leinen, fehlen bestimmte Fettsäuren, die für die Industrie von Interesse sind. Gedeckt wird der Bedarf an diesen Fetten dadurch, dass Kokos- und Palmöl importiert wird. Diese Importe könnten dann ersetzt werden, wenn die Fettsäurenmuster der in Deutschland angebauten Ölpflanzen entsprechend gentechnisch verändert werden. Ein weiteres Argument, das die GentechnikerInnen anfügen: In absehbarer Zeit werden die weltweiten Erdölreserven zu Neige gehen und die Kosten für mineralische Öle werden steigen. Auf lange Sicht bieten Ölpflanzen deshalb nach Ansicht von Thelen und Ohlrogge (2002) eine billige und zudem noch erneuerbare Quelle für chemische Rohstoffe.

Auch wenn GentechnikerInnen ökonomische und ökologische Argumente für die Herstellung transgener Ölpflanzen in den Vordergrund stellen, all die Anstrengungen, die sie in den letzten zehn Jahren in die Forschung und Entwicklung steckten, gehen hauptsächlich auf einen technologischen Schub zurück (Murphy 2002). Denn während der letzten Dekade ist es nicht nur gelungen, die Erbgüter aller wichtigen Ölpflanzen gentechnisch zu erschliessen, auch deren Fettsäurenmetabolismen sind molekularbiologisch ausgeleuchtet worden. Und es sind zahlreiche Gene isoliert und kloniert worden, die für die Bildung von pflanzlichen Fetten verantwortlich sind. Dies alles weckte die Hoffnung, schnell und einfach relativ billige Pflanzenöle als Rohstoffe herstellen zu können. Dieser Optimismus ist in letzter Zeit jedoch verblasst. Die Realität hat die Hoffnungen der GentechnikerInnen eingeholt: Obwohl die wichtigen Gene bekannt sind und schon zahlreiche Ölpflanzen gentechnisch verändert wurden, ist es bisher noch nicht gelungen, transgene Pflanzen herzustellen, die das gewünschte Öl in so grossen Mengen produzieren, dass es ökonomisch verwertet werden kann (Murphy 2003b, 2002).

Technische Hürden haben bisher den kommerziellen Erfolg von transgenen Ölpflanzen verzögert. Doch auch wenn das Design von Pflanzenölen gentechnisch gelingen sollte, bleibt der Erfolg ungewiss. Wachsen die transgenen Ölpflanzen nämlich auf den Feldern, so müssen sie akkurat von anderen Pflanzen getrennt werden. Eine effiziente Trennung kostet jedoch viel und ist schwierig umzusetzen (Murphy 2002). Die Kosten dürften sich nur für solche Designer-Öle lohnen, die einen lukrativen Nischenmarkt besitzen. Ein Beispiel hierfür könnte die Produktion von Fettsäuren sein, die in der Medizin Verwendung finden (Napier 2000).

Werden transgene Ölpflanzen jemals im grossen Stil zu einer ökologisch und ökonomisch sinnvollen Alternative zu Mineralölen? Die obigen Argumente sprechen

dagegen. Und auch die Zahlen tun es: Jährlich werden rund 3'400 Millionen Tonnen an Mineralölen verbraucht, wobei 200 Millionen Tonnen nicht direkt verbrannt, sondern für industrielle Zwecke eingesetzt werden (Drexler et al. 2003). Die heutige Produktion von Pflanzenölen deckt gerade mal zwei Prozent des Bedarfs an Mineralölen ab. Bei der industriellen Verwertung stehen den 200 Millionen Tonnen Mineralölen 13 Millionen Tonnen Pflanzenöle gegenüber (Murphy 2002). Ein vollständiger Ersatz aller Mineralöle durch Pflanzenöle ist unmöglich. Selbst wenn die gesamte weltweite landwirtschaftliche Produktion auf die Herstellung von Biodiesel umgestellt würde, reichte die Menge nicht aus (Murphy 2002). Jede Erhöhung des Anteils der pflanzlichen Öle würde zudem auf Kosten der Nahrungsmittelproduktion gehen. Heute werden rund 85 Prozent der Pflanzenöle zu Lebensmitteln verarbeitet. Die Konversion von essbaren in nicht-essbare, chemisch verwendete Öle dürfte sich auch aus ökologischer Sicht kaum lohnen. Würden zum Beispiel 30 Tonnen Mineralöle durch Pflanzenöle ersetzt, so liesse sich die CO₂-Emmission um ein Prozent reduzieren (Drexler et al. 2003).

In den nächsten Jahren wird der kommerzielle Erfolg von transgenen Ölpflanzen unsicher bleiben. Neben den beschriebenen Faktoren werden auch die Regierungen über den Erfolg mitentscheiden. In der Vergangenheit haben sie schon öfters in den Markt eingegriffen, indem sie aktiv den Anbau von Ölpflanzen förderten.

Aufgrund der Angaben in den Freisetzungsdatabanken und der wissenschaftlichen Literatur sind uns keine transgenen Ölpflanzen bekannt, die in den nächsten Jahren für die industrielle Nutzung auf den Markt kommen könnten. In der EU ist die Anzahl der Freisetzungsversuche mit transgenen Ölpflanzen für industrielle Zwecke seit 1996 stark gesunken (Menrad et al. 2002).

Die grüne Gentechnik ist nicht alleine mit ihren Bestrebungen, Öle aus nachwachsenden Rohstoffen zu gewinnen. Auch die konventionelle Züchtung tut es. Sie befasst sich dabei vermehrt mit Ölpflanzen, die bisher kaum angebaut wurden, aber bestimmte, für industrielle Zwecke verwendbare Öle in grossen Mengen produzieren. Diese Pflanzen könnten eine zuverlässige Alternative zu den transgenen Pflanzen werden (Murphy 2002).

Wachse

Johoba ist ein Strauch, der im Südwesten der USA sowie im Norden von Mexiko wächst. Sein Öl ist dort als «goldener Tropfen» bekannt und wird seit Generationen zur Haar- und Körperpflege genutzt. Johoba ist die einzig bekannte Pflanze, die in grossen Mengen Wachse bildet (PEW 2001). Das Öl des Johobastrauchs gilt deshalb als rar und kostbar. Eingesetzt wird es in Kosmetika, in Schmiermitteln oder als Tensid.

Bisher wurden Wachse vor allem aus Pottwalen gewonnen. Seit der Walfang jedoch eingeschränkt ist, wird nach alternativen Quellen gesucht. Die Ausweitung des Johoba-Anbaus ist eine der Alternativen. Eine weitere wollen zukünftig die GentechnikerInnen bieten. Sie haben drei Gene, die für die Wachsbildung verantwortlich sind, isoliert und in *Arabidopsis thaliana* geprüft. Da das resultierende Öl der transgenen Arabidopsis-Samen bis zu 70 Prozent aus Wachsen bestand, planen die WissenschaftlerInnen nun, die Gene in kommerziell anbaubare Pflanzen zu transferieren (Thelen & Ohlrogge 2002).

Vitamine

Vitamine sind ein interessantes Geschäft. Der Bedarf an den essentiellen Stoffen ist in den letzten Jahren stark gewachsen. Viele Lebensmittel werden mit Vitaminen angereichert und Vitaminpräparate stehen längst nicht mehr nur in den Apotheken, sondern auch in den Regalen der Lebensmittelläden. Bisher werden die Vitamine synthetisch oder biotechnisch hergestellt. Vor ein paar Jahren wurde sich die Industrie jedoch bewusst, dass die grüne Gentechnik ihre chemische und fermentative Produktion konkurrieren könnte. Diese Aussicht führte dazu, dass Konzerne entschieden, die Entwicklung von transgenen Pflanzen mit erhöhtem Vitamingehalt zu unterstützen (Herbers 2003). Beispiele sind die Produktion von Vitamin C und Vitamin E (Agius et al. 2003, Rocheford et al. 2002). Getestet werden die Ansätze zurzeit an Mais, Tabak, Kopfsalat sowie an der Modellpflanze *Arabidopsis thaliana*. Bereits auf dem Feld getestet wird transgener Tabak, der mehr Vitamin C produziert (USDA 2003a).

Ob die vitaminreichen Pflanzen dereinst direkt als Futter- oder Lebensmittel eingesetzt werden oder ob sie zur Gewinnung der Vitamine verwendet werden, ist unklar. Klar ist, dass die Gewinnung von Vitamine aus transgenen Pflanzen bisher noch nicht mit den anderen Produktionsweisen konkurrieren kann (Herbers 2003).

Süsstoffe: Brazzein-Mais

Pentadiplandra brazzeana wächst im westafrikanischen Staat Gabun. Die Beere dieser Pflanze produziert das ultrasüsse Protein Brazzein. Da Brazzein 500 bis 2000mal süßter als Zucker schmecken kann und dabei zudem noch praktisch kalorienfrei ist, hat das Protein das Interesse der Lebensmittelindustrie geweckt. Verfügbar gemacht haben es WissenschaftlerInnen von der Universität von Wisconsin. Sie haben das entsprechende Gen aus der Pflanze isoliert. Für die Patente, die sie darauf erhielten, haben sie mittlerweile an mehrere Biotech-Unternehmen Lizenzen verteilt. Eines der Unternehmen ist die texanische Firma Prodigene. Sie hat das patentierte Gen in Mais eingefügt und die transgene Sorte im Jahr 2002 auch schon im Freiland angebaut (USDA 2003a, Hood & Woodard 2002). Das Vorhaben verspricht hohe Gewinne. Rund 1,4 Milliarden US-Dollar beträgt der weltweite Markt für Süsstoffe. Wenn der Brazzein-Mais hält, was er verspricht, dürfte Prodigene dereinst ein Stück dieses grossen Marktes für sich beanspruchen. Leer ausgehen dürften hingegen die afrikanischen Staaten, in denen *Pentadiplandra brazzeana* wächst.

Bioplastik

Plastik wird fast ausschliesslich aus nicht-erneuerbaren Rohstoffen hergestellt – vor allem aus den aus Erdöl gewonnenen Adipinsäuren und Vinylchloriden. Da die Kunststoffe nicht abgebaut werden können, wachsen unsere Müllberge. Das Wachsen stoppen wollen die VertreterInnen der grünen Gentechnik. Der Weg dazu: Transgene Pflanzen entwickeln, die Biopolymere für die Plastikherstellung bilden. Biopolymere sind kompostierbar und zerfallen somit nach Gebrauch rückstandsfrei. Polyhydroxybuttersäure (PHB) ist eines dieser Biopolymere. Gebildet wird es natürlicherweise von Bakterien – wie zum Beispiel von *Ralstonia eutropha* (Poirier 1999). Anfang der 90er Jahre begannen Firmen aus PHB Bioplastik herzustellen. Während Monsanto *Ralstonia eutropha* zur Produktion nutzte, isolierte die englische Firma ICI/Zeneca die Gene, die für die Bildung von PHB verantwortlich sind, und fügte sie in *Escherichia coli* ein. Die beiden bakteriellen Produktionssysteme hatten jedoch einen Nachteil: der Plastik, den sie produzierten, war zehnmal teurer als der konventionelle Plastik aus Kunststoffen (Murphy 2003a). Die Produktion grosser Mengen kam daher aus

ökonomischen Gründen nicht in Frage. Dem Bioplastik aus PHB blieben nur Nischenmärkte wie zum Beispiel die Anwendung in der Medizin, wo die Biopolymere als künstliches Gewebe genutzt werden können.

Mit dem Nischenplatz nicht zufrieden war Monsanto. Der Konzern plante, die Kosten der PHB-Produktion zu senken. Das Mittel dazu sah er im grossflächigen Anbau von transgenen Pflanzen, die PHB produzieren. Monsanto kaufte folglich die PHB-Produktionsrechte von ICI/Zeneca und transferierte die Gene von *Ralstonia eutropha* in Raps (Murphy 2003a). Die erwünschte Kostenreduktion ist damit jedoch noch nicht erzielt worden. Denn Monsanto gelang es nicht, eine Technik zu entwickeln, mit der das PHB effizient und kostengünstig aus den transgenen Pflanzen isoliert werden kann. Da sich zudem noch weitere Probleme stellten, verkaufte Monsanto 2001 sein PHB-Geschäft an die Firma Metabolix (Murphy 2003a). Zusammen mit dem US-amerikanischen Energieministerium entwickelt Metabolix seither die transgenen PHB-Pflanzen weiter.

Es gibt verschiedene andere Akteure, die ebenfalls versuchen, Bioplastik aus transgenen Pflanzen zu gewinnen. Neben Raps sind Baumwolle, Tabak, Mais, Luzerne und Kartoffeln schon so verändert worden, dass sie PHB bilden (Rezzonico et al. 2002). Ausser PHB sind zudem auch andere Biopolymere in transgenen Pflanzen hergestellt worden (Moire et al. 2003, Rezzonico et al. 2002). Bisher hat jedoch noch keine transgene Pflanze den Durchbruch geschafft. Die Probleme, die es noch zu überwinden gilt, sind: Die transgenen Pflanzen müssen die Biopolymere in ausreichend grosser Menge bilden, damit die Produktion ökonomisch vertretbar ist. In einigen Fällen ist dies zwar gelungen, doch war dies mit metabolischen Kosten verbunden. Der totale Ertrag aus den transgenen Pflanzen war gegenüber unveränderten Pflanzen verringert. Um mit anderen Produkten konkurrieren zu können, muss die Produktion von Biopolymeren in transgenen Pflanzen jedoch ohne Ertragsverluste gelingen. Anders ausgedrückt: es reicht aus ökonomischen Gründen nicht aus, nur die Polymere zu gewinnen, auch andere Produkte der transgenen Pflanze wie Öle oder Zucker müssen für die Weiterverwendung in ausreichenden Mengen vorhanden sein (Moire et al. 2003). Neben den Ertragsverlusten existiert zudem immer noch das Problem der Extraktion. Es fehlen die geeigneten Methoden, um die Polymere effizient, kostengünstig und ökologisch vertretbar aus den transgenen Pflanzen zu isolieren. Ohne diese Methoden bleibt der ökonomische Erfolg jedoch unsicher (Moire et al. 2003). Ein weiterer Faktor, der den potentiellen ökonomischen Erfolg von Bioplastik in Frage stellt, ist der riesige Bedarf an Anbauflächen. Wollte man zum Beispiel mit Biopolymeren aus transgenem Raps zehn Prozent des jährlichen US-amerikanischen Marktes abdecken, müsste die Rapsanbaufläche von ganz Nordamerika verdreifacht werden (Murphy 2002).

Mais für die Ethanolproduktion

Ethanol kann als Treibstoff eingesetzt werden. In den USA fahren etwa fünf Prozent der Neuwagen mit Ethanol/Benzin-Mischungen. Der Staat fördert die Gewinnung von Ethanol aus Pflanzen. Der US-Senat hat sogar eine Verdreifachung des Ethanol-einsatzes verlangt. Stärke ist das Ausgangsmaterial für Herstellung von Ethanol. Mit Hilfe des Enzyms Amylase wird die Stärke in Zucker verwandelt, die anschliessend von Hefen in Alkohol vergoren wird. Ab 2007 soll die Herstellung des pflanzlichen Treibstoffes effizienter werden. Dann nämlich will Syngenta ihren transgenen Mais kommerzialisieren, dessen Amylasegehalt erhöht ist. Rund zehn Prozent der Produkt-

ionskosten sollen dank des transgenen Maises dereinst eingespart werden (Syngenta 2003d).

Industrielle Enzyme

Enzyme sind heute nicht mehr aus der industriellen Fertigung wegzudenken. Bei der Produktion von Papier, Textilien, Waschmitteln und Chemikalien spielen sie genauso eine Rolle wie bei der Herstellung von Lebens- und Futtermitteln (Biesgen et al. 2002). Proteasen, Amylasen und Lipasen zum Beispiel kommen in Waschmitteln vor und lösen von dort aus den Schmutz aus den Kleidern. Xylanasen und Zellulasen entfernen bei der Papierherstellung Ligninreste aus der Zellulose. Futtermittel werden mit Phytasen, Proteasen und Xylanasen angereichert, damit die Tiere das Futter besser verwerten können. Und bei der Herstellung von Emulsionen, Ölen und Fetten werden Lipasen eingesetzt. Der weltweite Marktwert industrieller Enzyme liegt bei rund zwei Milliarden US-Dollar, wobei der grösste Anteil bei den Waschmitteln erzielt wird, gefolgt von der Stärke- und Textilienindustrie (Biesgen et al. 2002). Als das Geschäft mit den Enzymen begann, wurden die Enzyme noch aus Tieren und Pflanzen isoliert. Heute jedoch wird der weitaus grösste Teil der Enzyme aus natürlichen und gentechnisch veränderten Mikroben gewonnen (Hood & Woodard 2002). In Zukunft könnte sich das wieder ändern. Verschiedene Firmen arbeiten nämlich daran, industrielle Enzyme in transgenen Pflanzen herzustellen. Sie versprechen sich davon eine kostengünstigere Alternative zu den mikrobiellen Produktionssystemen. Tabelle 17 zeigt Beispiele von Enzymen, die bereits in transgenen Pflanzen exprimiert werden konnten. Ob alle diese transgenen Pflanzen wirklich die erhofften effizienten und Kosten sparenden Produktionssysteme sind, wird sich für jeden einzelnen Fall zeigen müssen (Biesgen et al. 2002). Zurzeit werden einige wenige transgene Pflanzen im Freiland getestet, die industrielle Enzyme produzieren. In den meisten Fällen ist das eingefügte Gen als Geschäftsgeheimnis deklariert. Obwohl noch keine transgene Pflanzen, die industrielle Enzyme bilden, für den grossflächigen Anbau zugelassen worden sind, befinden sich zwei Enzyme aus transgenem Mais bereits auf dem Markt: Avidin und Glucuronidase. Beide Produkte sind von Prodigene entwickelt worden und werden für diagnostische Zwecke eingesetzt (PEW 2001). Gewonnen werden sie vermutlich aus denjenigen transgenen Maissorten, die Prodigene zu «Versuchszwecken» freisetzt. Die Firma Sigma Aldrich vertreibt die beiden Enzyme.

Enzym	Transgene Pflanze
Alpha-Amylase	Tabak, Erbse
Cellobiohydrolase	Luzerne
Chymosin	Tabak, Kartoffel
Glucanase	Tabak, Gerste, Luzerne, Kartoffel
Laccase	Mais
Phytase	Tabak, Soja
Trypsin	Mais
Xylanase	Tabak, Raps, Erbse, Gerste

Tabelle 17: Beispiele von Enzymen, die in transgenen Pflanzen exprimiert worden sind (nach Hood & Woodard 2002).

6.2.4 Pharmazie

Biopharmazeutika sind eine neue Generation von Arzneimitteln. Im Gegensatz zu den traditionellen pharmazeutischen Produkten werden sie nicht synthetisch hergestellt, sondern mit Hilfe biotechnologischer Methoden. Anders ausgedrückt: Biopharmazeutika sind pharmakologisch aktive Proteine, die aus lebenden Organismen gewonnen werden. Für die Pharmakonzerne gewinnen die Biopharmazeutika zunehmend an Bedeutung. Denn anders als die herkömmlichen synthetischen Stoffe sollen sie viel spezifischer wirken und können somit gegen Krankheiten eingesetzt werden, die bislang nicht oder nur unzureichend therapierbar sind.

Biopharmazeutika werden auch mit Hilfe der Gentechnik hergestellt: rekombinante Bakterien und Hefen, gentechnisch veränderte Säugerzellen und transgene Tiere produzieren Proteine, monoklonale Antikörper und Impfstoffe. Weltweit werden heute über achtzig verschiedene rekombinante Präparate vermarktet. Ihr Wert betrug 2002 fast 27 Milliarden US-Dollar. Bis ins Jahr 2006 soll er auf 70 Milliarden US-Dollar anwachsen (Ernst & Young 2003).

Die bisherigen Herstellungsverfahren von rekombinanten Präparaten sind technisch aufwändig, bergen verschiedene Kontaminationsrisiken und erfordern immense Investitionen in Produktionsanlagen. Die Herstellungskosten sind entsprechend hoch. Da die Nachfrage nach Biopharmazeutika in Zukunft stark steigen wird, rechnen die Pharmakonzerne mit einem Engpass an Anlagen für die Herstellung von Biopharmazeutika.

Einige Vertreter der Pharmabranche sehen in transgenen Pflanzen eine Alternative zu den bisherigen Herstellungsverfahren. Denn die Produktion von therapeutisch wirksamen Proteinen mit transgenen Pflanzen soll ökonomische und qualitative Vorteile bringen (siehe Tabelle 18). Vor allem was die Kosten betrifft, sind die Aussichten für die Pharmahersteller verlockend. So soll zum Beispiel die Herstellung eines rekombinanten Proteins in transgenen Pflanzen 10 bis 50 mal weniger kosten als diejenige mit dem Bakterium *Escherichia coli* (Giddings et al. 2000).

	Transgene Pflanzen	Transgene Tiere	Säuger-Zellen	Hefen	Bakterien
Entwicklungszeit für Produktionssystem	mittel	lang	mittel	kurz	kurz
Erfolgswahrscheinlichkeit	sehr hoch	hoch	begrenzt	begrenzt	begrenzt
Reproduzierbarkeit der Produktion	++	++	+++	+++	+++
Lagerfähigkeit	sehr gut	begrenzt	begrenzt	begrenzt	begrenzt
Scale-up: Zeit	sehr schnell	schnell	mittel	mittel	mittel
Scale-up: Kosten	sehr niedrig	mittel	hoch	hoch	hoch
Produktionsvolumen	unbegrenzt	unbegrenzt	begrenzt	begrenzt	begrenzt
Biologische Kompatibilität	sehr gut	sehr gut	gut	mittel	begrenzt
Kontamination mit Humanpathogenen	nein	ja	ja	nein	ja
Kontamination mit Toxinen	nein	nein	nein	nein	ja

Tabelle 18: Vergleich der verschiedenen Produktionssysteme für rekombinante Substanzen (nach Ernst & Young 2003).

Obwohl es bereits Anfang der 90er Jahre gelang, transgene Pharma-Pflanzen herzustellen, ist bis heute kaum ein Produkt auf dem Markt. Einer der Gründe liegt darin, dass eine erfolgreiche Entwicklung bei Pharma-Pflanzen mehr Zeit in Anspruch nimmt als bei anderen transgenen Pflanzen, da die rekombinanten Proteine zusätzlich

in klinischen Versuchen getestet werden müssen. Andere Gründe sind technischer Natur. So gelingt es zum Beispiel nicht immer, dass die transgene Pflanze das rekombinante Protein in ausreichender Menge bildet. Schwierigkeiten bereitet auch der Glykosilierungsapparat der Pflanzen. Da dieser etwas anders funktioniert als derjenige vom Menschen, können rekombinante Proteine entstehen, die ein falsches Glykosilierungsmuster aufweisen und deshalb nicht weiter verwendet werden können. Ungelöst ist in einigen Fällen auch noch die Frage der Extraktion. Die Anforderungen an die Reinheit von rekombinanten Medikamenten sind sehr hoch. Um diesen zu entsprechen, müssen geeignete und kostengünstige Methoden entwickelt werden.

Während in Europa bisher kaum Freisetzungsversuche mit transgenen Pharmapflanzen durchgeführt worden sind, hat das US-amerikanische Landwirtschaftsministerium seit den frühen 90er Jahren über 200 Feldversuche notiert. Fast drei Viertel dieser Versuche wurden mit Mais durchgeführt (Lheureux et al. 2003, UCS 2003). Weitere Pflanzenarten, die im Freiland Pharmaprodukte produzierten, sind Tomate, Reis, Gerste, Luzerne, Kartoffel, Lupine, Tabak und Raps.

Die meisten dieser Arten sind Lebensmittelpflanzen, viele werden als Futtermittel verwendet und alle können auf dem einen oder anderen Weg eingenommen werden – die Gefahr ist gross, dass Pharma-Pflanzen unbeabsichtigt in unsere Nahrungsmittel gelangen. Eine strikte Trennung ist absolut notwendig. Sie zu erreichen aber kaum möglich. In den USA verlangen denn auch mehrere Organisationen ein Moratorium für die Freisetzung und den Anbau dieser Pflanzen (mehr dazu im Exkurs weiter unten).

Welche rekombinanten Therapeutika, Antikörper und Impfstoffe sich zurzeit in der Produktpipeline befinden, wird in den folgenden drei Abschnitten dargestellt.

Rekombinante Therapeutika

Bisher sind zahlreiche rekombinante, therapeutisch wirkende Proteine in transgenen Pflanzen produziert worden. Dazu gehören zum Beispiel: Hirudin, Interferon und Aprotinin sowie – zwei der teuersten Medikamente überhaupt – Glucocerebrosidase und Granulozyten-Makrophagen-Kolonie stimulierender Faktor (Daniell et al. 2001, siehe auch Tabelle 40 im Anhang). Damit die Produktion dieser Proteine ökonomisch erfolgreich ist, müssen die transgenen Pflanzen sie in ausreichender Menge produzieren: Mindestens ein Prozent der insgesamt gebildeten löslichen Proteine sollten die rekombinanten Proteine ausmachen (Daniell et al. 2001). In vielen Fällen war die Expression der fremden Gene sehr enttäuschend. So lag der Anteil von Serum Albumin an den totalen löslichen Proteinen bei 0,02 Prozent, derjenige von Erythropoietin bei 0,003 Prozent und bei Interferon lag der Anteil unter 0,001 Prozent (Danielle et al. 2001). Die technischen Herausforderungen bei der Herstellung von transgenen Pharma-Pflanzen betreffen somit fast ausschliesslich die Expressionsmengen (Fischer & Emans 2000). Eine weitere Herausforderung ist die Reinigung. Sie muss nicht nur effizient und kostengünstig sein, sie muss auch dafür sorgen, dass mögliche Reste von Herbiziden und Pestiziden gänzlich entfernt werden.

Unserer Wissens ist bisher erst eine transgene Pharma-Pflanze kommerzialisiert worden. In Kanada hat die Firma SemBioSys vorübergehend transgenen Raps angebaut, der Hirudin bildet. Hirudin wirkt als Antikoagulans und wird zur Behandlung von Thrombosen eingesetzt. Mittlerweile soll SemBioSys den Anbau wieder gestoppt haben, um Kontaminationen von Lebens- und Futtermitteln zu verhindern (UCS 2003).

Noch nicht für den Anbau zugelassen ist der Trypsin produzierende transgene Mais der Firma Prodigene. Dennoch wird das rekombinante Trypsin bereits kommerziell angeboten. Die dazu notwendige Menge scheint die Firma aus den Maispflanzen zu gewinnen, die sie in Freisetzungsversuchen «testet». Trypsin hat mehrere mögliche Anwendungen. Es kann zum Beispiel bei der Herstellung von Impfstoffen und Insulin oder direkt als Heilmittel bei Wunden eingesetzt werden. Das aus dem transgenen Mais gewonnene Trypsin wird vom Konzern Sigma-Aldrich unter dem Namen TrypZean angeboten. Ein weiteres Produkt von Prodigene ist Aprotinin. Dieser Protease-Inhibitor hemmt Gerinnungsfaktoren und kann in der Transplantationsmedizin eingesetzt werden. Wie Trypsin wird Aprotinin in transgenem Mais produziert. Präklinische Versuche am Menschen sind am Laufen und die Marktzulassung wird für 2006 erwartet. Bereits in klinischen Versuchen der Phase II befindet sich die gastrische Lipase, die von der französischen Firma Meristem Therapeutics in transgenen Mais hergestellt wird. Die rekombinante Lipase soll dereinst bei der Behandlung von Cystischer Fibrose eingesetzt werden.

Essbare Impfstoffe

Mais, Spinat, Salat, Tomate, Soja und Banane – sie alle sind gentechnisch schon so verändert worden, dass sie Impfstoffe produzieren. Die Entwickler dieser Technologie glauben, dass die so gewonnenen Impfstoffe Vorteile gegenüber den konventionellen Impfungen bringen. Die günstigere Produktion ist einer davon. Ein anderer ist, dass die Impfstoffe nicht mehr injiziert werden müssen, sondern direkt durch den Verzehr der transgenen Pflanze aufgenommen werden können. Damit sind nicht nur die Gefahren der Injektion eliminiert, die Forschenden hoffen auch, dass von den essbaren Impfstoffen vor allem ärmere Länder profitieren könnten. Denn Impfstoffe, die auf dem Felde wachsen, können einfach hergestellt werden, die aufwändige Kühlung für Transport und Lagerung entfällt. Dass das Konzept der essbaren Impfstoffe funktionieren kann, wurde 1997 erstmals gezeigt. Damals assen elf Freiwillige rohe transgene Kartoffeln, die einen Impfstoff gegen enterotoxische *Escherichia coli* herstellen. Zehn der Probanden bildeten nach dem Verzehr Antikörper gegen das Enterotoxin. Dieses Resultat gilt als Beweis, dass essbare Impfstoffe die Verdauung überleben und eine Immunantwort stimulieren können (PEW 2001, Schuyler et al. 2002).

Hepatitis B, Malaria, Grippe, HIV, Cholera, Diarrhoe und autoimmune Diabetes sind Beispiele von Krankheiten, für die schon Impfstoffe in transgenen Pflanzen hergestellt worden sind (Giddings et al. 2000). Verschiedene Faktoren haben bisher jedoch den kommerziellen Erfolg dieser Pflanzen verhindert oder zumindest verzögert. Einer davon ist, dass Pflanzen oftmals zu geringe Mengen der Antigene bilden. Zudem ist es nicht immer möglich, eine dauerhafte und gleichmässig hohe Produktion der Wirkstoffe zu erzielen. Ein weiteres Problem sind die pflanzlichen Glucane. Sie können die Eigenschaften der rekombinanten Impfstoffe verändern (Schuyler et al. 2002).

Trotz der bestehenden Probleme haben einige wenige der in transgenen Pflanzen hergestellten Impfstoffe den Weg in klinische Versuche gefunden. Ein Beispiel ist der Impfstoff gegen das Non-Hodgkin-Lymphom. Die Firma Vacaville testet ihn zurzeit in der klinischen Phase I. Bereits beendet sind die ersten klinischen Versuche mit dem oralen Impfstoff gegen enterotoxische *Escherichia coli*, den die Firma Prodigene in transgenen Pflanzen herstellt.

Antikörper

Impfstoffe veranlassen den Körper, Antikörper zu produzieren. Eine Alternative dazu ist, dem Körper direkt Antikörper zu liefern. Das therapeutische Potential von Antikörpern ist schon lange bekannt. Doch die Schwierigkeiten bei der Herstellung haben die klinische Anwendung bisher limitiert (Giddings et al. 2000). Nichtsdestotrotz ist der Markt für therapeutische Antikörper in den letzten Jahren stark gewachsen und soll 2002 die 4 Milliarden US-Dollar-Grenze überschritten haben. Für 2010 wird der Markt auf 25 Milliarden US-Dollar prognostiziert.

1989 gelang es zum ersten Mal, Antikörper in einer Pflanze herzustellen. Seither sind beträchtliche Mittel darin investiert worden, Antikörper in transgenen Pflanzen zu produzieren. Ein erstes Produkt dürfte demnächst kommerzialisiert werden: CaroRx (Schillberg et al. 2002). Der von der Firma Planet Biotechnology in transgenem Tabak hergestellte Antikörper ist in der klinischen Phase III und soll dereinst verhindern, dass die Karies verursachenden Bakterien unsere Mäuler infizieren. Ebenfalls gegen ein Bakterium richtet sich der Antikörper EPI-19 der Firma Epicyte. Er soll das Respiratory Syncytial Virus neutralisieren, das Myalgien und schwere Erkrankungen der unteren Atemwege verursachen kann. Ob die Neutralisation gelingt, wird 2004 zum ersten Mal in klinischen Versuchen der Phase I getestet. Neben EPI-19 entwickelt Epicyte auch Antikörper gegen das Enterotoxin von *Clostridium difficile*, gegen Herpes sowie gegen Krebs. Die Firma Meristem Therapeutics testet zurzeit in präklinischen Versuchen ebenfalls Antikörper gegen Krebs.

Bisher sind noch keine Antikörper aus transgenen Pflanzen auf dem Markt erhältlich. Der folgende Vergleich zeigt jedoch, dass die Produktionskosten gegenüber bisherigen Produktionssystemen stark sinken könnten: Produziert man einen IgG Antikörper mit transgener Luzerne in einem 250 Quadratmeter grossen Gewächshaus, dürften die Herstellungskosten bei etwa 500 bis 600 US-Dollar pro Gramm liegen. Die Produktion in Hybridomazellen hingegen kostet 5000 US-Dollar pro Gramm (Daniell et al. 2001)

Exkurs: Pharma-Pflanzen verunreinigen Nahrungsmittel

Bisher wurden pharmazeutisch wirksame Substanzen in geschlossenen Anlagen und Fabriken hergestellt. Mit der Entwicklung von transgenen Pharma-Pflanzen wird die Produktion nun ins offene Feld verlagert. Das birgt ein Risiko. Da die gentechnische Herstellung von Pharmazeutika vor allem in agronomisch wichtigen Nutzpflanzen wie Mais, Raps, Kartoffeln oder Soja stattfindet, stellt sich das Problem, dass es bei der gleichen Nutzpflanzenart eine Reihe von äusserlich nicht unterscheidbaren Sorten gibt, die aber völlig unterschiedliche Produkte liefern. Die verschiedenen Sorten können sich kreuzen. So könnte zum Beispiel Raps, der menschliches Hirudin bildet, mit Raps auskreuzen, der zur Gewinnung von Speiseöl angebaut wird. Ein unkontrollierter Eintrag von pharmazeutisch wirksamen Fremdstoffen in Nahrungsmittel wird dadurch sehr wahrscheinlich. Wie ernst das Risiko zu nehmen ist, zeigt der versuchsweise Anbau von transgenen Pharma-Pflanzen in den USA. Dort kam es 2002 zu dem bisher vermutlich größten Fall von Verunreinigung konventioneller mit gentechnisch veränderten Nutzpflanzen der neuen Generation. Genau betrachtet handelte es sich dabei um zwei Fälle, an denen jeweils die Firma Prodigene² (Inc., College

² Im September 2003 wurde Prodigene von einem Tochterunternehmen der Firma Stine Seed (USA) vollständig übernommen (<http://www.ifbf.org/publication/spokesman/story.asp?number=21545&type=News>).

Station, Texas) beteiligt war (USDA 2002): (1) Einerseits kam es im US-amerikanischen Bundesstaat Iowa zu einer Verunreinigung auf dem Feld, bei der Durchwuchspflanzen von transgenem Pharma-Mais zu beklagen war. Prodigene musste – als kurzfristige Maßnahme – etwa 60 Hektar Mais von benachbarten Feldern ernten und zerstören, weil diese möglicherweise von der Pharma-Maissorte bestäubt worden waren. (2) In der gleichen Woche sicherten MitarbeiterInnen des Landwirtschaftsministeriums im Bundesstaat Nebraska 500'000 Scheffel (ein Scheffel entspricht 8,73 Liter) von konventionellem Soja. Diese waren mit gentechnisch verändertem Pharma-Mais verunreinigt. Über die Art der gentechnischen Veränderungen des Mais gibt es widersprüchliche Angaben, es soll an dieser Stelle offen gelassen werden, auch, weil es für die hier angestellten Überlegungen nicht von großer Bedeutung ist. Es soll allerdings darauf hingewiesen werden, dass die beteiligte Prodigene Inc. in den Vereinigten Staaten und damit auch weltweit zu den Akteuren gehört, die bei der Entwicklung von gentechnisch veränderten Pflanzen zur Herstellung von pharmazeutischen und industriellen Wirk- und Grundstoffen am weitesten fortgeschritten ist (siehe zum Beispiel Freese 2002).

Die Kombination dieser beiden Fälle führt praktisch das gesamte Risiko-Spektrum vor Augen, wie es sich aus den neuen gentechnisch veränderten Pflanzen ergibt. Dabei sind nur Teilaspekte speziell für die neuen Generationen der transgenen Sorten: So ist die Auskreuzung der rekombinanten Konstrukte in die konventionellen Pflanzen auf benachbarten Feldern grundsätzlich ein großes Problem, dessen Tragweite sich von Pflanzensorte zu Pflanzensorte jeweils speziell darstellt (siehe zum Beispiel Bock et al. 2002). Angesichts der Stoffe – pharmakologisch wirksam oder/und möglicherweise toxisch für die Gesundheit des Menschen oder/und der Natur – die in einem Teil der neuen Pflanzen produziert werden sollen, verändert sich in erster Linie die mögliche Tragweite. Auch die so genannten Durchwuchspflanzen sind ein bekanntes Phänomen: in Kanada stellen sie mancherorts bereits ein Unkrautproblem dar, wenn zum Beispiel zwei herbizidresistente Sorten in zwei aufeinander folgenden Jahren angebaut werden. Auskreuzung und Durchwuchspflanzen sind nur zwei Beispiele für Kontaminationswege. Im Verlauf der weiteren Stationen des Handels- und Produktionsweges gibt es weitere Gefahrenpunkte (ausführlich beschrieben in Beck et al. 2002). Nach Ansicht der USC (Union of Concerned Scientists, USA) finden Pharma-Pflanzen vor allem auf zwei Arten ihren Weg in die Nahrungsmittel-Produktion: durch Vermischung bzw. Verunreinigung des Saatgutes und durch Pollenflug (UCS 2003).

Als Konsequenz aus den beiden Verunreinigungsfällen des Jahres 2002 hat das US-amerikanische Landwirtschaftsministerium (USDA) im März 2003 die Regeln für den Anbau von gentechnisch veränderten Nutzpflanzen zur Herstellung pharmazeutisch wirksamer Inhaltsstoffe überarbeitet: Die wesentlichen Punkte der Revision stellen sich wie folgt dar (USDA 2003b):

- Erhöhung der Anzahl der Kontrollen auf den Feldern von ursprünglich einer Kontrolle je Testfeld und Jahr auf fünf Kontrollen im Anbaujahr und zweien im Folgejahr; Durchführung dieser Kontrollen zu kritischen Zeitpunkten im Jahr (Aussaat, Ernte),
- Einführung einer Abstandsregel für so genannten «open pollinated corn»; in einer Umgebung von 1,6 km um ein Testfeld darf kein anderer Mais angebaut werden; Verbreiterung einer Brachfläche («fallow zone») zu den nächsten Nutzpflanzen von 7,5 auf mindestens 15 Meter),

- verpflichtende Verwendung getrennter Anbau- und Erntemaschinen; zum Beispiel Verwendung spezieller Maschinen allein für die Arbeit mit den Pharmapflanzen,
- Verbesserung und Gewährleistung der Schulung von Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern der Firmen, die in den Prozess (Entwicklung und Anbau von transgenen Pflanzen zur Herstellung pharmakologisch wirksamer Substanzen) involviert sind.

Ergänzend zu den unmittelbar eingeführten neuen Regelungen kündigte die US-amerikanische Landwirtschaftsministerin Ann Venneman einen Kommunikationsprozess an, zu dem die Öffentlichkeit eingeladen wurde. Dieser soll helfen, das System weiter zu verbessern und gleichzeitig seine Transparenz erhöhen (USDA 2003b). Außerdem war es auf den Testfeldern des Vorjahrs, inklusive der Flächen der Mantelsaat, im Jahre 2003 verboten, Nahrungs- oder Futterpflanzen anzubauen, damit soll verhindert werden, dass sich Verunreinigungen mit so genannten Durchwuchspflanzen ergeben. Diese waren vermutlich die Ursache für die «Prodigene-Fälle». Zu dem Kommunikations-Prozess lagen zum Ende unserer Recherche noch keine Ergebnisse vor, nur die Stellungnahme der National Food Processors Association (NFPA) konnte von uns verwertet werden. Diese Organisation hat gravierende Bedenken gegen die Produktion von pharmazeutischen und industriell zu nutzenden Stoffen in Nahrungspflanzen. Wenn die Kontrollbehörden nicht in der Lage seien, die Verfälschung der Nahrungspflanzen 100-prozentig zu verhindern, dann sollte es nach Meinung der NFPA grundsätzlich verboten werden, diese Stoffe in den Nahrungspflanzen herzustellen (NFPA 2003). Wäre die NFPA im Vorfeld zu dieser Frage angehört worden, so heißt es weiter, hätte sie die Verwendung von Nahrungspflanzen zu diesem Zweck nicht unterstützt. Im Übrigen erinnert die NFPA an den Starlink-Fall, bei dem eine nicht für den menschlichen Verzehr zugelassene gentechnisch veränderte Maissorte in mehreren hundert Produkten gefunden wurde, die alle aus den Supermärkten zurückgerufen werden mussten. In einem Bericht für die Verbraucher-Organisation Genetically Engineered Food Alert (USA) von Bill Freese (2002) wird eine lange Liste von Risiken für die Gesundheit von Menschen und Umwelt dargestellt, die in Verbindung mit den «drug-growing plants» stehen. Die Risiken reichen von der Gefahr allergischer Reaktionen auf die produzierten Stoffe, toxische Wirkungen durch ebendiese oder die gewollte aber unkontrollierte Wirkung der Pharmazeutika nach einer der Verunreinigung der Nahrungskette. Diese Risiken gelten nach Freese entsprechend auch für wild lebende Tiere, die mit den gentechnisch veränderten Pflanzen interagieren werden (Untersuchungen zur Toxizität und Persistenz der pharmazeutischen Wirkstoffe in der Umwelt fehlen jedoch vollständig). Im Übrigen sei die APHIS (Animal and Plant Health Inspection Service), die zuständige Kontrollbehörde, nicht in der Lage, den Versuchsanbau zu kontrollieren. Freese zitiert in diesem Zusammenhang einen Ausschuss der US-amerikanischen Akademie der Wissenschaften, nach deren Meinung nicht das ganze Personal der APHIS in Biotechnologie geschult ist und zumindest in Teilen die Implikationen ihrer Kontrollen nicht verstehen (NAS 2002). Freese empfiehlt aus den genannten Gründen, die Kultivierung der gentechnisch veränderten Pharma-Pflanzen außerhalb von Gewächshäusern vollständig zu unterlassen und auf die Verwendung von Nicht-Nahrungspflanzen zu beschränken.

6.3 Transparente, marker- und pollenfreie Pflanzen

Wie Umfragen immer wieder zeigen, will die Mehrheit der europäischen VerbraucherInnen keine transgenen Lebensmittel auf ihren Tellern. Diese breite Ablehnung werde mit den transgenen Pflanzen der zweiten und dritten Generation abnehmen – glauben viele GentechnikbefürworterInnen. Doch welche Eigenschaften müssen transgene Pflanzen aufweisen, um von den VerbraucherInnen akzeptiert zu werden? Einen sichtbaren Nutzen müssen sie bringen, darin sind sich die GentechnikerInnen einig. Sie versprechen deshalb, gesündere, nahrhaftere und länger haltbare Lebensmittel zu entwickeln. Aber nicht nur das. Um das Vertrauen der VerbraucherInnen zu gewinnen, wollen die GentechnikerInnen zwei weitere Verbesserungen erreichen. Die erste betrifft die Transparenz: «Herstellung, Testung und Vermarktung der neuen transgenen Pflanzen werden mit grösstmöglicher Transparenz durchgeführt», sagt zum Beispiel Joachim Schiemann von der Biologischen Bundesanstalt für Land- und Forstwirtschaft in Braunschweig. Bei der zweiten Verbesserung geht es um die Sicherheit. Obwohl die GentechnikbefürworterInnen immer wieder sagen, wie sicher transgene Pflanzen seien, entwickeln sie neue Techniken, um ihre Produkte sicherer zu machen. Dass die GentechnikerInnen dabei nicht nur die aus ihrer Sicht irrationalen Ängste der Leute abbauen, sondern auch einen eigenen Nutzen aus der Entwicklung der neuen Techniken ziehen wollen, zeigen die folgenden Abschnitte. Sie handeln von der Transparenz und den Bemühungen, transgene Pflanzen zu entwickeln, die weder Antibiotikaresistenzgene besitzen noch ihre fremden Gene an andere Pflanzen weitergeben können.

6.3.1 CBI – die unbekanntenen Gene

Im April 2003 gab das Robert Koch Institut in Berlin dem Schweizer Konzern Syngenta grünes Licht, einen transgenen Weizen im Freiland zu testen. Ein Versuch wie jeder andere? Nein. Vergleichbares hat es in der Geschichte der Freisetzungsversuche in Deutschland noch nicht gegeben (Laup 2003): Aus den öffentlich zugänglichen Antragsunterlagen zu dem Versuch ist nicht ersichtlich, welche Gensequenz in den transgenen Weizen eingeführt worden ist. Auch ist bis heute nicht bekannt, aus welchem Organismus das neue Gen stammt. Um Syngenta vor Nachteilen im Wettbewerb zu schützen, so heisst es, bliebe das Konstrukt geheim (Laup 2003). *Confidential business information* (CBI) lautet hierfür das international übliche Stichwort. «Diese Geheimniskrämerei schürt nicht nur Misstrauen, sie verhindert auch, dass Betroffene ihre Rechte wahrnehmen können», sagt Ulrike Brendel, Gentechnik-Expertin von Greenpeace. «Gentechnik auf dem Acker birgt Gefahren für Umwelt und Verbraucher. Die Behörde darf diese Daten nicht zurückhalten mit dem scheinheiligen Hinweis, es handele sich um vertrauliche Unternehmensinformation.»

Während die Geheimniskrämerei in Europa erst langsam Einzug hält, ist sie in den USA schon länger üblich, wie die Freisetzungsdatenbank des USDA zeigt. Sie listet unter anderem die Anzahl der Genehmigungen für jedes Fremdgen auf, das schon für Freisetzungen bewilligt worden ist. Weitab an der Spitze der Liste steht: CBI. In bisher 6297 Fällen ist das eingefügte Gen als Geschäftsgeheimnis deklariert worden (USDA 2003a). An zweiter Stelle der Liste steht das Markergen NptII (3'714 Fälle) gefolgt von den beiden Herbizidresistenzgenen Phosphinothricinacetyltransferase (2'413 Fälle) und EPSPS (1'497 Fälle). Ein weiteres Beispiel: Zwischen Oktober 2000 und Oktober 2003 hat das USDA 1'043 Anträge für die Freisetzung von insekten-

resistenten Pflanzen entgegengenommen. Bei 1'000 dieser Anträge war mindestens ein Gen als CBI deklariert (USDA 2003a).

6.3.2 Markergene

Markergene erlauben es, bei der gentechnischen Veränderung von Pflanzenzellen diejenigen Zellen zu entdecken, die das fremde Gen aufgenommen haben. Bisher sind dazu vor allem zwei verschiedene Arten von Genen eingesetzt worden: Antibiotikaresistenzgene und Gene, die Herbizidresistenz verleihen. Bei den Ersteren handelt es sich meistens um Gene, die Resistenz gegen eines der folgenden Antibiotika verleihen: Beta-Laktam-Antibiotika, Gentamycin B, Neomycin, Amikacin, Streptomycin und Spectinomycin (Küng 2002). Bei den Markern für Herbizidresistenz handelt es sich in den meisten Fällen um Proteine, welche die Pflanzen tolerant gegen Glufosinat, oder Glyphosat machen

Die Mehrheit der bisher freigesetzten transgenen Pflanzen enthielten Antibiotikaresistenzgene. Nach Brandt (1999) sind von den 1'300 Freisetzungen, die in der EU zwischen 1991 und 1999 durchgeführt worden sind, etwa 800 solche mit transgenen Pflanzen, die Antibiotikaresistenzgene enthielten. In den USA ist der Kanamycinresistenzmarker (NptII-Gen) das am häufigsten freigesetzte Gen (USDA 2003a). In Zukunft dürften die Antibiotikaresistenzgene von den Feldern verschwinden – zumindest in Europa. Denn hier hat die EU in der neuen Freisetzungsrichtlinie 2001/18/EG Resistenzgene für Antibiotika mit veterinär- und humanmedizinischer Bedeutung verboten. Das Verbot gilt für alle transgenen Pflanzen, die nach dem 31. Dezember 2004 in Verkehr gebracht werden. Bei Freisetzungsversuchen tritt das Verbot erst ab dem 31. Dezember 2008 in Kraft (Küng 2002). Der Grund für das Verbot: Werden transgene Pflanzen mit Antibiotikaresistenzgenen in der Landwirtschaft und in Lebensmitteln massenhaft eingesetzt, können die Antibiotikaresistenzgene über horizontalen Gentransfer auf Bakterien übergehen und damit die Resistenzeigenschaften von pathogenen Keimen verstärken. Da Antibiotikaresistenzen in der Humanmedizin bereits ein ernstes Problem sind, ist das zusätzliche Risiko, das durch den Einsatz transgener Pflanzen mit Antibiotikaresistenzen entsteht, inakzeptabel – vor allem bei Resistenzen gegen Antibiotika, die in der Human- und Veterinärmedizin genutzt werden. Nicht akzeptabel ist das Risiko auch deshalb, weil das Antibiotikaresistenzgen im Endprodukt keinen Nutzen hat und alternative Markersysteme zur Verfügung stehen. Anders ausgedrückt: Das Risiko ist vermeidbar und deshalb nicht tolerierbar. Mit dem Verbot der Antibiotikaresistenzgene hat die EU konsequent das Vorsorgeprinzip umgesetzt.

Während die Antibiotikaresistenzgene ein gesundheitliches Risiko bergen, stellen die Herbizidresistenzgene ein ökologisches Risiko dar. Je nach Nutzpflanze könnten diese Resistenzgene nämlich auf verwandte Unkräuter übertragen werden, die dann nur noch schwer bekämpfbar wären.

Seit den Anfängen der neunziger Jahre wird darüber gesprochen, Alternativen zu den Herbizid- und Antibiotikaresistenzgenen zu entwickeln. Trotzdem existieren heute noch keine neuen, breit etablierten Markersysteme für die Herstellung von transgenen Pflanzen (Küng 2002).

Eine Alternative, die bereits seit etwa neun Jahren existiert, ist das von Syngenta entwickelte Positech-System. Das dabei eingesetzte Markergene stammt aus dem Bakterium *Escherichia coli* und kodiert für das Protein Phospho-Mannose-Isomerase (PMI). Dieses Protein ermöglicht den transformierten Pflanzenzellen, aus Mannose-6-Phosphat Fruktose-6-Phosphat herzustellen. Das Selektionssystem kann bei Weizen,

Mais und Kartoffeln verwendet werden (Küng 2002, Negrotto et al. 2000, www.positech.com). Eine weitere Alternative bietet die Verwendung des Enzyms Beta-Glucuronidase. Es sorgt dafür, dass die transformierten Pflanzenzellen das Substrat X-Glu in einen blauen Farbstoff umwandeln (Joersbo & Okkels 1996). Ein drittes System verwendet das bakterielle Gen für die Xyloseisomerase. Hier baut die Selektion darauf auf, dass nur die mit dem Gen transformierten Zellen D-Xylose als Kohlenstoffquelle verwenden können (Haldrup et al. 1998).

Neben der Entwicklung von alternativen Markersystemen versucht man auch Methoden zu entwickeln, die es ermöglichen, Markergene nach der erfolgreichen Transformation wieder aus der Pflanzenzelle zu entfernen (Puchta 2003, Hare & Chua 2002). Zurzeit arbeiten die Forschenden daran, die Methoden zu verbessern und an verschiedenen Pflanzenarten auszuprobieren.

Die Suche nach neuen Markersystemen und die Herstellung von markerfreien, transgenen Pflanzen geschehen aus zwei Gründen. Zum einen will man damit die Akzeptanz der grünen Gentechnik erhöhen. Zum anderen will man damit aber auch einen praktischen Nutzen gewinnen. Nützlich sind die neuen Strategien, weil sie Mehrfachtransformationen erleichtern. Wollen Züchter zum Beispiel eine bereits bestehende transgene Sorte, die ein Markergen enthält, erneut gentechnisch verändern, brauchen sie dazu einen neuen Marker. Noch ein Beispiel: Die zurzeit verfügbaren Transformationstechniken limitieren die Anzahl der Gene, die simultan in das Erbgut der Pflanzen eingefügt werden können. Wollen die Forschenden komplexe Eigenschaften der Pflanzen verändern, müssen sie deshalb die Pflanzenzellen mehrfach transformieren, um alle notwendigen Gene einzufügen. Da bei jedem Transformationsschritt wieder Markergene verwendet werden müssen, reichern sich die Marker im Endprodukt an. Dieses Vorgehen wird den Sicherheitsanforderungen nicht gerecht und ist zudem teuer und zeitaufwendig (Hare & Chua 2002). Gelingt es jedoch, Marker nach der Transformation wieder zu entfernen, so können sie mehrfach verwendet werden.

6.3.3 Gene containment

Ob Genflucht, Auskreuzung oder vertikaler Gentransfer genannt, gemeint ist dasselbe: gentechnisch veränderte Pflanzen können via Pollen ihre Transgene an andere Pflanzen weitergeben – an Unkräuter und Wildpflanzen, mit denen sie verwandt sind, an konventionell gezüchtete Sorten derselben Art sowie an andere transgene Sorten derselben Art. Die Folgen einer Auskreuzung können unterschiedlich sein. Drei Beispiele:

(I) Mexiko ist die Heimat des Mais. Die vielen Landsorten, die dort wachsen, sind ein wichtiger Pool für die weitere Züchtung von Mais und somit auch für die Sicherheit der Ernährung. Wenn die Vielfalt die Ernährung sichert, dann ist die Kontamination der Vielfalt ein Grund, sich zu sorgen. Das findet Ignacio Chapela von der Universität von Kalifornien in Berkeley. Er hat 2001 zusammen mit David Quist im mexikanischen Bergland von Oaxaca Maislandsorten untersucht. Was die beiden Wissenschaftler dabei gefunden haben, hat weltweit für Aufregung gesorgt. Die Landsorten in Mexiko sind mit Genen von transgenem Mais kontaminiert (Quist & Chapela 2001). Die Warnungen von GentechnikkritikerInnen scheinen sich damit zu bestätigen: Die fremden Gene von transgenen Pflanzen übertragen sich auf natürliche Sorten. Die Szenarien, die sich daraus ergeben: Die fremden Gene könnten die reproduktive Fitness der Hybriden erhöhen, was wiederum zur Vertreibung alter

Landsorten führen könnte, und die fremden Gene könnten die Unkrauteigenschaften von Teosinte erhöhen (Ammann 2002).

(II) 1995 wurden in Kanada die ersten transgenen herbizidresistenten Rapsorten kommerzialisiert. Drei Jahre später waren von den 5,2 Millionen Hektar Rapsfläche bereits 51 Prozent mit transgenen Sorten bewachsen (Hall et al. 2000). Vier verschiedene Sorten von herbizidresistenten Rapsorten werden zurzeit in Kanada angebaut. Drei davon sind gentechnisch verändert und gegen die Herbizide Glufosinat, Glyphosat bzw. Bromoxynil resistent. Die vierte Sorte ist konventionell gezüchtet worden und weist eine Resistenz gegen Imidazolinon auf. Durch vertikalen Gentransfer sind in den letzten Jahren transgene Rapspflanzen entstanden, die gleich gegen drei Herbizide resistent sind (Orson 2002, Beckie et al. 2001, Hall et al. 2000.). Die Folge: transgener Raps ist in Kanada zu einem lästigen, nur schwer bekämpfbaren Unkraut geworden.

(III) Gail und Tom Wiley bauen im US-Bundesstaat North Dakota Sojabohnen an. Einen Teil ihrer Ernte exportieren sie nach Japan. Die Wileys benutzen bewusst keine transgenen Sorten. Sie staunten deshalb nicht schlecht, als ihr japanischer Handelspartner ihre Ernte abwies, weil sie einen zu hohen Anteil der transgenen Roundup-Ready Sojabohne enthielt. Die Quelle der Kontamination vermutet Tom Wiley in den Nachbarsfeldern, von wo transgene Pollen seine Pflanzen befruchtet haben (Heinzer 2002).

Um Beispiele wie die obigen zu verhindern, wollen GentechnikerInnen transgene Pflanzen entwickeln, die ihre fremden Gene nicht mehr weitergeben können. Tabelle 19 listet einige der verfolgten Ansätze auf. Am weitesten fortgeschritten ist die Entwicklung von transplastomischen Pflanzen, von männlich sterilen Pflanzen sowie von transgenen Pflanzen mit sterilen Samen. Auf diese drei Techniken wird im Folgenden kurz eingegangen. Dabei wird auch gezeigt, dass es nicht allein die Sicherheitsbedenken sind, welche die Entwicklung der Techniken vorantreiben.

Technik	Vorteil	Nachteil	Stand
Apomixis	Der Samen entsteht vegetativ, das heisst ohne Befruchtung. Kontrolle der Auskreuzung und Samenverbreitung.	Nur bei einigen wenigen Pflanzen bekannt.	In der Entwicklung.
Kleistogamie	Die Befruchtung erfolgt, bevor die Blüte sich öffnet. Verhindert theoretisch die Auskreuzung.	Gene für Kleistogamie sind noch nicht erhältlich. In der Praxis erfolgt Introgression trotz der Selbstbefruchtung.	Bisher nicht verfügbar.
Samensterilität	Kontrolliert sowohl die Auskreuzung wie auch die Samenverbreitung.	Falls das Transgen ruhig gestellt wird (Silencing), erfolgt Introgression.	Terminatortechnik bisher nicht im Feld getestet. RBF bei Tabak.
Männliche Sterilität	Verhindert das Auskreuzen.	Die Pflanzen müssen durch Kreuzpollinierung vermehrt werden.	Bei Raps bereits kommerzialisiert.
Transplastom	Verhindert Auskreuzung.	Techniken für den Export der Proteine sind noch nicht erhältlich. Fremde Proteine werden nicht glykosyliert.	Bei Tabak, Kartoffel und Tomate getestet.
Inkompatible Genome	Verhindert die Rekombination nach der Befruchtung.	Könnte bei Pflanzen nicht anwendbar sein, die homologe Rekombination haben.	Bisher nicht verfügbar.

Tabelle 19: Technologische Ansätze, um den vertikalen Gentransfer zu verhindern oder zu reduzieren. RBF steht für *recoverable block of function* (verändert nach Daniell 2002).

Transplastomische Pflanzen: Pflanzenzellen enthalten Chloroplasten – Zellorganellen, die photosynthetisch aktiv sind und ein eigenes Erbgut besitzen. Das Erbgut der Chloroplasten lässt sich genau so gentechnisch verändern, wie das Erbgut einer Pflanzenzelle (Daniell et al. 1998). Fügt man die Fremdgene ins Erbgut der Chloroplasten ein, kann man die Häufigkeit von Auskreuzungen reduzieren. Diese Reduktion gelingt bei den Pflanzenarten, welche die Chloroplasten mütterlich – also nicht via Pollen – vererben. Die fremden Gene bleiben in diesen Fällen in den Chloroplasten zurück und können sich somit nicht ausbreiten. Bisher ist die gentechnische Veränderung von Chloroplasten erst bei einigen Kulturpflanzenarten gelungen wie zum Beispiel bei Raps, Tomate oder Tabak. Bei Reis, Kartoffel und Aubergine wird die Technik noch entwickelt (Transgen 2003). Bis die erste transplastomische Pflanze die Praxisreife erlangt, dürften noch vier bis fünf Jahre vergehen.

Die Gentechnikindustrie ist nicht allein aus Sicherheitsgründen an der Entwicklung von transplastomischen Pflanzen interessiert. Diese Pflanzen interessieren auch, weil sie die Effizienz der Expression erhöhen können. Viele transgene Pflanzen erreichen nie den Markt, weil die Umsetzung des fremden Gens zu ineffizient oder zu instabil ist. Pflanzen, denen man das fremde Gen in die Chloroplasten setzt, könnten das Problem lösen, weil man bei ihnen bis zu 10'000 Kopien eines Transgens in eine Zelle bringen kann. Bis heute sind denn auch bereits über 30 fremde Gene stabil in das Erbgut von Chloroplasten integriert worden (Daniell 2002).

Männlich sterile Pflanzen: Die Entwicklung von männlich sterilen Pflanzen dient vor allem der Herstellung von Hybridpflanzen. Interessant sind diese, weil sie normalerweise mehr Ertrag bringen als die nicht hybriden Sorten (Murphy 2003b). Bereits kommerzialisiert sind transgene männlich sterile Chicorée- und Rapsorten (Agbios 2003). Bei folgenden Pflanzenarten ist die entsprechende Veränderung bereits gelungen, aber noch nicht zur Marktreife entwickelt worden: Mais, Tabak, Zuckerrüben, Sonnenblumen, Kartoffeln, Tomaten, Weizen und Blumenkohl (Transgen 2003).

Da die männlich sterilen Pflanzen entweder sterile oder keine Pollen bilden, werden sie von den GentechnikbefürworterInnen auch als Lösung angepriesen, um das Problem der Auskreuzungen zu verringern (Daniell 2002). Doch die Verwendung der männlichen Sterilität für diesen Zweck hat ihre Grenzen. Denn bei vielen Kulturpflanzenarten braucht es befruchtungsfähige Pollen, damit überhaupt Früchte und Samen entstehen, die geerntet werden können. Es ist daher anzunehmen, dass männlich sterile Pflanzen vor allem zur Erhöhung des Ertrags und weniger zur Verringerung des Auskreuzungsrisikos hergestellt werden.

Sterile Samen: Eine weitere Methode, um die Ausbreitung von fremden Genen zu verhindern, bietet die so genannte «Terminator»-Technologie. Transgene Pflanzen, die mit dieser Technologie hergestellt werden, bilden Samen, die nicht mehr keimfähig sind. «Terminator»-Pflanzen können zwar andere, verwandte Pflanzen in der Umgebung befruchten, aber die daraus entstehenden Samen können sich nicht mehr zu einer Pflanze entwickeln. Auch wenn GentechnikbefürworterInnen solche transgene Pflanzen als mögliche Lösung des Auskreuzungsproblems verkaufen, entwickelt worden ist die «Terminator»-Technologie aus einem anderen Grund: «Terminator»-Pflanzen machen es den Bauern unmöglich, Saatgut aus der letzten Ernte für die

nächste Aussaat aufzubewahren, und zwingt sie somit, bei den Agrokonzernen jedes Jahr neues Saatgut einzukaufen (ETC 2002).

7. Welche transgenen Pflanzen kommen auf den Markt?

Hunderte verschiedene transgene Pflanzen werden zurzeit auf den Freisetzungsfeldern der USA und der EU getestet. Welche dieser Pflanzen in den nächsten Jahren auf den Markt kommen, hängt von verschiedenen Faktoren ab – unter anderem vom agronomischen Verhalten der transgenen Pflanzen, vom ökologischen und gesundheitlichen Risiko der transgenen Pflanzen, von der Genehmigungspraxis der zuständigen Behörden sowie vom Willen der Hersteller, die Genehmigung zum Inverkehrbringen zu beantragen.

Ohne den Anspruch auf Vollständigkeit zu erheben, listen wir in Tabelle 21 transgene Pflanzen auf, für die in den nächsten fünf Jahren der Antrag zum Inverkehrbringen gestellt werden könnte. Die Angaben dazu haben wir aus den veröffentlichten Pipeline-Listen der Agrochemiekonzerne (Syngenta 2003a, Monsanto 2003a, Pioneer 2003) sowie aus der Literatur. Zudem haben wir auch die Freisetzungsdatenbank der USA als Quelle benutzt. Da in den USA die Freisetzungen nicht über mehrere Jahre hinweg bewilligt werden, sondern jedes Jahr neu beantragt werden müssen, ist aus den Angaben der Datenbank des USDA ersichtlich, wie oft eine transgene Pflanze getestet wird. Wird eine transgene Pflanze wiederholt freigesetzt, kann davon ausgegangen werden, dass die Versuche erfolgreich verlaufen. Wir haben deshalb diejenigen transgenen Pflanzen mit in die Tabelle 21 aufgenommen, die während der letzten vier bis fünf Jahre kontinuierlich freigesetzt worden sind. Das Kriterium der Kontinuität konnte jedoch nur bei den transgenen Pflanzen angewendet werden, deren eingefügte Fremdgene transparent waren. Bei all denjenigen Freisetzungsanträgen, die das Fremdgen als Geschäftsgeheimnis deklarieren, ist das Kriterium der Kontinuität nicht anwendbar. Aus den Datenbanken der EU lassen sich marktreife transgene Pflanzen nur schwer herauslesen, da die Freisetzungen oft über mehrere Jahre hinweg bewilligt werden und nicht ersichtlich ist, ob die Freisetzungen tatsächlich auch wiederholt stattfinden oder abgebrochen werden. In den nächsten fünf Jahren könnte die Palette der bereits kommerzialisierten transgenen Pflanzenarten um folgende neue Arten verlängert werden: Banane, Erbse, Erdnuss, Futterrübe, Gerste, Gurke, Kopfsalat, Luzerne, Pfeffer, Sonnenblume und Weizen. Die Eigenschaften, die mit diesen Pflanzen auf dem Markt erscheinen könnten, sind in Tabelle 20 wiedergegeben.

Input-Eigenschaften	Output-Eigenschaften
<ul style="list-style-type: none"> • <u>Insektenresistenz</u>: Baumwolle, Mais, Raps, Reis, Sonnenblume, Soja • <u>Herbizidresistenz</u>: Baumwolle, Erbse, Futterrübe, Kopfsalat, Luzerne, Mais, Raps, Reis, Sonnenblume, Weizen • <u>Virusresistenz</u>: Erbse, Erdnuss, Gurke, Melone, Pfeffer, Tomate, Weizen, Zuckerrübe • <u>Pilzresistenz</u>: Banane, Kopfsalat, Pfeffer, Reis, Weizen • <u>Erhöhter Ertrag</u>: Mais, Raps 	<ul style="list-style-type: none"> • <u>Verlängerte Haltbarkeit</u>: Banane, Melone • <u>Veränderter Fettsäurenmetabolismus</u>: Mais, Soja • <u>Veränderter Proteinmetabolismus</u>: Gerste, Kartoffel, Weizen • <u>Veränderter Stärkemetabolismus</u>: Kartoffel • <u>Effizientere Ethanolproduktion</u>: Mais • <u>Veränderte Verdaubarkeit</u>: Gerste, Mais, Soja • <u>Reduzierte Mykotoxine</u>: Mais, Soja • <u>Veränderter Sekundärmetabolismus</u>: Kartoffel, Luzerne, Raps, Soja

Tabelle 20: Eigenschaften von transgenen Pflanzen, die in den nächsten fünf Jahren kommerzialisiert werden könnten.

Pflanze	Zweck der Veränderung	Hersteller
Banane	Pilzresistenz (Sigatoka)	DNA Plant Technology
Banane	Verlängerte Haltbarkeit	Syngenta
Baumwolle	Insektenresistenz (stacked Bt Genes)	Monsanto
Baumwolle	Insektenresistenz (stacked Bt Genes)	Dow
Baumwolle	Insektenresistenz (VIP)	Syngenta
Baumwolle	Herbizidresistenz (Glyphosat)	Syngenta
Baumwolle	Herbizidresistenz (Glyphosat; Roundup Ready Flex)	Monsanto
Erbse	Virusresistenz (PEMV, BYMV)	Universität von Idaho
Erbse	Herbizidresistenz (Glyphosat)	Seminis Vegetable Seeds
Erdnuss	Virusresistenz (TSWV)	Universität von Giorgia
Futtermübe	Herbizidresistenz (Glyphosat)	Trifolio, Monsanto
Gerste	Veränderte Speicherproteine (Glutenin)	ARS
Gerste	Veränderte Verdaubarkeit	Washington State University
Gurke	Virusresistenz	Seminis Vegetable Seeds
Kopfsalat	Pilzresistenz	Harris Moran
Kopfsalat	Herbizidresistenz (Glyphosat)	Seminis Vegetable Seeds
Kartoffel	Veränderter Stärkemetabolismus	Bayer CropScience
Kartoffel	Erhöhter Proteingehalt	Jawaharlal Nehru Universität Neu Delhi
Kartoffel	Mehr Stärke (Pommes mit weniger Fett)	Monsanto
Kartoffel	Weniger Bitterstoffe	Agricultural Research Service
Kartoffel	Ohne Amylose	Amylogene
Luzerne	Herbizidresistenz (Glyphosat)	Monsanto
Luzerne	Produktion von Resveratrol	Iowa State University
Mais	Insektenresistenz (Wurzelwurm) und Herbizidresistenz (Glyphosat)	Monsanto
Mais	Insektenresistenz (Wurzelbohrer)	Syngenta
Mais	Insektenresistenz (Maiszünsler und Ypsiloneule)	Pioneer/DuPont
Mais	Insektenresistenz (Wurzelbohrer)	Pioneer/DuPont
Mais	Reduzierte Mykotoxine	Pioneer/DuPont
Mais	Verbesserte Verdaubarkeit (Tierfutter)	Pioneer/DuPont
Mais	Effizienteres Tierfutter mit weniger Umweltverschmutzung (high Phytate)	Syngenta
Mais	Reduzierte Kosten für die Ethanolproduktion	Syngenta
Mais	Erhöhter Stärkegehalt für die Ethanolproduktion	Monsanto
Mais	Erhöhter Tryptophangehalt	Monsanto
Mais	Erhöhter Lysingehalt	Pioneer/DuPont
Mais	Erhöhter Ölgehalt	Pioneer/DuPont

Tabelle 21: Transgene Pflanzen, die in den nächsten fünf Jahren kommerzialisiert werden könnten.

Fortsetzung Tabelle 21:

Pflanze	Zweck der Veränderung	Hersteller
Mais	Erhöhter Ertrag	Pioneer/DuPont
Mais	Erhöhter Ertrag	Monsanto
Melone	Verzögerte Reife	Agritope
Melone	Virusresistenz	Seminis Vegetable Seeds
Pfeffer	Virus- oder Pilzresistenz	Syngenta
Raps	Erhöhter Ernteertrag	Syngenta
Raps	Vitamin A	Monsanto
Raps	Insektenresistenz (Bt)	Universität von Georgia
Raps	Hybrid und Herbizidresistenz (Glyphosat)	Monsanto
Reis	Herbizidresistenz (Glyphosat)	Monsanto
Reis	Pilzresistenz	Philippine Rice Research Institute
Reis	Insektenresistenz	
Sonnenblume	Herbizidresistenz	Syngenta
Sonnenblume	Pilzresistenz (Sclerotinia)	Pioneer (DuPont)
Sonnenblume	Insektenresistenz	Pioneer (DuPont)
Soja	Insektenresistenz	Monsanto
Soja	Erhöhter Lysingehalt	Monsanto
Soja	Erhöhter Lysingehalt	DuPont
Soja	Erhöhter Isoflavongehalt	DuPont
Soja	Effizienteres Tierfutter mit weniger Umweltverschmutzung (wenig Phytat)	Monsanto
Soja	Erhöhter Gehalt an Stearinsäure	Monsanto
Soja	Veränderte Samenzusammensetzung	Monsanto
Tomate	Virusresistenz	BHN Research
Weizen	Herbizidresistenz (Glyphosat)	Monsanto
Weizen	Pilzresistenz (Fusarium)	Syngenta
Weizen	Virusresistenz (WSMV, BYMV))	University of Idaho
Weizen	Veränderte Speicherproteine	ARS
Zuckerrübe	Virusresistenz	Verschiedene

7.1 Transgene Pflanzen auf dem europäischen Markt

Das EU-weite Moratorium für die Zulassung von transgenen Pflanzen könnte Ende 2003 aufgehoben werden. Damit werden die europäischen Landwirte in den nächsten Jahren zum ersten Mal wählen können, ob sie transgene Sorten anbauen wollen oder nicht. Welche Sorten werden ihnen dabei zur Auswahl stehen? Kurzfristig werden es zum einen diejenigen sein, die in der EU vor dem Moratorium für den Anbau zugelassen worden sind (Tabelle 22). Je nach Entscheidung der Genehmigungsbehörde werden zum anderen auch die transgenen Pflanzen zur Auswahl stehen, für die zurzeit ein Genehmigungsverfahren läuft (Tabelle 23).

Pflanze (Event/Name)	Veränderung	Firma	Anwendung
Chicorée (RM3-3; RM3-4, RM3-6)	Herbizidresistenz (Glufosinat) und männliche Sterilität	Bejo Zaden BV	Züchtung
Mais (Bt 176)	Insektenresistenz und Herbizidresistenz (Glufosinat)	Syngenta	Anbau
Mais (T25)	Herbizidresistenz (Glufosinat)	Aventis	Anbau
Mais (Mon810)	Insektenresistenz	Monsanto	Anbau
Mais (Bt11)	Insektenresistenz und Herbizidresistenz (Glufosinat)	Syngenta	Import und Verarbeitung
Raps (MS1, RF1)	Herbizidresistenz (Glufosinat) und männliche Sterilität	Aventis	Anbau
Raps (MS1, RF2)	Herbizidresistenz (Glufosinat) und männliche Sterilität	Aventis	Anbau
Raps (HNC92 Topas 19/2)	Herbizidresistenz (Glufosinat)	Aventis	Import und Verarbeitung
Soja (GTS40-3-2)	Herbizidresistenz (Glyphosat)	Monsanto	Import und Verarbeitung

Tabelle 22: Transgene Nahrungsmittelpflanzen, die in der EU vor dem Moratorium zugelassen worden sind. Anbau beinhaltet auch Import und Verarbeitung (nach RKI 2003, Transgen 2003).

Pflanze (Event/Name)	Veränderung	Firma	Anwendung
Baumwolle (10215; 10222)	Herbizidresistenz (Bromoxynil)	Stoneville Pedigreed Seed	Import und Verarbeitung
Baumwolle (531)	Insektenresistenz	Monsanto	Anbau
Baumwolle (1445)	Herbizidresistenz (Glyphosat)	Monsanto	Anbau
Futtermübe (A5/15)	Herbizidresistenz (Glyphosat)	Trifolium, Monsanto	Anbau
Kartoffel	Veränderte Stärke	Amylogene HB	Anbau
Mais (NK603)	Herbizidresistenz (Glyphosat)	Monsanto	Anbau
Mais (Bt11)	Insektenresistenz	Syngenta	Anbau
Mais (MON810 x NK603)	Insektenresistenz und Herbizidresistenz (Glyphosat)	Monsanto	Import und Verarbeitung
Mais (MON863 x MON 810)	Insektenresistenz	Monsanto	Import und Verarbeitung
Mais (1507)	Insekten- und Herbizidresistenz	Pioneer/Dow	Anbau
Mais (GA21)	Herbizidresistenz (Glyphosat)	Monsanto	Import und Verarbeitung
Mais (MON810 x GA21)	Insektenresistenz und Herbizidresistenz (Glyphosat)	Monsanto	Import und Verarbeitung
Mais (1507)	Insekten- und Herbizidresistenz	Pioneer/Dow	Import und Verarbeitung
Raps (GT73)	Herbizidresistenz (Glyphosat)	Monsanto	Import und Verarbeitung
Raps (MS8, RF3)	Männl. Sterilität und Herbizidresistenz (Glufosinat)	Bayer CropScience	Anbau
Raps (Falcon)	Herbizidresistenz (Glufosinat)	Bayer CropScience	Anbau
Raps (Liberator; PHoe6/AC)	Herbizidresistenz (Glufosinat)	Bayer CropScience	Anbau
Raps (T45)	Herbizidresistenz (Glufosinat)	Bayer CropScience	Import und Verarbeitung
Reis (LLRICE62)	Herbizidresistenz (Glufosinat)	Bayer CropScience	Import und Verarbeitung
Soja (A2704-12; A 5547-127)	Herbizidresistenz (Glufosinat)	Bayer CropScience	Import und Verarbeitung
Zuckerrübe (T9100152)	Herbizidresistenz (Glyphosat)	Monsanto/Syngenta	Anbau
Zuckerrübe (H7-1)	Herbizidresistenz (Glyphosat)	KWS / Monsanto	Anbau

Tabelle 23: Transgene Pflanzen, deren Anträge für die Kommerzialisierung in der EU hängig sind. Anbau beinhaltet auch Import und Verarbeitung (JRC 2003; Stand am 11. August 2003).

Die Tabellen 22 und 23 geben die transgenen Pflanzen wieder, die kurzfristig auf dem europäischen Markt auftauchen könnten. Welche Sorten auf längere Sicht in der EU kommerzialisiert werden könnten, ist unklar. Der Rückgang der Freisetzungsversuche in den letzten fünf Jahren spricht dafür, dass neue, in europäischen Freisetzen getestete Sorten nur langsam eingeführt werden. Inwieweit die in den USA hergestellten Sorten auch in der EU für den Anbau beantragt werden, hängt von den Entscheidungen der Hersteller ab. Lheureux et al. (2003) gehen davon aus, dass in den nächsten fünf Jahren für folgende Pflanzenarten eine Genehmigung zum Inverkehrbringen beantragt werden wird: Mais, Raps, Kartoffel, Tomate, Zuckerrübe und Baumwolle. Die wesentlichen Merkmale werden Herbizid- und Insektenresistenz sein (Lheureux et al. 2003).

Mit der Aufhebung des Moratoriums und dem Inkraftsetzen der neuen Richtlinien können Landwirte, Saatguthersteller und andere Akteure der Versorgungskette nun die Einführung von transgenen Sorten für die nächsten Jahre planen. Bis das Saatgut der transgenen Sorten im grossen Umfang für europäische Landwirte erhältlich ist, dürften nach der Einschätzung von Brookes & Barfoot (2003a) noch zwei bis vier Jahre vergehen (zwei bis drei Jahre bei Mais, drei bis vier Jahre bei Raps und Zuckerrübe). Wie schnell und wie grossflächig sich die transgenen Sorten durchsetzen werden, hängt von verschiedenen Faktoren ab:

- Interesse der Agrochemie-Konzerne, ihre transgenen Events nicht nur für Import/Verarbeitung auf den Markt zu bringen, sondern auch für den Anbau.
- Zulassungspraxis der zuständigen EU- und Landesbehörden.
- Interesse der Pflanzenzüchter, die für den Anbau zugelassenen transgenen Events in ihre kommerziellen Züchtungsprogramme aufzunehmen.
- Bereitschaft der Landwirte, transgene Sorten anzubauen.
- Reaktion der VerbraucherInnen auf gekennzeichnete gentechnisch veränderte Lebensmittel.
- Interesse der Lebensmittelhandelsketten, gentechnisch veränderte Lebensmittel in ihr Sortiment aufzunehmen.
- Akzeptanz von Fleisch, das von mit transgenen Futtermitteln gefütterten Tieren stammt (die Mehrheit der in der EU zugelassenen transgenen Sorten dürften als Futtermittel verwendet werden).
- Entwicklung des Weltmarkts für transgene bzw. gentechnikfreie Produkte und damit der Preisentwicklung für gentechnikfreie Produkte.

Wie hoch der Flächenanteil von transgenen Pflanzen in fünf Jahren sein wird, prognostizieren Brookes & Barfoot (2003a). Sie gehen davon aus, dass Bt-Mais im Jahr 2008 auf zehn Prozent der EU-weiten Maisfläche wächst, herbizidresistenter Mais ebenfalls auf zehn Prozent und herbizidresistenter Raps auf fünf Prozent. Den Anteil von herbizidresistenten Sojasorten veranschlagen sie zwischen null und zehn Prozent und die Anteile von Bt- bzw. herbizidresistenter Baumwolle bei je fünf bis zehn Prozent (siehe Tabelle 24).

Pflanze/Eigenschaft	Kommerziell erhältlich für den Anbau	Prozent der Anbaufläche im Jahr 2008	Prozent der Anbaufläche im Jahr 2013
Insektenresistenter Mais	2005-2007	10	25-30
Herbizidresistenter Mais	2005-2007	10	35-45
Herbizidresistenter Raps	2006-2008	0-5	20-30
Insektenresistente Baumwolle	2006-2008	5-10	40-50
Herbizidresistente Baumwolle	2006-2008	5-10	40-50
Herbizidresistente Zuckerrübe	2006-2008	5-10	40-50
Herbizidresistenter Weizen	2008-2011	0	15-25
Herbizidresistente Soja	2007-2009	0-10	30-40
Herbizidresistenter Reis	2007-2009	0-5	30-40
Nematoden- und Pilzresistente Kartoffeln	2010-2012	0	5-10
Pilzresistenter Raps	2010-2012	0	5-10

Tabelle 24: Prognostizierter Flächenanteil von transgenen Pflanzen in Europa für die Jahre 2008 und 2013 (nach Brookes & Barfoot 2003a).

8. Bilanz

«In den nächsten Dekaden wird es vielleicht der wichtigste Beitrag der Biotechnologie für die Landwirtschaft sein, die Qualität der Nutzpflanzen zu verbessern – einschliesslich erweiterte Nährstoffzusammensetzungen oder die Entwicklung anderer Eigenschaften, die attraktiv für die Konsumenten sind, wie etwa Pflanzen mit reduziertem Gehalt an gesättigten Fettsäuren.» Wer die Website von Syngenta besucht, erfährt den zukünftigen Trend der grünen Gentechnik: transgene Pflanzen mit verbesserter Qualität. Syngenta steht mit dieser Aussicht nicht allein. Wie in Kapitel 2 geschildert, sehen auch andere Konzerne und die wissenschaftliche Gemeinde die Zukunft der grünen Gentechnik so, dass vermehrt transgene Pflanzen mit Output-Eigenschaften entwickelt werden. Doch auf den Freisetzungsfeldern lässt sich ein gegenteiliger Trend feststellen; die Anzahl der Versuche mit Output-Eigenschaften nimmt seit Mitte der 90er Jahre ab. Weshalb diese Diskrepanz? Und was sind denn die Trends, die sich aus den Zahlen der Freisetzungsdatenbank herauslesen lassen?

Die im Jahr 2002 kommerziell angebauten transgenen Pflanzen besitzen ausschliesslich Input-Eigenschaften – namentlich Herbizid- und Insektenresistenz (vgl. Kapitel 4). Entwickelt worden sind sie von den wenigen Grosskonzernen, die das Geschehen bestimmen (vgl. Kapitel 3). Die Gründe, weshalb gerade die Herbizid- und Insektenresistenz den Start der grünen Gentechnik ausmachen, sind folgende: Erstens können die Eigenschaften durch das Einfügen eines einzelnen Gens erzielt werden. Die verantwortlichen Gene waren bereits Mitte der 80er Jahre bekannt und isoliert. Zweitens bringt der Verkauf des insekten- und herbizidresistenten Saatguts einen zusätzlichen Erlös, den die Konzerne nicht nur leicht einfangen konnten, sondern dank dem sie auch rasch ihre Entwicklungskosten ausgleichen und einen kontinuierlichen Nettogewinn einstreichen konnten (Murphy 2003b). Vor allem die herbizidresistenten Pflanzen bringen den Konzernen ein sattes Geschäft. Da sie sowohl die Herbizide wie auch das resistente Saatgut produzieren, können sie beides kombiniert verkaufen, die gleichen Distributionskanäle verwenden und die Preise regeln. Drittens: Da die herbizid- und insektenresistenten Pflanzen entweder den Ernteertrag erhöhen oder die Produktionskosten senken, brauchte es weder neue Ernte- noch neue Verarbeitungsmethoden. Alles in allem: die Entwicklung der beiden Eigenschaften war für die Konzerne ein attraktives Angebot (Murphy 2003b). Dass die Interessen der Konzerne das Marktgeschehen bestimmen, zeigt sich nicht nur bei den Eigenschaften, sondern auch bei den Pflanzenarten, die bereits kommerzialisiert sind. Es sind hauptsächlich Mais, Soja, Raps und Baumwolle. Alle vier Arten haben einen grossen Absatzmarkt. Die Konzerne, welche die herbizid- und insektenresistenten Sorten entwickelten, konnten deshalb damit rechnen, dass sie die Entwicklungskosten schnell wieder ausgleichen und dann grosse Umsätze erzielen konnten (Arundel 2000).

Pflanzen mit grossen Märkten, Input-Eigenschaften mit hohen Umsätzen – sie bestimmten nicht nur die Forschung und Entwicklung anfangs der 90er Jahre und damit das aktuelle Marktgeschehen, sie sind auch heute noch vorherrschend in der Entwicklung von transgenen Pflanzen (vgl. Kapitel 6). So werden weiterhin hauptsächlich Mais-, Soja-, Raps- und Baumwollsorten entwickelt, zu einem kleineren Teil auch Kartoffeln. Neu hinzugekommen sind in den letzten Jahren Weizen und Gerste. Beide Arten weisen ebenfalls grosse Märkte auf. Dass die beiden erst jetzt an Bedeutung gewinnen, hat mit den Transformationstechniken zu tun. Mais, Raps, Soja

und Baumwolle konnten schnell relativ gut transformiert werden. Bei Weizen und Gerste aber sind die entsprechenden Techniken erst später entwickelt bzw. verbessert worden (Murphy 2003a). Letzteres gilt auch für Reis, weshalb diese Pflanze ebenfalls erst in neuerer Zeit etwas häufiger im Freiland getestet wird. Da der Markt von Reis aber vergleichsweise gering ist, bleibt die Anzahl der Versuche bescheiden (vgl. Kapitel 5). Der Trend bei den Pflanzenarten liegt somit weiterhin hauptsächlich bei der Entwicklung von Arten, die einen grossen Markt haben. Die treibende Kraft dahinter sind die Grosskonzerne. Andere Interessen verfolgen die kleineren und mittleren Unternehmen sowie die öffentlichen Einrichtungen. Sie interessieren sich mehr für Nischenmärkte als die grossen Konzerne und sorgen damit dafür, dass das Spektrum der entwickelten Arten breiter ist. So werden zum Beispiel zurzeit auch etliche transgene Früchte- und Gemüsesorten im Freiland getestet, deren Entwicklung mehrheitlich von der öffentlichen Hand bezahlt wird (Shoemaker et al. 2001; siehe auch Tabellen 29 und 30 im Anhang).

Bei den im Freiland getesteten Eigenschaften liegt der Trend nach wie vor bei den Input-Eigenschaften und dort wiederum hauptsächlich bei Herbizid- und Insektenresistenz (siehe Kapitel 5). In der EU führen die Grosskonzerne die Hälfte ihrer Versuche mit herbizidresistenten Pflanzen durch (Lheureux et al. 2003.). Dass in den letzten Jahren nicht nur Herbizid- und Insektenresistenz sondern auch andere agronomische Eigenschaften im Freiland getestet worden sind, ist unter anderem wiederum auch den Interessen der kleineren und mittleren Unternehmen sowie den öffentlichen Forschungseinrichtungen zu verdanken. In der EU zum Beispiel führten die beiden Akteure doppelt so häufig wie Grosskonzerne Versuche durch, in denen krankheitsresistente Pflanzen getestet werden (Lheureux et al. 2003). Und was transgene Pflanzen betrifft, die resistent gegen abiotischen Stress sind, so zeigen die öffentlich finanzierten Einrichtungen ein viermal grösseres Interesse als die Grosskonzerne (Lheureux et al. 2003).

Seit Anfang der 90er Jahre werden transgene Pflanzen mit Output-Eigenschaften im Freiland getestet. In rund einem Fünftel aller bisher in den USA und in der EU durchgeführten Freisetzungsfeldversuchen waren sie Gegenstand der Untersuchungen. Wie viele unterschiedliche Pflanzen dabei getestet wurden, ist unklar. Klar ist, dass nur rund 11 Prozent der kommerzialisierten Pflanzen eine Output-Eigenschaft besitzen. Und schaut man auf die Anbauflächen, so liegt der Anteil der Output-Eigenschaften bei Null (siehe Kapitel 4). Die Entwicklung von Output-Eigenschaften verlief bisher weitgehend erfolglos. Laut den Aussagen der Konzerne und WissenschaftlerInnen soll sich dies in Zukunft ändern. Denn sie wollen ihr Interesse vermehrt darauf ausrichten, Output-Eigenschaften zu testen und zu kommerzialisieren. Erstaunlich ist nun, dass das Interesse an Output-Eigenschaften seit Mitte der 90er Jahre kontinuierlich abnimmt – zumindest insoweit dies aus dem Geschehen auf den Freisetzungsfeldversuchen abzulesen ist. Denn dort nimmt die Anzahl der Versuche mit verbesserten Qualitätseigenschaften ab (siehe Kapitel 5). Die Gründe dafür dürften verschiedene sein und sowohl technische, wie auch biologische und ökonomische Faktoren aufweisen. Die ökonomischen Faktoren: Gewisse Output-Eigenschaften dürften nur auf Nischenmärkten mit tiefen Umsätzen erfolgreich sein, was die teure und langwierige Entwicklung zu einem risikoreichen und nicht unbedingt einträglichem Unternehmen macht. Andere Output-Eigenschaften wiederum dürften heute noch nicht konkurrenzfähig sein. So könnten etwa die aus transgenen Ölpflanzen gewonnenen industriellen Fette die aus Erdöl gewonnen nicht konkurrieren (Murphy 2002). Weiter

setzt die Vermarktung der Output-Eigenschaften voraus, dass die transgenen Pflanzen getrennt geerntet werden und ein Identitätserhaltungssystem (*identity preservation*) existiert. Das erhöht wiederum den Managementaufwand und die Kosten, was die Output-Eigenschaften weniger attraktiv macht (Murphy 2002, Arundel 2002b). Wie gross der Einfluss der genannten ökonomischen Faktoren ist, müsste näher untersucht werden. Dass es einen Einfluss gibt, zeigt sich etwa an Folgendem: Die bei den Freisetzungsversuchen beobachtete Abnahme des Interesses an Output-Eigenschaften wäre noch grösser, wenn man allein die Interessen der privaten Konzerne betrachten würde. Denn anders als die Privaten haben die nicht profitorientierten öffentlichen Forschungseinrichtungen ihr Engagement im Bereich Qualitätseigenschaften in den späten 90er Jahren erhöht. Die Zahlen dazu: In den USA erhöhte sich der Anteil des öffentlichen Sektors an den Versuchen mit Output-Eigenschaften von 5 Prozent im Jahr 1994 auf rund 25 Prozent im Jahr 2001. Ähnlich in der EU. Hier stieg der Anteil des öffentlichen Sektors von 18 Prozent im Jahr 1994 auf 43 bzw. auf 39 Prozent in den Jahren 1998 und 1999 (Arundel 2002a). Noch eine weitere Angabe hierzu: In der EU testeten die Grosskonzerne bisher nur gerade in 8,6 Prozent ihrer Feldversuche transgene Pflanzen, die einen veränderten Nährstoffgehalt haben; bei den Universitäten hingegen lag der Anteil bei 18,7 Prozent (Lheureux et al. 2003).

Die ökonomischen Faktoren sind nicht die Einzigen, die den Erfolg von Output-Eigenschaften bestimmen. Es sind auch die technischen und biologischen Faktoren: Die Veränderung von Output-Eigenschaften ist wesentlich komplizierter als diejenige von Input-Eigenschaften (Murphy 2003b). Während die Fremdgene für Input-Eigenschaften meistens in der ganzen Pflanze aktiv sein können bzw. müssen, bedarf es bei den Genen für qualitative Merkmale einer differenzierten Aktivität. Das heisst, die Gene sollten nur in bestimmten Geweben oder in bestimmten Entwicklungsstadien aktiviert werden. Um dies zu erreichen, braucht es spezifische Promotoren. Die sind jedoch noch längst nicht in jedem Fall verfügbar (Botella 2002). Sind die Promotoren nicht vorhanden oder wirken sie nicht so, wie erwartet, kann die falsche Aktivierung des Fremdgens zerstörende Wirkungen haben (Murphy 2003b). Promotoren sind nicht die einzige technische Hürde, die bei Output-Eigenschaften höher ist als bei den meisten agronomischen Eigenschaften. Eine weitere ist, dass viele der gewünschten Qualitätseigenschaften das Einfügen mehrerer Fremdgene voraussetzen. Die Transformation mehrerer Gene bleibt aber ein schwieriges Unterfangen, da die vorhandenen Techniken Mängel aufweisen (Lindsay 2002, Jacobs et al. 2002, Halpin et al. 2001). Gelingt es trotzdem, mehrere Fremdgene in das Genom einer Pflanze zu inserieren, ist nicht gesichert, dass sie dort stabil bleiben. Noch nicht genug der Probleme: bei der Herstellung vieler Output-Eigenschaften muss in komplexe und gut ausbalancierte Stoffwechselwege eingegriffen werden. Das geht nicht immer ohne unerwartete Nebeneffekte. Drei Beispiele: (I) Eine transgene Tomate, die ein Phytoenzymogen konstitutiv exprimiert, hatte zwar wie beabsichtigt mehr Carotenoide in den Samen, wuchs jedoch ganz unerwarteter Weise nur noch zwergenhaft (Sandmann 2001). (II) Bei transgenen Ölpflanzen, die eine bestimmte Fettsäure neu in grösseren Mengen bilden sollen, kann manchmal beobachtet werden, dass der gewünschte Effekt zwar eintritt, dass die Pflanze dann aber unerwartet einen Stoffwechselweg aktiviert, um die Fettsäure abzubauen (Thelen & Ohlrogge 2002). (III) Eine transgene Tomate, deren Reifeprozess verändert worden war, zeigte im Feld eine nicht vorhergesehene Empfindlichkeit gegen einen Schadpilz (Klee 2002). Wie die Beispiele zeigen, führten die Starrheit der Stoffwechselwege, die funktionelle Redundanz der Gene und

posttranskriptionelle Kontrollprozesse immer wieder zu unerwarteten Nebeneffekten (Herbers 2003, Jacobs et al. 2002). Alles in allem: Die technischen Hürden und biologischen Fallstricke erschweren die Veränderung von Output-Eigenschaften. Das könnte mit ein Grund sein, weshalb die Anzahl der Freisetzungen mit Output-Eigenschaften abgenommen hat bzw. nicht wieder angestiegen ist. Gemessen an den Prognosen der Konzerne und WissenschaftlerInnen könnte das bedeuten, dass man die Probleme unterschätzt hat. Anders ausgedrückt: die technischen und biologischen Hürden könnten mit ein Grund sein für die Differenz zwischen den gemachten Aussagen und der beobachteten Realität. Das würde heissen, dass die Produkte den Weg auf die Versuchsfelder noch nicht geschafft haben und die Entwicklung von Qualitätseigenschaften noch in der Labor- oder Gewächshausphase steckt. Die Ergebnisse einer Umfrage bei den europäischen Protagonisten deuten darauf hin, dass dem so sein könnte. Wie die Umfrage nämlich ergab, sind Input- und Output-Eigenschaften in der Forschungs- und Entwicklungsphase etwa gleich häufig vertreten (Lheureux et al. 2003). Ob das auch in den USA so ist, müsste untersucht werden.

McElroy (2003) nennt insgesamt elf Aspekte, die zurzeit den ökonomischen Erfolg von transgenen Pflanzen mit Output-Eigenschaften in Frage stellen:

- Beispiele aus der konventionellen Züchtung zeigen, dass Pflanzen mit Output-Eigenschaften reduzierte Erträge und unrealisierte Profitabilität aufweisen können.
- Die momentane technische Unfähigkeit, transgene Pflanzen mit sich bedeutend unterscheidenden Qualitätsmerkmalen zu entwickeln.
- Die unsichere Regulation der grünen Gentechnik.
- Es braucht Businessmodelle, Infrastrukturen und unternehmensorientierte Wertsicherungssysteme, um die Kooperation zwischen Technologielieferanten, Landwirten und Endnutzern so zu erleichtern, dass die Output-Eigenschaften erfolgreich kommerzialisiert werden können.
- Es braucht ein Identitätssicherungssystem für den Anbau, die Verarbeitung und die Distribution von transgenen Pflanzen mit Output-Eigenschaften. Die Implementierung dieses Systems erhöht die Kosten.
- Zurzeit fehlt ein validiertes Produktionskontrollsystem für Pflanzensorten, die einen hohen Wert aufweisen, in kleinen Mengen produziert werden und im Vertrag angebaut werden (zum Beispiel Nutrazeutika).
- Es fehlen adäquate Testsysteme, um die gewünschten Qualitätsmerkmale der Output-Produkte verifizieren zu können.
- Die Ungewissheit, die mit der Verfügbarkeit von Preisentdeckungsmechanismen für «me-too» Output-Produkte verbunden ist.
- Es sind weiträumige Vertragsanbauarrangements notwendig, um das Risiko der Landwirte zu verringern und um einen Anreiz zu schaffen, transgene Pflanzen mit Output-Eigenschaften anzubauen.
- Die Furcht der Landwirte, ihre Unabhängigkeit zu verlieren, weil es streng kontrollierte Produktions- und Marketingwege braucht, um die Output-Eigenschaften kommerzialisieren zu können.
- Die zukünftige Konkurrenz, die transgenen Pflanzen mit Output-Eigenschaften durch andere Produktionssysteme erwächst (zum Beispiel durch alternative biotechnische Systeme).

Ein weiterer Faktor, der über Erfolg und Misserfolg der transgenen Pflanzen mit Output-Eigenschaften mitentscheidend wird, ist der Sicherheitsaspekt. Verglichen mit den Input-Eigenschaften bedingen die veränderten Output-Eigenschaften eine Weiterung der Sicherheits- und Risikofragen. Die bisherige Debatte um die transgenen Pflanzen der ersten Generation hat das Konzept der substantiellen Äquivalenz herangezogen. Dieses Konzept ist der Versuch, eine Brücke zwischen den Paradigmawelten der Erfahrung und des Experimentierens zu bauen, aus Übereinstimmungen bzw. aus fehlenden oder nicht erkennbaren Abweichungen auf Gleichartigkeit zu schließen (Albrecht 2000). Die Anwendung des Konzepts ist umstritten. Die Royal Society of Canada zum Beispiel hält die substantielle Äquivalenz für ungeeignet, um die Sicherheit von transgenen Nahrungsmitteln beurteilen zu können. Unzureichend dürfte das Konzept sicher dann sein, wenn es um die Beurteilung von transgenen Pflanzen mit Output-Eigenschaften geht. Da die spezifische Neuartigkeit bei diesen Pflanzen das Ziel der gentechnischen Veränderung ist, sind hier weitreichende methodische Innovationen für die Prüfung und Zulassung erforderlich (Albrecht 2000, Kuiper et al. 1999).

Die erfolgreiche Entwicklung und Vermarktung von transgenen Pflanzen mit Output-Eigenschaften gestaltet sich schwierig. Das Bemühen der Agrochemiekonzerne, solche Produkte zu entwickeln, ist denn auch klein – zumindest wenn man es mit den Mitteln vergleicht, die sie in die Entwicklung von Input-Eigenschaften investieren. In den nächsten fünf Jahren werden deshalb nur wenige transgene Pflanzen mit Output-Eigenschaften auf den Markt kommen (vgl. Kapitel 7). Die Mehrheit dieser neuen Produkte wiederum ist entwickelt worden, um den Lebensmittel-, Futtermittel- und anderen industriellen Verarbeitern einen Zusatznutzen zu bringen. Die grosse Ankündigung, transgene Pflanzen mit direktem Nutzen für die Verbraucher zu entwickeln, entpuppt sich bisher vor allem als rhetorischer Versuch, das Image der grünen Gentechnik zu verbessern.

9. Literatur

- Acciarri, N., Restaino, F., Vitelli, G., Perrone, D., Zottini, M., Pandolfini, T., Spena, A. & Rotino, G. (2002).** Genetically modified parthenocarpic eggplants: improved fruit productivity under both greenhouse and open field cultivation. *BMC Biotechnology* **2(1)**: 4.
- AEBC (2002).** Looking ahead – an AEBC horizon scan. Agriculture and Environmental Biotechnology Commission, London.
http://www.aebc.gov.uk/aebc/reports/horizon_scanning_report.pdf (August 2003).
- Agbios (2003).** GM database. www.agbios.com/dbase.php?action=ShowForm
- Agius, F., González-Lamothe, R., Caballero, J.L., Muñoz-Blanco, J., Botella, M.A. & Valpuesta, V. (2003)** Engineering increased vitamin C levels in plants by overexpression of a D-galacturonic acid reductase. *Nature Biotechnology* **21(2)**: 177 – 181.
- Albrecht, S. (2000).** Transgene Nutzpflanzen der 2. Generation – Überlegungen zu einer adäquaten TA. *Technikfolgenabschätzung* **1**: 81 – 91.
- Altman, A. (1999).** Plant biotechnology in the 21st century: the challenges ahead. *Electronic Journal of Biotechnology* **2(2)**: 51 – 55.
- Amaya, I., Botella, M.A. & Valpuesta, V. (2002).** The use of molecular genetics to improve food properties. In: Valpuesta, V. (ed.), fruit and vegetable biotechnology, pp. 152 – 166. CRC Press, Boca Raton.
- Ammann, D. (2002).** Moratorium – der Weg aus dem Dilemma. www.gentechnologie.ch/papiere/morat02.pdf (August 2003).
- Arundel, A. (2002a).** Agro-Biotechnology, Innovation and Employment. *Science and Public Policy* **29**: 297 – 306.
- Arundel, A. (2002b).** Indicators for a Bio-Based Economy: Tracing Applications and Potential Benefits. Background paper to the IPTS meeting on industrial biotechnology, Sevilla, February 21-22, 2002.
- Arundel, A. (2002c).** GM field trials: relevance to developing countries. *Technology Policy Briefs: Agricultural Biotechnology* **1 (2)**: 4 – 5.
- Arundel, A. (2000).** Effects of Innovation in the European agrochemical and seed sectors on employment and competitiveness. PITA Project: policy influences on technology for agriculture: chemicals, biotechnology and seeds. Objective 3 Report. <http://technology.open.ac.uk/cts/pita/AnnF1-Obj3-Employment.pdf> (Mai 2003)
- NAS (2002).** Environmental effects of transgenic plants: the scope and adequacy of regulation. Board on Agriculture and Natural Resource. The National Academies Press.
- Beckie, H.J., Hall, L.M. & Warwick, S.I. (2001).** Impact of herbicide-resistant crops as weeds in Canada. Proceedings Brighton Crop protection Conference – Weeds, pp. 135 – 142.
- Beck, A., Brauner, R., Hermanowski, R., Mäder, R., Meier, J., Nowack, K., Tappeser, B. & Wilbois, K.-P. (2002).** Bleibt in Deutschland bei zunehmendem Einsatz der Gentechnik in Landwirtschaft und Lebensmittelsproduktion die Wahlfreiheit auf GVO-unbelastete Nahrung erhalten? www.bund.net/lab/reddot2/pdf/bundst_gentechnik.pdf (November 2003).
- Biesgen, C., Hillebrand, H. & Herbers, K. (2002).** Technical enzymes produced in transgenic plants. *Phytochemistry Reviews* **1**: 79 – 85.
- BIO (2003).** Biotechnology – a new link to hope. Editors' and Reporters' Guide 2003-2004. Biotechnology Industry Organization <http://www.bio.org/er/BiotechGuide.pdf> (Juli 2003).
- Bock, A.-K., Lheureux, K., Libeau-Dulos, M., Nilsagård & H., Rodriguez-Cerezo, E. (2002).** Scenarios for co-existence of genetically modified, conventional and organic

- crops in European agriculture. Joint Research Center, European Commission. http://www.jrc.cec.eu.int/download/gmcrops_coexistence.pdf (November 2003).
- Bohnert**, H.J. & Cushman, J.C. (2002). Plants and environmental stress adaptation strategies. *In: Oksman-Caldentey, K.-M. & Barz, W. H. (eds.), Plant biotechnology and transgenic plants*, pp. 635 – 664. Marcel Dekker, New York.
- Botella**, J.R. (2002). Genes selected for their role in modifying post-harvest life. *In: Valpuesta, V. (ed.), Fruit and vegetable biotechnology*, pp. 137 – 151. Woodhead Publishing Limited, Cambridge.
- Brandt**, P. (2000). Gentechnisch veränderte Pflanzen der «Zweiten und Dritten Generation»: Was können wir erwarten? *Bundesgesundheitsblatt - Gesundheitsforschung - Gesundheitsschutz* **43(2)**: 87 – 93.
- Brandt**, P. (1999). Antibiotika-Resistenzgene als Marker in gentechnisch veränderten Pflanzen. *Bundesgesundheitsblatt - Gesundheitsforschung - Gesundheitsschutz* **42(1)**: 51 – 57.
- Brookes**, G. & Barfoot, P. (2003). GM crops in Europe – planning for the end of the moratorium. PG Economics Limited. Zusammenfassung abrufbar unter: www.bioportfolio.com/news/pg_2.htm (Juli 2003).
- Brookes**, G. & Barfoot, P. (2003b). GM rice: will this lead the way for global acceptance of GM crop technology? ISAAA Briefs No. 28. www.isaaa.org/Publications/Downloads/Briefs%2028.pdf (Juli 2003).
- Carmi**, N., Salts, Y., Dedicova, B., Shabtai, S. & Barg, R. (2003). Induction of parthenocarpy in tomato via specific expression of the rolB gene in the ovary. *Planta* **217(5)**: 726 – 35
- Chataway**, J. (2001). Novartis: new agrobusiness strategies. *AgBioForum* **4**: 14-19. www.agbioforum.org/v4n1/v4n1a03-chataway.htm (Juli 2003).
- Coughlan**, S.J. & Kinney, A.J. (2002). Transgenic plants as sources of modified oils. *In: Oksman-Caldentey, K.-M. & Barz, W. H. (eds.), Plant biotechnology and transgenic plants*, pp. 305 – 321. Marcel Dekker, New York.
- Dandekar**, A. M. & Gutterson, N. (2000). Genetic engineering to improve quality, productivity and value of crops. *California Agriculture* **54(4)**: 49 – 56. <http://danr.ucop.edu/calag/JA00/pdf/geneng.pdf> (Juli 2003).
- Daniell**, H. (2002). Molecular strategies for gene containment in transgenic crops. *Nature Biotechnology* **20**: 581 – 586.
- Daniell**, H., Streatfield, S.J. & Wycoff, K. (2001). Medical molecular farming: production of antibodies, biopharmaceuticals and edible vaccines in plants. *Trends in Plant Science* **6(5)**: 219 – 227.
- Daniell**, H., Datta, R., Varma, S., Gray, S. & Lee, S.-B. (1998). Containment of herbicide resistance through genetic engineering of the chloroplast genome. *Nature Biotechnology* **16(4)**: 345 – 348.
- Datta**, S.K. (2002). Recent developments in transgenics for abiotic stress tolerance in rice. JIRCAS Working Report, pp. 43 – 53. <http://ss.jircas.affrc.go.jp/kanko/Working%20Report/No.23%20contents.html> (Juli 2003).
- DECHEMA**, (2003). Tagungsbericht der Jahrestagung der Biotechnologen in München. www.scientificjournals.com/sj/db/pdf/ufp/8/ufp8_131_132.pdf (August 2003).
- Dewaele**, E., Craciun, A., Vauterin, M., Frankard, V., Suharyanto, E., Tadesse, J. & Jacobs, M. (2002). Metabolic engineering of a complex biochemical pathway: the lysine and threonine biosynthesis as an example. *Phytochemistry Reviews* **1**: 125 – 133.
- Dibb**, S. & Mayer S. (2000). Biotech – the next generation. The Food Commission (UK) and GeneWatch UK.
- Drexler**, H., Spiekermann, P., Meyer, A., Domergue, F., Zank, T., Sperling, P., Abbadi, A. & Heinz, E. (2003). Metabolic engineering of fatty acids for breeding of new

- oilseed crops: strategies, problems and first results. *Journal of Plant Physiology* **160**: 779 – 802.
- Duke**, S.O., Scheffler, B.E., Dayan, F.E. & Dyer, W.E. (2002). Genetic engineering crops for improved weed management traits. In: Rajasekaran, K., Jacks, T.J. & Finley, J.W. (eds.), crop biotechnology, pp. 53 – 66. American Chemical Society, Washington DC.
- Dunwell**, J.M. (2002). Future prospects for transgenic crops. *Phytochemistry Reviews* **1**: 1 – 12.
- Dunwell**, J.M. (1999). Transgenic crops: the next generation, or an example of 2020 vision. *Annals of Botany* **84**: 269 – 277.
- Ebinuma**, H., Sugita, K., Matsunaga, E. & Yamakado, M. (1997). Selection of marker-free transgenic plants using the isopentenyl transferase gene. *Proceedings of the National Academy of Sciences USA* **94**: 2117 – 2121.
- Emrich**, R. (2003). Discussion of current status of commercialization of plant biotechnology in the global marketplace. *Journal of Plant Physiology* **160**: 727 – 734.
- Ernst & Young** (2003). Zeit der Bewahrung. Deutscher Biotechnologie-Report 2003. Ernst & Young, Mannheim.
- ETC** (2002). Terminate Terminator.
www.etcgroup.org/documents/terminatorbrochure02.pdf (August 2003).
- Fischer**, R. & Emans, N. (2000). Molecular farming of pharmaceutical protein. *Transgenic Research* **9**: 279 – 299.
- Fraser**, P.D., Romer, S., Shipton, C.A., Mills, P.B., Kiano, J.W., Misawa, N., Drake, R.G., Schuch, W. & Bramley, P.M. (2002). Evaluation of transgenic tomato plants expressing an additional phytoene synthase in a fruit-specific manner. *Proceedings of the National Academy of Sciences USA* **99**(2): 1092 – 1097.
- Freese**, B. (2002). Manufacturing drugs and chemicals in crops: biopharming poses new threats to consumers, farmers, food companies and the environment. Genetically Engineered Food Alert.
www.foe.org/camps/comm/safefood/biopharm/BIOPHARM_REPORT.pdf (Juni 2003).
- Frommer**, W.B. & Beachy, R. (2003). A future for plant biotechnology? Naturally! *Current Opinion in Plant Biology* **6**: 147 – 149.
- Graff**, G.D. & Newcomb, J. (2003). Agricultural biotechnology at the crossroads. Part I: the changing structure of the industry. Bio-era – Bio Economic Research Associates.
- Giddings**, G. (2001). Transgenic plants as protein factories. *Current Opinion in Biotechnology* **12**: 450 – 454.
- Giddings**, G., Allison, G., Brooks, D. & Carter, A. (2000). Transgenic plants as factories for biopharmaceuticals. *Nature Biotechnology* **18**: 1151 – 1155.
- Golovan**, S.P., Meidinger, R.G., Ajakaiye, A., Cottrill, M., Wiederkehr, M.Z., Barney, D., Plante, C., Pollard, J., Fan, M.Z., Hayes, M.A., Laursen, J., Hjorth, J.P., Hacker, R.R., Phillips, J.P. & Forsberg, C.W. (2001). Pigs expressing salivary phytase produce low phosphorus manure. *Nature Biotechnology* **19**: 741-745.
- Haldrup**, A., Petersen, S.G. & Okkels, F.T. (1998). The xylose isomerase gene from *Thermoanaerobacterium thermosulfurogenes* allows effective selection of transgenic plant cells using D-xylose as the selection agent. *Plant Molecular Biology* **37**(2): 287 – 296.
- Hall**, L., Topinka, K., Huffman, J. & Davis, L. (2000). Pollen flow between herbicide-resistant *Brassica napus* is the cause of multiple-resistant *B. napus* volunteers. *Weed Science* **48**: 688 – 694.
- Halpin**, C., Barakate, A., Barak, M., Abbott, J.C. & Ryan, M.D. (2001). Enabling technologies for manipulating genes on complex pathways. *Plant Molecular Biology* **47**: 295 – 310.
- Hare**, P.D. & Chua, N.-H. (2002). Excision of selectable marker genes from transgenic plants. *Nature Biotechnology* **20**: 575 – 580.

- Harlander, S.K.** (2002). The evolution of modern agriculture and its future with biotechnology. *Journal of the American College of Nutrition* **21(3)**: 161S – 165S.
- Hedden, P. & Phillips, A.L.** (2000). Manipulation of hormone biosynthetic genes in transgenic plants. *Current Opinion in Biotechnology* **11**: 130 – 137.
- Heinzer, B.** (2002). Schützt die Bauern vor Gentech-Pflanzen! Gen-Schutz-Zeitung Nr. 27. www.gentechnologie.ch/zeitung/archiv/27/27_bauern.htm (August 2003).
- Hellwege, E.M., Czaplá, S., Jahnke, A., Willmitzer, L. & Heyer, A.G.** (2000). Transgenic potato (*Solanum tuberosum*) tubers synthesize the full spectrum of inulin molecules naturally occurring in globe artichoke (*Cynara scolymus*) roots. *Proceedings of the National Academy of Sciences USA* **97**: 8699 – 8704.
- Herbers, K.** (2003). Vitamin production in transgenic plants. *Journal of Plant Physiology* **160**: 821 – 829.
- Heyer, A.G.** (2000). Production of modified carbohydrates in transgenic plants. *Bundesgesundheitsblatt - Gesundheitsforschung - Gesundheitsschutz* **43(2)**: 94 – 98.
- Heyer, A.G., Lloyd, J.R. & Kossmann, J.** (1999). Production of modified polymeric carbohydrates. *Current Opinion in Biotechnology* **10**: 169 – 174.
- Hipskind, J.D. and Paiva, N.L.** 2000. Constitutive accumulation of a resveratrol-glucoside in transgenic alfalfa increases resistance to *Phoma medicaginis*. *Molecular Plant-Microbe Interactions* **13**: 551 – 562.
- Hood, E.E. & Woodard, S.L.** (2002). Industrial proteins produced from transgenic plants. *In: Hood, E.E. & Howard, J.A. (eds.), Plants as factories for protein production*, pp. 119 – 135. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht.
- Jacobs, M., Vauterin, M., Dewaele, E. & Craciun, A.** (2002). Engineering plant biochemical pathways for improved nutritional quality. *In: Oksman-Caldentey, K.-M. & Barz, W. H. (eds.), Plant biotechnology and transgenic plants*, pp. 233 – 253. Marcel Dekker, New York.
- James, C.** (2002). Global status of commercialized transgenic crops: 2002. ISAAA Briefs No 27.
- Jeske, H.** (2002). Transgenic plants with increased resistance and tolerance against viral pathogens. *In: Oksman-Caldentey, K.-M. & Barz, W. H. (eds.), Plant biotechnology and transgenic plants*, pp. 517 – 548. Marcel Dekker, New York.
- Joersbo, M. & Okkels, F.T.** (1996). A novel principle for selection of transgenic plant cells: positive selection. *Plant Cell Reports* **16**: 219 – 221.
- JRC** (2003). Deliberate releases and placing on the EU market of Genetically Modified Organisms (GMOs). Joint Research Center. <http://gmoinfo.jrc.it>
- Jung, W., Yu, O., Lau, S.M., O'Keefe, D.P., Odell, J., Fader, G. & McGonigle, B.** (2000). Identification and expression of isoflavone synthase, the key enzyme for biosynthesis of isoflavones in legumes. *Nature Biotechnology* **18(5)**: 208 – 212.
- Kishore, G.M. & Shewmaker, C.** (1999). Biotechnology: enhancing human nutrition in developing and developed worlds. *Proceedings of the National Academy of Sciences USA* **96**: 5968 – 5972.
- Klee, H.** (2002). Engineered changes in ethylene signal transduction pathways. *In: LaReesa Wolfenbarger, L. (ed.), Criteria for field testing of plants with engineered regulatory, metabolic and signaling pathways*, pp.79 – 81. Information Systems for Biotechnology, Blacksburg.
- Küng, V.** (2002). Molekulare Marker in gentechnisch veränderten Organismen. Schriftenreihe Umwelt Nr. 337. Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL), Bern.
<http://www.umwelt-schweiz.ch/buwal/shop/files/pdf/phpVLBtmr.pdf> (Juni 2003).
- Kuiper, H.A., Noteborn, H.P. & Peijnenburg, A.A.** (1999) Adequacy of methods for testing the safety of genetically modified foods. *Lancet* **354**: 1315 – 1316.
- Larson, A.P.** (2002). The future of agricultural biotechnology in world trade: the promise and challenges. www.state.gov/e/rls/rm/2002/8447pf.htm (Mai 2003).
- Laup, H.** (2003). Unbekannter Weizen. *Gen-ethischer Informationsdienst* **158**: 3 – 5.

- Llewellyn, D.J. & Higgins, T.J.V.** (2002). Transgenic crop plants with increased tolerance to insect pests. *In: Oksman-Caldentey, K.-M. & Barz, W. H. (eds.), Plant biotechnology and transgenic plants*, pp. 571 – 595. Marcel Dekker, New York.
- Lheureux, K., Libeau-Dulos, M., Nilsagard, H., Rodriguez Cerezo, E., Menrad, K., Menrad, M. & Vorgrimler, D.** (2003). Review of GMOs under research and development and in the pipeline in Europe. European Science and Technology Observatory (ESTO).
- Lindsay, D.G.** (2002). The potential contribution of plant biotechnology to improving food quality. *In: Oksman-Caldentey, K.-M. & Barz, W. H. (eds.), Plant biotechnology and transgenic plants*, pp. 201 – 232. Marcel Dekker, New York.
- Liu, Q., Sing, S. & Green, A.** (2002). High-oleic and high-stearic cottonseed oils: nutritionally improved cooking oils developed using gene silencing. *Journal of the American College of Nutrition* **21(3)**: 205S – 211S.
- Mackey, M.M.** (2002). The application of biotechnology to nutrition: an overview. *Journal of the American College of Nutrition* **21(3)**: 157S – 160S.
- McElroy, D.** (2003). Sustaining agbiotechnology through lean times. *Nature Biotechnology* **21(9)**: 996 – 1002.
- Mehta, R.A., Cassol, T., Li, N., Ali, N., Handa, A.K. & Mattoo, A.K.** (2002). Engineered polyamine accumulation in tomato enhances phytonutrient content, juice quality and vine life. *Nature Biotechnology* **20**: 613 – 618
- Menrad, K., Menrad, M., Vorgrimler, D., Lheureux, k., Libeau-Dulos, M. & Rodriguez Cerezo, E.** (2002). Anticipating commercial introduction of GMOs in the EU. Fraunhofer ISI und Institute for Prospective Technological Studies (IPTS).
- Miflin, B., Napier, J. & Shewry, P.** (1999). Improving plant product quality. *Nature Biotechnology* **17**: 13 – 14.
- Moehs, C.P., Allen P.V., Friedman, M. & Belknap, W.R.** (1997). Cloning and expression of solanidine UDP-glucose glucosyltransferase from potato. *Plant Journal* **11**: 227 – 236.
- Moire, L., Rezzonico, E. & Poirier, Y.** (2003). Synthesis of novel biomaterials in plants. *Journal of Plant Physiology* **160**: 831 – 839.
- Monsanto** (2003a). Product pipeline.
www.monsanto.com/monsanto/layout/sci_tech/prod_pipeline/productpipeline.asp
- Monsanto** (2003b). Nutritionally enhanced products developed by biotechnology.
www.monsanto.com/monsanto/content/sci_tech/literature/techpubs/nutrition.pdf
- Morrison, S. & Giovannetti, T.** (1999). Bridging the Gap, 13th Biotechnology Industry Annual Report, Ernst and Young, Palo Alto. zitiert in Arundel (2002a).
- Müller, H. & Rödiger, M.** (2001). In focus – green biotechnology. Deutsche Zentral-Genossenschaftsbank, Frankfurt.
www.botanischergarten.ch/debate/BenefitsGTDZBank.pdf (August 2003)
- Murphy, J.** (2003). Low-Phytate Barley Loosens Phytate's Grip on Phosphorus.
www.gov.on.ca/OMAFRA/english/livestock/swine/facts/info_n_phytate.htm
(20.August 2003)
- Murphy, D.J.** (2003a). Agricultural biotechnology and oil crops: current uncertainties and future potential. *Applied Biotechnology, Food Science and Policy* **1(1)**: 25 – 38.
- Murphy, D.J.** (2003b). Overview of Application of Plant Biotechnology. *In: Christou, P. & Klee, H. (eds.), Handbook of plant biotechnology*. John Wiley & Sons Ltd. In Press.
- Murphy, D.J.** (2002). Biotechnology and the improvement of oil crops – genes, dreams and realities. *Phytochemistry Review* **1**: 67 – 77.
- Murphy, D.J.** (1999). The future of new and genetically modified oil crops. *In: Janick, J. (ed.), Perspectives on new crops and new uses*, pp. 216 – 219. ASHS Press.
- Napier, J.A.** (2000). Transgenic plants for the production of pharmaceutical fatty acids. *Bundesgesundheitsblatt - Gesundheitsforschung - Gesundheitsschutz* **43(2)**: 99 – 103.

- NAS** (2002). Environmental Effects of Transgenic Plants: The Scope and Adequacy of Regulation. Committee on Environmental Impacts Associated with Commercialization of Transgenic Plants of the National Research Council, an arm of the National Academy of Science. The National Academy Press.
- Negrotto, D., Jolley, M., Beer, S., Wemck, A.R. & Hansen, G.** (2000). The use of phosphomannose-isomerase as a selectable marker to recover transgenic maize plants (*Zea Mays L.*) via *Agrobacterium* mediated transformation. *Plant Cell Reports* **19**: 798 – 803.
- NFPA** (2003). NFPA-Comment - Docket No. 03-31-1. Field Testing of Plants to Produce Pharmaceuticals and Industrial Compounds. <http://www.nfpa-food.org/comments/nfpacommentspmp.htm> (November 2003).
- Nill, K.** (2000). Genetically improved plant for foods – global utilization and direction. www.soygrowers.com/newsroom/releases/documents/nill-gm.htm (August 2003).
- N.N.** (2003). High Isoflavone Soybeans. <http://web.aces.uiuc.edu/value/factsheets/soy/fact-isoflavone-soy.htm> (August 2003).
- Ohlrogge, J.** (2002). Metabolic engineering of fatty acids and secondary effects. *In: LaReesa Wolfenbarger, L. (ed.), Criteria for field testing of plants with engineered regulatory, metabolic and signaling pathways*, pp.75 – 78. Information Systems for Biotechnology, Blacksburg.
- Orton, L.** (2003). GM crops – going against the grain. ActionAid. www.actionaid.org/resources/pdfs/gatg.pdf (August 2003).
- Orson, J.** (2002). Gene stacking in herbicide tolerant oilseed rape: lessons from the North America experience. English Nature Research Reports No. 443, www.english-nature.org.uk.
- Pioneer** (2003). www.pioneer.com/biotech/dp_biotech/future.htm (August 2003).
- Poirier, Y.** (1999). Production of new polymeric compounds in plants. *Current Opinion in Biotechnology* **10**: 181 – 185.
- Phillips, M.J.** (2001). The future of agricultural biotechnology. www.bio.org/foodag/weekly/lecture_100101.asp (Mai 2003).
- Puchta, H.** (2003). Towards the ideal GMP: homologous recombination and marker gene excision. *Journal Plant Physiology* **160**: 743 – 754.
- Quist, D. & Chapela, I.H.** (2001). Transgenic DNA introgression into traditional maize landraces in Oaxaca, Mexico. *Nature* **414**: 541 – 543.
- Rajasekaran, K., Cary, J.W., Jacks, T.J. & Cleveland, T.E.** (2002). Genetic engineering for resistance to phytopathogens. *In: Rajasekaran, K., Jacks, T.J. & Finley, J.W. (eds.), crop biotechnology*, pp. 97 – 110. American Chemical Society, Washington DC.
- Rezzonico, E., Moire, L. & Poirier, Y.** (2002). Polymers of 3-hydroxyacids in plants. *Phytochemistry Reviews* **1**: 87 – 92.
- Riley, P.A. & Hoffman, L.** (1999). Value-enhanced crops: biotechnology's next stage. Agricultural outlook, March 1999. www.ers.usda.gov/publications/AgOutlook/mar1999/ao259e.pdf (Juli 2003).
- Ritsema, T. & Smeeckens, S.C.M.** (2003). Engineering fructan metabolism in plants. *Journal of Plant Physiology* **160**: 811 – 820.
- RKI** (2003). SNIF-Database. www2.rki.de/cgi/lasso/snif/Search_e.lasso
- Robinson, C.** (2002). Genetic modification technology and food. ILSI Europe Concise Monograph Series, http://www.ilsi.org/file/1_multipart_xF8FF_8_ILSIgmtechno.pdf (August 2003).
- Sandmann, G.** (2001). Genetic manipulation of carotenoid biosyntheses: strategies, problems and achievements. *Trends in Plant Sciences* **6(1)**: 14 – 17.
- SCP** (2002). Opinion on genetically modified high amylopectin potatoes notified by amylogene HB (notification C/SE/96/3501). http://europa.eu.int/comm/food/fs/sc/scp/out129_gmo_en.pdf (August 2003)

- Schillberg, S., Emans, N. & Fischer, R. (2002).** Antibody molecular farming in plants and plant cells. *Phytochemistry Reviews* **1**: 45 – 54.
- Schulman, A.H. (2002).** Transgenic plants as products of modified starch and other carbohydrates. *In: Oksman-Caldentey, K.-M. & Barz, W. H. (eds.), Plant biotechnology and transgenic plants*, pp. 254 – 282. Marcel Dekker, New York.
- Schuyler, K.S., Krasnyanski, S.F. & Buetow, D.E. (2002).** Foods as production and delivery vehicles for human vaccines. *Journal of the American College of Nutrition* **21(3)**: 212S – 217S.
- Sevenier, R., Hall, R.D., van der Meer, I.M., Hakkert, H.J., van Tunen, A.J. & Koops, A.J. (1998).** High level fructan accumulation in a transgenic sugar beet. *Nature Biotechnology* **16(9)**: 843 – 836.
- Sharma, H.C., Sharma, K.K., Seetharama, N. & Ortiz, R. (2000).** Prospects for using transgenic resistance to insects in crop improvement. *Electronic Journal of Biotechnology* **3(2)**: 71 – 94.
- Shewry, P.R. (2002).** Improving the nutritional quality and functional properties of seed proteins by genetic engineering. *In: Oksman-Caldentey, K.-M. & Barz, W. H. (eds.), Plant biotechnology and transgenic plants*, pp. 283 – 304. Marcel Dekker, New York.
- Shoemaker, R., Harwood, J., Day-Rubenstein, K., Dunahay, T., Heisey, P., Hoffman, L., Klotz-Ingram, C., Lin, W., Mitchell, L., McBride, W. & Fernandez-Cornejo, J. (2001).** Economic Issues in agricultural biotechnology. ERS Agriculture Information Bulletin No. 762. www.ers.usda.gov/publications/aib762/ (Juni 2003).
- Sonnewald, U. (2003).** Plant biotechnology: From basic science to industrial applications. *Journal of Plant Physiology* **160**: 723 – 725.
- Suszkiv, J. (2002).** Researchers develop first hypoallergenic soybeans. www.ars.usda.gov/is/AR/archive/sep02/soy0902.pdf (August 2003).
- Syngenta (2003a).** www.syngenta.com/en/products_services/tomprod.aspx (August 2003)
- Syngenta (2003b).** www.syngentabiotech.com/research_disease.htm (August 2003).
- Syngenta (2003c).** www.syngentabiotech.com/research_insect.htm (August 2003).
- Syngenta (2003d).** www.syngenta.com/de/ar2002/science.aspx (August 2003).
- Tait, J. (2001).** Zeneca agrochemicals. *AgBioForum* **4**: 63 – 67. www.agbioforum.org/v4n1/v4n1a11-tait.htm (Juli 2003).
- Tenhaken, R. (2002).** Transgenic plants with enhanced tolerance against microbial pathogens. *In: Oksman-Caldentey, K.-M. & Barz, W. H. (eds.), Plant biotechnology and transgenic plants*, pp. 549 – 569. Marcel Dekker, New York.
- Thelen, J.J. & Ohlrogge, J.B. (2002).** Metabolic engineering of fatty acid biosynthesis in plants. *Metabolic Engineering* **4**: 12 – 21.
- Thomas, B.R. & Bradford, K.J. (2001).** Crop Biotechnology: feeds for livestock. http://sbc.ucdavis.edu/Outreach/abc/livestock_feeds_abc.htm (Juli 2003).
- Thomashow, M.F. (2002).** Engineering new phenotypes for abiotic stress tolerance by expression of transcription factors. *In: LaReesa Wolfenbarger, L. (ed.), Criteria for field testing of plants with engineered regulatory, metabolic and signaling pathways*, pp.91 – 94. Information Systems for Biotechnology, Blacksburg.
- Transgen (2003).** www.transgen.de
- UCS (2003).** Pharm and Industrial Crops. The next wave of agricultural biotechnology. www.ucsusa.org/publication.cfm?publicationID=538 (August 2003).
- USDA (2003a).** Database of US field trials with GMO's. www.isb.vt.edu
- USDA (2003b).** United States Department of Agriculture Pre-briefing for reporters on USDA's Federal Register Notice on Field Testing of Pharmaceutical-Production Plants (Transcript). USDA news release No. 0084.03. <http://www.usda.gov/news/releases/2003/03/0084.htm> (November 2003).
- USDA (2003c).** Highlights of the Federal Register Notice (FRN v. 10.03.03) - Changes in the Permit Conditions for 2003. <http://www.usda.gov/news/releases/2003/03/aphisfactsheet030603.pdf> (November

Anhang

Tabelle 25: Transgene Pflanzen, die weltweit in einem oder mehreren Ländern für den Anbau zugelassen sind (nach Agbios 2003, Stand Juli 2003).

Pflanze (Event/Name)	Veränderung	Firma	zum Anbau zugelassen seit
Baumwolle (19-51A)	Herbizidresistenz (Sulfonylhurea)	DuPont	USA 1996
Baumwolle (MON15985-7)	Insektenresistenz	Monsanto	Australien 2002 USA 2002
Baumwolle (31807/31808)	Insektenresistenz und Herbizidresistenz (Bromoxynil)	Calgene	Japan 1998 USA 1997
Baumwolle (BXN)	Herbizidresistenz (Bromoxynil)	Calgene	Japan 1997 USA 1994
Baumwolle (LLCotton25)	Herbizidresistenz (Glufosinat)	Bayer CropScience	USA 2003
Baumwolle (MON1445/1698)	Herbizidresistenz (Glyphosat)	Monsanto	Argentinien 1999 Australien 2000 Japan 1997 USA 1995
Baumwolle (MON531/757/1076)	Insektenresistenz	Monsanto	Argentinien 1998 Australien 1996 China 1997 Indien 2002 Japan 1997 Mexiko 1997 Südafrika 1997 USA 1995
Chicorée (RM3-3; RM3-4, RM3-6)	Herbizidresistenz (Glufosinat) und männliche Sterilität	Bejo Zaden BV	EU 1996 USA 1997
Flachs (FP967)	Herbizidresistenz (Sulfonylhurea)	University of Saskatchewan	Kanada 1996 USA 1999
Mais (Bt 176)	Insektenresistenz und Herbizidresistenz (Glufosinat)	Syngenta	Argentinien 1996 Kanada 1996 EU 1997 Japan 1996 USA 1995
Mais (676, 678, 680)	Herbizidresistenz (Glufosinat) und männliche Sterilität	Pioneer Hi-Bred	USA 1998
Mais (B16; DLL25)	Herbizidresistenz (Glufosinat)	Dekalb Genetics Corporation	Kanada 1996 Japan 1999 USA 1995
Mais (Bt11)	Insektenresistenz und Herbizidresistenz (Glufosinat)	Syngenta	Argentinien 2001 EU 1998 Kanada 1996 Japan 1996 USA 1996
Mais (CBH-351)	Insektenresistenz und Herbizidresistenz (Glufosinat)	Aventis	USA 1998
Mais (DBT418)	Insektenresistenz und Herbizidresistenz (Glufosinat)	Dekalb Genetics Corporation	Argentinien 1998 Kanada 1997 Japan 1999 USA 1997
Mais GA21	Herbizidresistenz (Glyphosat)	Monsanto	Argentinien 1998 Kanada 1998 Japan 1998 USA 1997
Mais (MON80100)	Insektenresistenz	Monsanto	USA 1995
Mais (MON8099)	Insektenresistenz und Herbizidresistenz (Glyphosat)	Pioneer Hi-Bred	Kanada 1996 Japan 1997 USA 1996
Mais (MON810)	Insektenresistenz	Monsanto	Argentinien 1998 Kanada 1997 EU 1998 Japan 1996 Philippinen 2002 Südafrika 1997 USA 1995

Fortsetzung Tabelle 25

Pflanze (Event/Name)	Veränderung	Firma	zum Anbau zugelassen seit
Mais (MON832)	Herbizidresistenz (Glyphosat)	Monsanto	Kanada 1997
Mais (MON863)	Insektenresistenz	Monsanto	Kanada 2003 USA 2003
Mais (MS3)	Herbizidresistenz (Glufosinat) und männl. Sterilität	Aventis	Kanada 1996 USA 1996
Mais (MS6)	Herbizidresistenz (Glufosinat) und männl. Sterilität	Aventis	USA 1999
Mais (NK603)	Herbizidresistenz (Glyphosat)	Monsanto	Kanada 2001 Japan 2001 USA 2000
Mais (T14, T25)	Herbizidresistenz (Glufosinat)	Aventis	Argentinien 1998 Kanada 1996 Japan 1997 USA 1995
Mais (TC1507)	Insektenresistenz und Herbizidresistenz (Glufosinat)	Mycogen (c/o Dow AgroSciences); Pioneer (c/o Dupont)	Kanada 2002 Japan 2002 USA 2001
Papaya (55-1/63-1)	Virusresistenz (papaya ringspot virus, PRSV).	Cornell University	USA 1996
Kartoffel (ATBT04-6, ATBT04-27, ATBT04-30, ATBT04-31, ATBT04-36, SPBT02-5, SPBT02-7)	Resistenz gegen Kartoffelkäfer	Monsanto	Kanada 1997 USA 1996
Kartoffel (BT6, BT10, BT12, BT16, BT17, BT18, BT23)	Resistenz gegen Kartoffelkäfer	Monsanto	Kanada 1995 USA 1995
Kartoffel (BMT15-101, SEMT15-02, SEMT15-15)	Resistenz gegen Kartoffelkäfer und Virusresistenz (potato virus Y, PVY).	Monsanto	Kanada 1999 USA 1999
Kartoffel RBMT21-129, RBMT21-350, RBMT22-082	Resistenz gegen Kartoffelkäfer und Virusresistenz (potato leafroll luteovirus, PLRV).	Monsanto	Kanada 1999 USA 1998
Kürbis (CZW-3)	Virusresistenz (cucumber mosaic virus CMV, watermelon mosaic virus WMV, zucchini yellow mosaic virus ZYMV).	Asgrow (USA); Seminis Vegetable Inc. (Canada)	USA 1996
Kürbis (ZW20)	Virusresistenz (watermelon mosaic virus WMV, zucchini yellow mosaic virus; ZYMV).	Upjohn (USA); Seminis Vegetable Inc. (Canada)	USA 1994
Raps (23-18-17, 23-198)	Änderung des Fettsäurenmetabolismus (specifically high laurate levels and myristic acid production)	Calgene Inc.	USA 1994 Kanada 1996
Raps (GT200)	Herbizidresistenz (Glyphosat)	Monsanto	Kanada 1996 USA 2003
Raps (T73, RT73)	Herbizidresistenz (Glyphosat)	Monsanto	Kanada 1995 Japan 1996 USA 1999
Raps (HCN 10)	Herbizidresistenz (Glufosinat)	Aventis	Kanada 1995 Japan 1997 USA 1995
Raps (HCN92)	Herbizidresistenz (Glufosinat)	Aventis	Kanada 1995 Japan 1996 USA 2002
Raps (MS1, RF1 =>PGS1)	Herbizidresistenz (Glufosinat) und Kontrollsystem für die Befruchtung	Aventis	Kanada 1995 Japan 1996 EU 1998 USA 2002

Fortsetzung Tabelle 25

Pflanze (Event/Name)	Veränderung	Firma	zum Anbau zugelassen seit
Raps (MS1, RF2 =>PGS2)	Herbizidresistenz (Glufosinat) und Kontrollsystem für die Befruchtung	Aventis	Kanada 1995 Japan 1996 EU 1996 USA 2002
Raps (MS8xRF3)	Herbizidresistenz (Glufosinat) und Kontrollsystem für die Befruchtung	Aventis	Kanada 1996 Japan 1998 USA 1999
Raps (OXY-235)	Herbizidresistenz (Bromoxynil)	Aventis	Kanada 1997 Japan 1998
Raps (PHY14, PHY35)	Herbizidresistenz (Glufosinat) und Kontrollsystem für die Befruchtung	Aventis	Japan 1997
Raps (PHY36)	Herbizidresistenz (Glufosinat) und Kontrollsystem für die Befruchtung	Aventis	Japan 1997
Raps (T45; HCN28)	Herbizidresistenz (Glufosinat)	Bayer CropScience	Kanada 1996 Japan 1997 USA 1998
Rübsen (HCR-1)	Herbizidresistenz (Glufosinat)	Bayer CropScience	Kanada 1998
Rübsen (ZSR500/502)	Herbizidresistenz (Glyphosat)	Monsanto	Kanada 1997
Reis (LLRICE06, LLRICE62)	Herbizidresistenz (Glufosinat)	Aventis	USA 1999
Soja (A2704-12, A2704-21, A5547-35)	Herbizidresistenz (Glufosinat)	Aventis	Kanada 1999 Japan 1999 USA 1996
Soja (A5547-127)	Herbizidresistenz (Glufosinat)	Aventis	USA 1998
Soja (G94-1, G94-19, G168)	Erhöhter Gehalt an Ölsäure	DuPont	Kanada 2000 Japan 1999 USA 1997
Soja (GTS 40-3-2)	Herbizidresistenz (Glyphosat)	Monsanto	Argentinien 1996 Brasilien 1998 EU 1996 Kanada 1995 Japan 1996 Südarfika 2001 USA 1994 Uruguay 1997
Soja GU262	Herbizidresistenz (Glufosinat)	Aventis	USA 1998
Soja W62, W98	Herbizidresistenz (Glufosinat)	Aventis	USA 1996
Tomate (1345-4)	Verspätete Reife	DNA Plant Technology	USA 1995
Tomate (35 1 N)	Verspätete Reife	AgriTope Inc.	USA 1996
Tomate (5345)	Insektenresistenz	Monsanto	USA 1998
Tomate (8338)	Verspätete Reife	Monsanto	USA 1995
Tomate (B, Da, F)	Verspätete Enthärtung	Zeneca Seeds	USA 1995
Tomate (FlavrSavr)	Verspätete Enthärtung	Calgene	Japan 1996 Mexiko 1995 USA 1992
Zuckerrübe (GTSB77)	Herbizidresistenz (Glyphosat)	Novartis Seeds	USA 1998
Zuckerrübe (T120-7)	Herbizidresistenz (Glufosinat)	Aventis	Kanada 2001 USA 1998

Tabelle 26: Transgene Pflanzen, deren Anträge für die Kommerzialisierung in den USA hängig sind (USDA 2003a; Stand am 11. August 2003).

Pflanze (Event/Name)	Veränderung	Firma
Alfalfa (Luzerne)	ohne Angaben	Monsanto
Baumwolle	ohne Angaben	Syngenta
Baumwolle	ohne Angaben	Dow
Baumwolle	ohne Angaben	Dow
Flechtstraussgras	ohne Angaben	Monsanto
Mais	ohne Angaben	Dow
Mais	Insektenresistenz	Syngenta
Weizen	Herbizidresistenz (Glyphosat)	Monsanto

Tabelle 27: Liste mit den wichtigsten Kombinationen von Eigenschaften in den USA zwischen 1991 und 2002 (nach Lheureux et al. 2003).

Pflanze	Eigenschaften	Anzahl notifizierter Feldversuche
Mais	Herbizid- und Insektenresistenz	414
	Herbizidresistenz und männliche Sterilität	78
	Herbizidresistenz und Änderung des Stärkemetabolismus	36
	Herbizidresistenz und Änderung des Proteinmetabolismus	26
Soja	Herbizid- und Pilzresistenz	7
	Herbizidresistenz und Änderung des Proteinmetabolismus	5
	Änderung des Fettsäuren- und des Proteinmetabolismus	11
Raps	Herbizidresistenz und männliche Sterilität	16
Baumwolle	Herbizid- und Insektenresistenz	48

Tabelle 28: Liste mit den wichtigsten Kombinationen von Eigenschaften in der EU zwischen 1991 und 2001 (nach Lheureux et al. 2003).

Pflanze	Eigenschaften	Anzahl notifizierter Feldversuche
Mais	Herbizid- und Insektenresistenz	132
	Herbizidresistenz und männliche Sterilität	29
Raps	Herbizidresistenz und männliche Sterilität	114
	Änderung des Fettsäurenmetabolismus und industrieller Nutzen	22
	Herbizid- und Pilzresistenz	8
Zuckerrübe	Herbizid- und Virusresistenz	24

Tabelle 29: Gemüse – Versuche mit transgenen Sorten, die zwischen 1997 und 2003 entweder in den USA oder in der EU durchgeführt worden sind. Die mit einem Stern gekennzeichneten Gene sind Markergene (nach USDA 2003a, JRC 2003, RKI 2003).

Pflanze	Gentechnische Veränderung (Quelle des Gens)	Zweck der Veränderung	Hersteller	Land und Jahr
Aubergine	CryIIIA (Btt)	Insektenresistenz	Rutgers University	USA 1999
Aubergine	Bacteropsin (Halobacterium halobium) Glucoseoxidase (A. niger) B-glucuronidase* NptII*	Pilzresistenz (Phytophthora; Verticillium)	Rutgers University	USA 1997
Aubergine	Bt-derived	Insektenresistenz	Istituto Sperimentale per l'Orticultura	Italien 1997
Aubergine	Tryptophan-2-Monooxygenase	Metabolische Veränderung	Istituto Sperimentale per l'Orticultura	Italien 1998
Broccoli	Cry (Bt) Speicherprotein	Insektenresistenz und Metabolische Veränderung	Department of Plant Production Applied Plant-Biotechnology Group	Finnland 1999
Broccoli	CBI (CBI) NptII*	Insektenresistenz	Seminis Vegetable Seeds	USA 1999
Broccoli	PAT (Strep. Hygroscopicus) Barnase (Bacillus amyloliquefaciens)	Herbizidresistenz (Glufofinat) und männl. Sterilität	American Takii	USA 1998
Erbse	CBI (CBI) CBI*	Herbizidresistenz (Glyphosat)	Seminis Vegetable Seeds	USA 1999
Erbse	Doppelstrang Ribonuclease (Schizosaccharomyces pombe) NptII*	Virusresistenz (PEMV; BYMV)	University of Idaho	USA 2001
Erbse	Hüllprotein (PEMV) NptII*	Virusresistenz (PEMV)	University of Idaho	USA 1998
Erbse	Alpha-Amylase	Enzymproduktion und Herbizidresistenz (Glufofinat)	Institut für Pflanzengenetik und Kulturpflanzenforschung, Gatersleben	Deutschland 1999
Gurke	C-repeat binding factor (Arabidopsis) NptII*	Erhöhte Salztoleranz	Michigan State University	USA 2002
Gurke	CBI (CBI) NptII*	Virusresistenz (CMV; PRSV; WMV2; ZYMV)	Seminis Vegetable Seeds	USA 1998
Gurke	CBI (CBI) NptII*	Herbizidresistenz (Glyphosat)	Seminis Vegetable Seeds	USA 1999
Karotte	Cysteine Proteinase Inhibitor (Augenbohne) NptII	Nematodenresistenz (Root-knot)	Harris Moran	USA 2001
Karotte	CBI (CBI) NptII*	Pilzresistenz (Alternaria daucii)	Seminis Vegetable Seeds	USA 1997
Karotte	ohne Angaben	Lagerungseigenschaften	Bejo Zaden BV	Niederlande 1999
Kohl	ohne Angaben	Lagerungseigenschaften	Bejo Zaden BV	Niederlande 1999
Kohl	Mannose-spezifisches Lektin	Insektenresistenz	Bejo Zaden BV	Niederlande 1998
Kopfsalat	Translationinitiationsfaktor 5A; antisense (Kopfsalat) NptII*	Änderung der Seneszenz	Harris Moran	USA 2002
Kopfsalat	Ferritin (Sojabohne) NptII*	Erhöhter Eisengehalt	Harris Moran	USA 2002
Kopfsalat	CBI (CBI)	Herbizidresistenz (Glyphosat)	Seminis Vegetable Seeds	USA 1998
Kopfsalat	Oxalatoxidase (Weizen) NptII*	Pilzresistenz (Sclerotinia)	Harris Moran	USA 1999
Kopfsalat	CBI (CBI) NptII*	Erhöhte Wachstumsrate	Seminis Vegetable Seeds	USA 2000
Kopfsalat	CBI (CBI) NptII*	Mehr Chlorophyll	Seminis Vegetable Seeds	USA 2000
Kopfsalat	ohne Angaben	Veränderung der Blattmorphologie	Consiglio Nazionale delle Ricerche	Italien 2000
Kopfsalat	Nitrate Reduktase	Verringerte Nitratmenge	INRA	Frankreich 1996

Tabelle 30: Früchte – Beispiele von Versuchen mit transgenen Sorten, die zwischen 1997 und 2003 entweder in den USA oder in der EU durchgeführt worden sind. Die mit einem Stern gekennzeichneten Gene sind Markergene (nach USDA 2003a, JRC 2003, RKI 2003).

Pflanze	Gentechnische Veränderung (Quelle des Gens)	Zweck der Veränderung	Hersteller	Land und Jahr
Apfel	ACC-Synthase; antisense (Apfel) NptII*	Veränderter Ethylen-metabolismus	Cornell University	USA 2003
Apfel	Polyphenoloxidase; antisense (Apfel) NptII*	Pilzresistent (Fruchtfäule)	Cameron Nursery	USA 2002
Apfel	S-adenosylmethionine Transferase (E. coli) NptII*	Veränderte Fruchtreife	Exelixis	USA 2001
Apfel	Sorbitol 6-Phosphodehydrogenase (Apfel) B-Glucuronidase* NptII*	Veränderter Zuckergehalt	University of California	USA 1999
Apfel	CryIA(c) (Btk) NptII*	Insektenresistenz	Dry Creek	USA 1999
Apfel	Leafy homeotic regulatory gene (Arabidopsis) NptII*	Veränderte Blühzeit	University of California	USA 1998
Apfel	Ohne Angaben	Pilzresistenz	Plant Research International	Belgien 2002
Apfel	Ohne Angaben	induction of self-fertilization induction of self-incompatibility mechanism	Katholieke Universiteit Leuven, Faculteit Landbouwkundige en Toegepaste Biologische Wetenschappen	Belgien 2003
Apfel	Hordothionin	Pilzresistenz	Centrum voor Plantenveredelings- en Reproductieonderzoek	Niederlande 1998
Apfel	rol-Genprodukt	Veränderte Wurzelbildung	Plant Research International - Dept. Genetics and Breeding	Niederlande 2002
Birne	S-adenosylmethionin Transferase (Bacteriophage T3) NptII*	Veränderte Fruchtreife	Exelixis Agritope	USA 2000
Birne	Cecropin (Hyalophora cecropia) NptII*	Pilzresistenz (Feuerbrand)	ARS	USA 2000
Dattel	Choline Oxidase Sorbitol Synthase (Apfel) NptII* B-glucuronidase*	Kältetoleranz und Trockentoleranz	University of California/Davis	USA 1999
Dattel	CryIA(c) (Bt) NptII*	Insektenresistenz	University of California	USA 1999
Erdbeere	CBI (CBI)	Herbizidresistenz (Glyphosat)	DNA Plant Tech	USA 1999
Erdbeere	CBI (CBI) Acetolactatsynthase*	Veränderte Blühzeit	DNA Plant Tech	USA 2000
Erdbeere	CBI (CBI) Cetolactatsynthase*	Verspätete Enthärtung	DNA Plant Tech	USA 1999
Erdbeere	B-glucuronidase (Tabak) Chitinase (Bohne) NptII*	Pilzresistenz (Colletotrichum)	Louisiana State University	USA 2000
Erdbeere	CBI (CBI) Acetolactatsynthase*	Pilzresistenz (Botrytis cinerea resistant; Fusarium resistant; Verticillium dahliae resistant)	DNA Plant Tech	USA 1999
Erdbeere	Ohne Angaben	Induktion parthenokarper Früchte	UNIVERSITA' ANCONA Dipartimento di biotecnologie agrarie e ambientali	Italien 2002

Fortsetzung Tabelle 30

Pflanze	Gentechnische Veränderung (Quelle des Gens)	Zweck der Veränderung	Hersteller	Land und Jahr
Erdbeere	Osmotin PR-Protein	Pilzresistenz	Università degli Studi della Tuscia Dipartimento di Produzione Vegetale	Italien 1998
Erdbeere	rol-Genprodukt	Veränderte Wurzelbildung	Dipartimento di Biotecnologie agrarie e ambientali - Università degli Studi di Ancona	Italien 1998
Erdbeere	Pektatlyase	Veränderte Reife	University of Málaga Dpt. of Biology	Spanien 1998
Wilde Erdbeere	Tryptophan-2-Monooxygenase	Veränderte Fruchtreife	Dipartimento di Biotecnologie agrarie e ambientali	Italien 1999
Himbeere	Tryptophan-2-Monooxygenase	Veränderte Fruchtreife	Dipartimento di Biotecnologie agrarie e ambientali	Italien 1999
Grapefruit	HüllproteinCTV) NptII*	Virusresistenz (Closterovirus)	Texas A&M	USA 1999
Grapfruit	Synthetic binding peptide to Xanthomonas (Synthetisch) B-glucuronidase* Green fluorescent protein* NptII*	Bakterienresistenz (Citrus canker resistant)	Integrated Plant Genetics	USA 2000
Kirsche	rol-Genprodukt	Wurzelbildung	Università degli Studi della Tuscia	Italien 1998
Kiwi	Osmotin pathogenesis related proteins	Pilzresistenz	Università degli Studi della Tuscia	Italien 1998
Kiwi	rol-Genprodukt	Wurzelbildung	Università degli Studi della Tuscia	Italien 1998
Pflaume	ACC-Oxidase; antisense (Prunus sp.) NptII*	Veränderte Ethylenproduktion	ARS	USA 1999
Weintraube	CBI (CBI)	Verbesserte Fruchtqualität	Anton Caratan & Son	USA 2000
Weintraube	β-Glucuronidase (Erbse) NptII*	Pilzresistenz (Echter Mehltau)	New York State University /Geneseo	USA 1999
Weintraube	Lignan Biosynthese Protein (Erbse)	Pilzresistenz (Echter Mehltau)	New York State University /Geneseo	USA 1999
Weintraube	Antimikrobielles Peptid PGL (Amaranthus caudatus) Antimikrobielles Peptid PGL (Synthetisch)	Pilzresistenz (Mehltau; Edelfäule) und Herbizidresistenz (Glufosinat)	Cornell University	USA 2001
Weintraube	Tryptophan-2-Monooxygenase	Veränderte Fruchtreife	Dipartimento di Biotecnologie agrarie e ambientali - Università degli Studi di Ancona	Italien 1999
Weintraube	Ohne Angaben	Virusresistenz (grapevine fanleaf nepovirus)	INRA Station de Recherches vigne et vin de Colmar	Frankreich 1999
Weintraube	Chitinase Glucanase Ribosomales inaktivierendes Protein	Pilzresistenz	Bundesanstalt für Züchtungsforschung an Kulturpflanzen - Institut für Rebenzüchtung Geilweilerhof	Deutschland 1998

Tabelle 31: Glyphosatresistenz – Beispiele von transgenen Pflanzen, die zwischen 1998 und 2003 in den USA oder in der EU im Freiland getestet wurden (nach USDA 2003a, JRC 2003, RKI 2003).

Pflanze	Hersteller	Freigesetzt seit
USA		
Alfalfa	Monsanto	2000
Erdbeere	DNA Plant Tech	2000
Erbse	Seminis Vegetable Seeds	1999
Gurke	Seminis Vegetable Seeds	2000
Kopfsalat	Seminis Vegetable Seeds	1998
Mais (Glyphosat + Isoxacole)	Aventis (Bayer CropScience)	2000
Reis	Monsanto	1998
Rübe	Beta Seeds	1998
Tomate	Seminis Vegetable Seeds	1998
Weizen	Monsanto	2000
Zwiebel	Seminis Vegetable Seeds	2001
EU		
Futtermübe	Monsanto	Frankreich 1999
Futtermübe	Danisco Seed	Belgien 1999
Raps	Monsanto	Frankreich 1999
Raps	Pioneer (DuPont)	Deutschland 1999
Soja (+Isoxaflutole)	Aventis (Bayer CropScience)	Frankreich 2000
Soja	Monsanto	Frankreich 1999
Zuckerrübe	KWS Saat AG	Belgien 2000
Zuckerrübe	Novartis Seeds (Syngenta)	Belgien 2000

Tabelle 32: Glufosinatresistenz – Beispiele von transgenen Pflanzen, die zwischen 1998 und 2003 in den USA oder in der EU im Freiland getestet wurden (nach USDA 2003a, JRC 2003, RKI 2003).

Pflanze	Hersteller	Freigesetzt seit
USA		
Baumwolle	Dow	USA 2000
Pfefferminz	Purdue University	USA 2003
Tomate	Aventis (Bayer CropScience)	USA 2000
Weizen	ARS	USA 2001
Zuckerrohr	ARS	USA 2000
EU		
Acker-Rettich	INRA	Frankreich 2001
Chicorée	Warcoing SA	Belgien 2002
Erbse (+Stärkemetabolismus)	Istituto Sperimentale per la Cerealicoltura - Sezione Operativa Periferica di Foggia	Deutschland 1999
Kartoffel	AgrEvo (Bayer CropScience)	Deutschland 2000
Reis	Institut de Recerca i Tecnologia Agroalimentàries (IRTA)	Spanien 2001
Reis (+Bt-Resistenz)	ALMO S.r.l. Università Cattolica S. Cuore	Italien 2001
Schwarzer Senf	Aventis	Belgien 2000
Weizen (+Pilzresistenz)	Istituto Sperimentale per la Cerealicoltura - Sezione Operativa Periferica di Foggia	Italien 2002
Weizen (durum)	Istituto Sperimentale per la Cerealicoltura - Sezione Operativa Periferica di Foggia	Italien 1999
Zuckerrübe	AgrEvo (Bayer CropScience)	Spanien 1999

Tabelle 33: Insektenresistenz – Beispiele von Versuchen mit transgenen Pflanzen, die zwischen 1997 und 2003 entweder in den USA oder in der EU durchgeführt worden sind. Die mit einem Stern gekennzeichneten Gene sind Markergene (nach USDA 2003a, JRC 2003, RKI 2003).

Pflanze	Transgen (Quelle des Gens)	Resistenz gegen	Hersteller	Land und Jahr
USA				
Aubergine	CryIIIA(Bt) B-Glucuronidase*	Kartoffelkäfer	Rutgers University	USA 1997
Grapefruit	Agglutinin (Schneeglöckchen) NptII*	Blattlaus	Texas A&M	USA 1999
Kartoffel	Proteinase Inhibitor I (Reis) CryIIIA (Bt) NptII*	Käfer	New Mexico State University	USA 2000
Kartoffel	Proteinase Inhibitor I (Reis) CryIIIA (Bt) NptII*	Käfer	New Mexico State University	USA 2000
Kartoffel	Cry V (Bt)	Käfer; Schmetterlinge	Michigan State U	USA 2001
Kartoffel	CryIIA (Bt) Hüllprotein (PVY) B-Glucuronidase* NptII*	Kartoffelkäfer; PVY	Monsanto	USA 1998
Kartoffel	CryIIA (Bt) NptII*	Käfer; Schmetterlinge	Michigan State University	USA 2003
Kartoffel	CryIIIA (Bt) Hüllprotein (PVY) Replikase (PLRV)	Käfer; Viren	Monsanto	USA 1999
Mais	Cry1F (Bt) CBI (CBI) PAT *	Schmetterlinge	Dow	USA 2001
Mais	Cry1F (Bt) PAT *	Schmetterlinge	Pioneer	USA 2001
Mais	Cry9C (Bt)	Schmetterlinge	Great Lakes Hybrids	USA 1998
Mais	CryIIA (Bt) NptII*	Schmetterlinge	Monsanto	USA 1997
Papaya	Agglutinin (Schneeglöckchen)	Zikaden	Hawaii Agriculture Research Ce	USA 2002
Peanut	CryIA(c) (Bt) HPT *	Schmetterlinge	University of Georgia	USA 2000
Raps	CryIA(c) (Bt) NptII* Green fluorescent protein* (Aequorea victoria)	Schmetterlinge	University of Georgia	USA 2002
Reis	CryIIIA (Bt)	Käfer	Louisiana State University	USA 1999
Rübsen	CryIA(c) (Bt) HPT *	Schmetterlinge	University of North Carolina	USA 2000
Sonnenblume	Cry1F (Bt)	Schmetterlinge	Pioneer	USA 2000
Walnuss	CryIA (Bt) B-glucuronidase* NptII*	Schmetterlinge	ARS	USA 1997
Zuckerrohr	Agglutinin (Schneeglöckchen)	Blattlaus	ARS	USA 2001/2002
EU				
Aubergine	Cry (Bt)	Ohne Angaben	Istituto Sperimentale per l'Orticultura	Italien 1999
Baumwolle	Cry (Bt) Cysteinproteinase-Inhibitor Serinprotease-Inhibitor	Ohne Angaben	CIRAD-CA	Frankreich 1998
Baumwolle	Cry (Bt)	Ohne Angaben	Delta and Pine Land Co. Monsanto Company Monsanto Hellas Ltd	Griechenland 1998
Brinjal-Aubergine	Cry (Bt)	Ohne Angaben	Metapontum Agrobios Srl	Italien 2000
Broccoli	Cry (Bt) Speicherprotein Lysinsynthese	Ohne Angaben	Department of Plant Production Applied plant-biotechnology group	Finnland 1999

Fortsetzung Tabelle 33

Pflanze	Transgen (Quelle des Gens)	Resistenz gegen	Hersteller	Land und Jahr
Kartoffel	Cysteinproteinase-Inhibitor Serinprotease-Inhibitor Grün fluoresz. Protein (jellyfish)	Ohne Angaben	University of Leeds	Grossbritannien 1998
Kartoffel	Cry (Bt)	Ohne Angaben	Metapontum Agrobios Srl	Italien 2000
Kartoffel	Cry (Bt)	Ohne Angaben	Monsanto	Niederlande 1999
Kohl	Mannose spezifisches Lektin	Ohne Angaben	Bejo Zaden BV	Niederlande 1998
Mais	Cry (Bt)	Ohne Angaben	Aventis CropScience N.V.	Belgien 2002
Mais	Cry (Bt)	Ohne Angaben	ADVANTA France	Frankreich 1998
Mais	Cry (Bt)	Ohne Angaben	KWS AG	Frankreich 1998
Mais	Cry (Bt)	Ohne Angaben	Limagrain Genetics Grandes Cultures SA	Frankreich 1998
Mais	Cry (Bt)	Ohne Angaben	Monsanto	Frankreich 1998
Mais	Cry (Bt)	Ohne Angaben	Syngenta	Frankreich 2003
Raps	Cry (Bt)	Ohne Angaben	Metapontum Agrobios	Italien 2000
Reis	Cry (Bt)	Ohne Angaben	ALMO S.r.l. Università Cattolica S. Cuore	Italien 2001
Reis	Kunitz-Protease-Inhibitor	Ohne Angaben	ALMO Srl Università Cattolica S. Cuore	Italien 1998
Reis	Cry (Bt)	Ohne Angaben	Cirad-Amis Programme BIOTROP	Frankreich 1999
Reis	Cry (Bt)	Ohne Angaben	Institut de Recerca i Tecnologia Agroalimentàries (IRTA)	Spanien 2002

Tabelle 34: Virusresistenz – Beispiele von Versuchen mit transgenen Pflanzen, die zwischen 1997 und 2003 entweder in den USA oder in der EU durchgeführt worden sind. Die mit einem Stern gekennzeichneten Gene sind Markergene (nach USDA 2003a, JRC 2003, RKI 2003).

Pflanze	Transgen (Quelle des Gens)	Resistenz gegen	Hersteller	Land und Jahr
USA				
Erbse	Doppelstrang Ribonuklease: (Schizosaccharomyces pombe)	BYMV	University of Idaho	USA 2000
Gurke	CBI (CBI) NptII*	PRSV, WMV2, CMV, ZYMV	Seminis Vegetable Seeds	USA 1998
Kartoffel	Replikase (PLRV) NptII*	PLRV	ARS	USA 2000
Kartoffel	Hüllprotein (TRV) NptII*	TRV	University of Idaho	USA 2001
Soja	Hüllprotein (BPMV) B-glucuronidase* Hygromycin phosphotransferase*	BPMV	University of Kentucky	USA 2000
Süßkartoffel	Hüllprotein (SPFMV) NptII* CBI*	SPFMV	Monsanto	USA 1999
Tomate	CBI (CBI) CBI*	CMV	BHN Research	USA 2000
Tomate	CBI (CBI) NptII*	PVY	BHN Research	USA 2000
Weizen	Doppelstrang Ribonuklease: (Schizosaccharomyces pombe) PAT*	WSMV BYDV	University of Idaho	USA 1997
Weizen	Hüllprotein (WSMV) PAT*	WSMV	University of Idaho	USA 1998
Zuckerrohr	Hüllprotein (SrMV) PAT*	SrMV	ARS	USA 2001
Zuckerrübe	CBI (CBI) CBI*	BNYVV	Syngenta	USA 2002
EU				
Kartoffel	Ohne Angaben	TRV, PMTV	Swedish University of Agricultural Sciences	Schweden 1999
Kartoffel	Ohne Angaben	PVY, PMTV	DLF-Trifolium A/S Dansk Planteforædling v/ Gorm Palmgren	Dänemark 1999
Kartoffel	Ohne Angaben	PVY	INRA	Frankreich 2000
Kürbis	Ohne Angaben	CMV, ZYMV, WMV	Peto Italiana Srl	Italien 1997
Melone	Ohne Angaben	WMV	Tézier SA Groupe Limagrain	Spanien 1997
Tomate	Ohne Angaben	CMV	Istituto Sperimentale per la Patologia Vegetale di Roma	Italien 1998
Tomate	Ohne Angaben	TSWV	Istituto Sperimentale per l'Orticoltura	Italien 1999
Weinrebe	Ohne Angaben	GFLV	INRA	Frankreich 1999
Zuckerrübe	Ohne Angaben	BNYVV	SES Europe SA/NV	Belgien 2002
Zuckerrübe	Ohne Angaben	BNYVV	ADVANTA France	Frankreich 2000
Zuckerrübe	Ohne Angaben	BNYVV	Planta	Deutschland 1997

Abkürzungen: BYDV: Barley yellow dwarf virus; BNYVV: Beet necrotic yellow vein virus; BPMV: Bean pod mottle virus; BYMV: Bean yellow mosaic virus; GFLV: Grapevine fanleaf nepovirus; PMTV: Potato mop-top virus; PVY: Potato virus Y; SPFMV: Sweetpotato feathery mottle virus; SrMV: Sorghum mosaic virus; TRV: Tobacco rattle virus; TSWV: Tomato spotted wilt virus; WMV: Watermelon mosaic virus; WSMV: Wheat streak mosaic virus; ZYMV: Zucchini yellow mosaic virus.

Tabelle 35: Pilzresistenz – Beispiele von Versuchen mit transgenen Pflanzen, die zwischen 1997 und 2003 entweder in den USA oder in der EU durchgeführt worden sind. Die mit einem Stern gekennzeichneten Gene sind Markergene (nach USDA 2003, JRC 2003, RKI 2003).

Pflanze	Transgen (Quelle des Gens)	Resistenz gegen	Hersteller	Land und Jahr
USA				
Avocado	Defensin (<i>A. thaliana</i>) HPT*	Phytophthora, Verticillium	University of Florida	USA 2003
Gerste	Drug resistance protein (PDR5) (<i>Saccharomyces cerevisiae</i>) PAT *	Fusarium		

Fortsetzung Tabelle 35

Pflanze	Transgen (Quelle des Gens)	Resistenz gegen	Hersteller	Land und Jahr
Reis	Ohne Angabe	Pilzresistenz Herbizidresistenz (Glufosinat)	Istituto Sperimentale per la Cerealicoltura - Sezione Operativa Periferica di Foggia	Italien 2002
Sonnen- blume	Oxalatoxidase	<i>Sclerotinia sclerotiorum</i>	Pioneer Genetique	Frankreich 2001
Wein- traube	Chitinase Glucanase ribosomal inactivating protein	Ohne Angabe	Bundesanstalt für Züchtungsforschung an Kulturpflanzen	Deutschland 1998
Weizen	Ohne Angabe	Fusarium	Syngenta	GB 2002
Weizen	Ohne Angabe	Ohne Angabe	Istituto Sperimentale per la Cerealicoltura - Sezione Operativa Periferica di Foggia	Italien 2002
Zucker- rübe	Antimikrobielles Protein	Ohne Angabe	A. Dieckmann - Heimburg	Deutschland 1999

Tabelle 36: Bakterienresistenz – Beispiele von Versuchen mit transgenen Pflanzen, die zwischen 1997 und 2003 entweder in den USA oder in der EU durchgeführt worden sind. Die mit einem Stern gekennzeichneten Gene sind Markergene (nach USDA 2003, JRC 2003, RKI 2003).

Pflanze	Transgen (Quelle des Gens)	Resistenz gegen	Hersteller	Land und Jahr
USA				
Apfel	B-glucuronidase* NptII* Lysozyme (Huhn) Attacin E (Hyalophora cecropia)	Feuerbrand	Cornell University	USA 1998
Apfel	Cecropin (Hyalophora cecropia) NptII*	Feuerbrand	ARS	USA 2000
Birne	Cecropin (H. cecropia) NptII*	Feuerbrand	ARS	USA 2000
Kartoffel	Antibacterial protein D4E1 (synthetisch) NptII*	Erwinia carotovora	ARS	USA 2001
Kartoffel	Antibacterial peptide D2A2 (CBI) NptII*	Erwinia carotovora	ARS	USA 1998
Reis	Thionin (Gerste) HPT* PAT *	Pyricularia oryzae Rhizoctonia solani Burkholderia glumae Xanthomonas oryzae	Louisiana State University	USA 2001
Reis	Npr1 (Arabidopsis) HPT*	Xanthomonas oryzae	University of California	USA 2002
Tomate	Bs2 (Pfeffer) NptII*	Xanthomonas campestris	University of Florida	USA 2000
Tomate	Serine-Threonin Proteinkinase (Tomate) NptII*	Bacterial speck	Boyce Thompson Institute	USA 1999
Zuckerrohr	Lysozym (Kuh)	Clavibacter	Texas A&M	USA 1998
Zuckerrohr	Cecropin (H. cecropia) NptII*	Clavibacter	Texas A&M	USA 1998
EU				
Kartoffel	Ohne Angaben	Ohne Angaben	Plant Research International	Niederlande 2001
Kartoffel	T4 Lysozym	Ohne Angaben	Bundesanstalt für Züchtungsforschung an Kulturpflanzen	Deutschland 1998
Kartoffel	Pektatlyase	Ohne Angaben	Bundesanstalt für Züchtungsforschung an	Deutschland 1997

			Kulturpflanzen	
--	--	--	----------------	--

Tabelle 37: Abiotischer Stress – Beispiele von Versuchen mit transgenen Sorten, die zwischen 1997 und 2003 entweder in den USA oder in der EU durchgeführt worden sind. Die mit einem Stern gekennzeichneten Gene sind Markergene (nach USDA 2003, JRC 2003, RKI 2003).

Pflanze	Gentechnische Veränderung (Quelle des Gens)	Zweck der Veränderung	Hersteller	Land und Jahr
USA				
Gurke	<i>C repeat binding factor</i> (<i>A. thaliana</i>) NptII*	Salztoleranz	Michigan State University	USA 2002
Mais	CBI (CBI) CBI*	Kältetoleranz	Monsanto	USA 2002
Mais	CBI (CBI) NptII*	Trockentoleranz	Monsanto	USA 2000
Raps	<i>Cold regulated gene binding factor</i> (CBF) (<i>A. thaliana</i>) NptII*	Kältetoleranz	Mendel Biotechnology	USA 2001
Tomate	Hitzeschockprotein (Tomate) NptII*	Hitzetoleranz	Purdue University	USA 2002
Weizen	<i>Late embryogenesis abundant protein</i> (Gerste) PAT*	Trockentoleranz	Kansas State University	USA 2001
EU				
Kartoffel	Levansucrase	Trockentoleranz	Istituto per l'Agrometeorologia e l'Analisi Ambientale Applicata all'Agricoltura (IATA - CNR)	Italien 1997
Kartoffel	Ohne Angaben	Änderung der Stärkesynthese und Stresstoleranz und Virusresistenz (potato leafroll virus)	MPI für Züchtungsforschung	Deutschland 2000
Kartoffel	Ohne Angaben	Stresstoleranz	Max-Planck-Institut für Molekulare Pflanzenphysiologie	Deutschland 1999
Mais	Ohne Angaben	Trockentoleranz und Herbizidresistenz (Glufosinat)	Biogemma	Frankreich 2001
Mais	Ohne Angaben	Stresstoleranz und Herbizidresistenz (Glufosinat)	Biogemma	Frankreich 2000
Mais	Superoxid Dismutase	Stresstoleranz	Coop de Pau	Frankreich 1997
Reis	CBI	Stresstoleranz	Institut de Recerca i Tecnologia Agroalimentàries (IRTA) Institut de Recerca i Tecnologia Agroalimentàries (IRTA); CropDesign N.V.	Italien 2003
Tomate	Levansucrase	Trockentoleranz	Sementi Nunhems Srl	Italien 1996
Zuckerrübe	Levansucrase	Trockentoleranz	Van der Have France	Frankreich 1996

Tabelle 38: Nutritionally enhanced products being developed by biotechnology (Monsanto 2003b).

Product	Benefit	Status
Enhanced vitamins/minerals		
Golden Rice	Provides beta carotene in the main food staple consumed by Asians	In development by IRRI in the Philippines
Golden Mustard	Provides beta carotene in a locally familiar vegetable oil for East Indians	In development in India
High tocopherol vegetable oils	Provides alpha tocopherol	Proof of concept established
High iron rice	Over-expression of soybean ferritin increased iron content 2-3 fold	In development, animal feeding trials have been reported
High iron/low phytate rice	Combination of high iron content, coupled with phytase and over-expression of cysteine-rich protein to enhance iron absorption	Proof of concept established
High mineral grains	Staples with enhanced levels of essential minerals, eg. Calcium, zinc and iron.	Research phase
High vitamin C strawberries	Enhanced levels of Vitamin C	Research phase
Enhanced vegetable oils		
High laurate canola	Provides a vegetable oil with enhanced levels of lauric acid to serve as a substitute for tropical oils in certain food applications	Commercialized by Monsanto
High oleic vegetable oils	Provides a vegetable oil with more heart healthy fatty acid profiles, reduces saturated fatty acids, reduces need for hydrogenation and reduces trans fatty acids	Soybean oil – DuPont developed and commercialized Palm oil – in development in Malaysia Cottonseed – in development by CSIRO, Australia
High stearate vegetable oils	Reduced need for hydrogenation and generation of trans fatty acids	Cottonseed – in Development by CSIRO, Australia Soybean oil – in development by Iowa State University and USDA Canola oil – proof of concept by Monsanto
High omega-3 vegetable oil	Provides a vegetable oil source of SDA as the in vivo precursor of EPA.	In development by Monsanto
Saturated fatfree vegetable oil	Canola with more heart-healthy fatty acid profile	Proof of concept established by Monsanto
MCFA	Canola with medium chain fatty acids for nutritional and medical applications	Proof of concept established by Monsanto
Enhanced carbohydrates and protein		
High fructan beets	Oligosaccharides are associated with gastrointestinal benefits	Proof of concept established
Protein enhanced potato	Nutritional quality of potato protein for Indian consumers	In development by Jawaharal N Nehru University
Protein enhanced sweet potato	Protein amount and quality enhanced	Proof of concept established
High lysine potato	Enhanced protein quality	Proof of concept established

High protein rice	Expression of soybean protein in rice to enhance protein quality	In development
-------------------	--	----------------

Fortsetzung Tabelle: 38

Product	Benefit	Status
Enhanced functional components		
Rice with human milk proteins	Provide infant formula with immunity enhancing proteins found in human milk	Proof of concept established
High phytosterol vegetable oil	Provide a source of cholesterol-lowering plant sterols	Proof of concept established
High lycopene tomatoes	Lycopene has been associated with cancer risk reduction	Proof of concept established
High flavonoids tomatoes	Flavonoids are anti-oxidants associated with cardiovascular disease risk reduction	Proof of concept established
High isoflavone soybeans	Isoflavones have been associated with reduction in blood cholesterol and possibly other health benefits	Proof of concept established
Reduced undesirable components		
Reduced caffeine tea	Eliminates the decaffeination process	Research phase
Reduced allergen peanuts	Reduce peanut protein which are among the most potent food allergens and can provoke anaphylaxis in sensitive people.	Research phase
Reduced allergen wheat	Reduce wheat protein which provoke allergic reactions in sensitive people	Research phase
Reduced allergen potato	Modifying the allergenic protein in potato would reduce the risk of allergic reaction among sensitive people.	Research phase
Reduced allergen soy	The P34 allergenic protein in soy is silenced via antisense technology	In development by DuPont
Reduced polyphenol oxidase in potatoes	By reducing expression of this enzyme in potatoes, bruising upon exposure to air is reduced	In development by CSIRO
Reduced raffinose soy	By reducing the content of raffinose in soy, the undesirable gastrointestinal side effects may be reduced	In development by Monsanto

Tabelle 39: Veränderte Stärkezusammensetzung – Beispiele von Versuchen mit transgenen Pflanzen, die zwischen 1997 und 2003 entweder in den USA oder in der EU durchgeführt worden sind (nach USDA 2003, JRC 2003, RKI 2003).

Pflanze	Gentechnische Veränderung (Quelle des Gens)	Zweck der Veränderung	Hersteller	Land und Jahr
USA				
Baumwolle	Sucrosephosphatynthase (Spinat) NptII*	Mehr Ertrag	Texas Tech U	USA 1999
Mais	AGP (E. coli) PAT*	Mehr Stärke	Biogemma	USA 2002
Mais	Sucrosesynthase (Mais) PAT*	Veränderte Stärkemenge	University of Florida	USA 1999
Mais	Stärkesynthase(Mais) PAT*	Veränderter Stärkemetabolismus	University of Florida	USA 2002
Mais	Verzweigungsenzym (TB1) (Weizen) Stärkesynthase (Weizen) PAT *	Veränderter Stärkemetabolismus	Biogemma	USA 2002
Mais	CBI (CBI) CBI*	Erhöhte Stärkemenge	Exseed Genetics (BASF)	USA 2000
Reis	AGP (Mais)	Mehr Ertrag	Louisiana State U	USA 2001
Reis	CBI (CBI) CBI*	Erhöhte Stärkemenge	BASF	USA 2002
Reis	CBI (CBI) PAT*	Carbohydrate metabolism altered	Aventis	USA 2000
Tomate	Sucrosephosphatsynthase (Mais) NptII*	Verändertes Fruchtzuckerprofil	BHN Research	USA 2002
Weizen	AGP (E. coli) Dihydropteroatsynthase*	Mehr Ertrag	Biogemma	USA 2003
Weizen	AGP (Mais) AGP (Kartoffel) PAT*	Mehr Ertrag	Montana State University	USA 2003
Weizen	Invertase (Mais)	Mehr Ertrag	Montana State University	USA 2003
EU				
Chicorée	sucrose:sucrose Fructosyltransferase	Fruktanbildung	S.A. Florimond Desprez VEUVE & Fils	Frankreich 2000
Kartoffel	Ohne Angaben	Erhöhter Sucrosegehalt	The National Institute of Agricultural Botany	GB 2000
Kartoffel	Ohne Angaben	Veränderung der Stärkezusammensetzung	Advanced Technologies (Cambridge) Ltd	GB 2001
Kartoffel	Ohne Angaben	Fruktansynthese	Federal Biological Research Centre for Agriculture and Forestry	Deutschland 2001
Kartoffel	Ohne Angaben	Fruktansynthese	Max-Planck-Gesellschaft	Deutschland 1998
Kartoffel	AGP	Änderung der Stärkebiosynthese	Meijer Seedpotatoes & Research BV	Niederlande 1998
Kartoffel	Glukogenbiosynthese	Änderung der Amylopektinstruktur	Amylogene HB	Schweden 1999
Kartoffel	Ohne Angaben	Veränderter Amylosegehalt	Plant Science Sweden AB	Schweden 2002
Mais	Ohne Angaben	Veränderter Amylosegehalt	Biogemma	Spanien 2000
Tomate	Ohne Angaben	Erhöhter Ertrag	Nestle R&D Center SA	Spanien 1998
Weizen	Glycogen-Verzweigungsenzym	Änderung der Amylopektinstruktur	Compañía Navarra Productora de Semillas	Spanien 1998
Weizen	Ohne Angaben	Veränderung des Sucrosegehaltes	IACR - Long Ashton Research Station - University of Bristol	GB 2002
Zuckerrübe	Invertase	Verändertes Hexose/Sucrose-Verhältnis	Van der Have France	Frankreich 1997
Zuckerrübe	Ohne Angaben	Fruktansynthese	Istituto per l'Agrometeorologia e l'Analisi Ambientale Applicata all'Agricoltura (IATA)	Italien 1998

Tabelle 40: Biopharmazeutika – Beispiele von transgenen Pflanzen, die Biopharmazeutika exprimierten (nach Daniell et al. 2001).

Potentielle Anwendung	Exprimiertes Protein	Transgene Pflanze
Antikoagulans	Menschliches Protein C	Tabak
Thrombininhibitor	Menschliches Hirudin	Raps
Neutropenia	Granulozyten-Makrophagen-Kolonie stimulierender Faktor	Tabak
Wachstumshormon	Menschliches Somatotropin	Tabak
Anämie	Menschliches Erythropoetin	Tabak
Wundheilung	Menschliches Epidermalwachstum	Tabak
Hepatitis C und B	Menschliches Interferon	Reis, Tabak, Rübsen
Leberzirrhose	Menschliches Serum Albumin	Tabak
Blutersatz	Menschliches Hämoglobin	Tabak
Kollagen	Menschliches Kollagen	Tabak
Zystische Fibrose	Menschliches α -1-Trypsin	Reis
Transplantationen	Menschliches Aprotinin	Mais
Antimikrobiell	Menschliches Laktoferrin	Kartoffel
Bluthochdruck	Angiotensin-umwandelndes Enzym	Tabak, Tomate
Gaucher's Krankheit	Glucocerebrosidase	Tabak

Tabelle 41: Essbare Impfstoffe – Beispiele von transgenen Pflanzen, die in der Entwicklung stecken (nach Daniell et al. 2001).

Impfstoff gegen	Exprimiertes Protein	Transgene Pflanze
Enterotoxische E. coli	Hitze-labiles Toxin B-Untereinheit	Tabak, Kartoffel, Mais
Vibrio cholerae	Cholera Toxin B-Untereinheit	Kartoffel
Hepatitis B	Oberflächenprotein der Hülle	Tabak, Kartoffel, Salat, Lupine
Norwalk Virus	Kapsidprotein	Tabak, Kartoffel
Tollwut	Glykoprotein	Tomate
Cytomegalovirus	Glykoprotein B	Tabak
Maul- und Klauenseuche	VP1	Alfalfa
Transmissibles Gastroenteritis Virus (TGE) beim Schwein	Glykoprotein S	Tabak
TGE beim Schwein	Glykoprotein S	Mais