Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

25 Jahre BMBF-Forschungsprogramme zur biologischen Sicherheitsforschung

Umweltwirkungen gentechnisch veränderter Pflanzen

Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

25 Jahre BMBF-Forschungsprogramme zur biologischen Sicherheitsforschung

Umweltwirkungen gentechnisch veränderter Pflanzen

Wissensbasis für einen verantwortungsvollen Umgang mit gentechnisch veränderten Pflanzen

Prof. Dr. Johanna Wanka
Bundesministerin für Bildung und Forschung

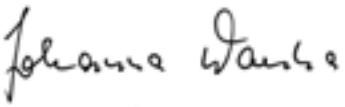
Wirtschaftliche Produktion und ökologische Nachhaltigkeit miteinander in Einklang zu bringen, ist eines der wichtigsten globalen Zukunftsthemen. Angesichts knapper Ressourcen und wachsender Weltbevölkerung ist die Ernährung von etwa 9 Milliarden Menschen im Jahr 2050 und ihre Versorgung mit biogenen Rohstoffen eine entscheidende Zukunftsaufgabe. Der Fortschritt in Technologie und Wissenschaft eröffnet uns dafür große Chancen.

Die Nationale Forschungsstrategie BioÖkonomie-2030 hat das Ziel, eine ressourcenschonende und nachhaltige bio-basierte Wirtschaft aufzubauen. Der Pflanzenforschung und -züchtung fällt dabei eine Schlüsselrolle zu: Gentechnische Verfahren können dazu beitragen, Herausforderungen, vor denen Züchter und Landwirte heute stehen, besser zu bewältigen. So können Pflanzen beispielsweise besser an Trockenheit oder versalzene Böden angepasst werden.

Die Grüne Gentechnik ist heute weltweit etabliert und wird in knapp 30 Ländern genutzt. In Deutschland und auch in anderen europäischen Ländern wird die Grüne Gentechnik seit vielen Jahren kontrovers diskutiert. Viele Menschen treibt die Sorge um mögliche Auswirkungen auf die Umwelt um. Nur eine unabhängige und ergebnisoffene Forschung ist in der Lage, diese wichtige Frage zu beantworten.

Die Sicherheit von Mensch, Tier und Umwelt muss bei der Anwendung der Grünen Gentechnik höchste Priorität haben. Daher hat das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) seit 1987 Forschungsvorhaben mit einem Volumen von mehr als hundert Millionen Euro finanziert, die mögliche Auswirkungen des Anbaus gentechnisch erzeugter Pflanzen auf die Umwelt untersuchen. Diese Projekte tragen dazu bei, Grüne Gentechnik verantwortungsvoll und im Sinne des Vorsorgeprinzips nutzen zu können.

Diese Broschüre fasst die Ergebnisse der in der BMBF-Maßnahme „Biologische Sicherheitsforschung“ geförderten Forschungsprojekte beispielhaft zusammen und zeigt deren Vielfalt und Komplexität auf. Ich danke den beteiligten Forscherinnen und Forschern für ihre engagierte Arbeit. Den Ergebnissen ihrer Forschung wünsche ich breite Beachtung in der öffentlichen Diskussion.



25 Jahre BMBF-geförderte biologische Sicherheitsforschung – was wurde erreicht?

Prof. Dr. Joachim Schiemann
Julius Kühn-Institut (JKI),
Direktor des Instituts für die Sicherheit biotechnologischer Verfahren bei Pflanzen

Die grundlegende Aufgabe der biologischen Sicherheitsforschung ist es, den Erkenntnisstand zu sicherheitsrelevanten Zusammenhängen bei gentechnisch veränderten Organismen (GVO) ständig zu erweitern. Damit werden Sicherheitsbewertung und -management der zuständigen Behörden kontinuierlich an den Stand der Forschung angepasst und mögliche Risiken von GVO können identifiziert und reduziert werden[1]. Ohne Zweifel kann hier die deutsche Forschung dem internationalen Vergleich standhalten. Die an der Sicherheitsforschung beteiligten Forschungseinrichtungen spiegeln die Vielfalt der deutschen Forschungslandschaft wider: Hoch- und Fachhochschulen, Institute der Bundesressortforschung, der Max-Planck- und Fraunhofer-Gesellschaft sowie der Leibniz- und Helmholtz-Gemeinschaft. Die Arbeiten wurden auf einem qualitativ hohen Niveau ausgeführt. Versuchsplanung, -durchführung und -auswertung waren statistisch abgesichert und die Ergebnisse damit aussagekräftig. Zuweilen war es schwierig, Arbeiten, bei denen keine negativen Umwelt-Effekte von GVO festgestellt wurden, in hochrangigen Fachzeitschriften zu publizieren. Die Vielzahl der dennoch publizierten Daten hat aber verdeutlicht: Mit den bisher ins Freiland gebrachten GVO waren keine Gentechnik-spezifischen Risiken verbunden. Die Themen und Ergebnisse zahlreicher Projekte wurden aktuell, sachlich-neutral und anschaulich im Internet kommuniziert[2]. Dies könnte beispielgebend auch für andere Forschungsbereiche sein.

Die Ergebnisse der BMBF-geförderten Sicherheitsforschung werden auch durch Forschungsarbeiten in europäischen Nachbarländern bestätigt. Der im August 2012 veröffentlichte Schlussbericht des Schweizer Nationalen Forschungsprogramms „Nutzen und Risiken der Freisetzung gentechnisch veränderter Pflanzen“ (NFP 59)[3] kommt zu dem Schluss, dass bei den mehrjährigen Forschungsarbeiten keine spezifischen Gesundheits- oder Umweltrisiken der Grünen Gentechnik festgestellt wurden. In Anbetracht dieser Ergebnisse stellt sich daher die Frage, ob sich die Sicherheitsbewertung von Pflanzen in Zukunft verstärkt an den neu eingeführten Eigenschaften einer Sorte orientieren sollte und nicht daran, ob die Herstellung dieser Pflanzen mit konventionellen, biotechnologischen oder gentechnologischen Züchtungsverfahren erfolgt ist. „Somit erweist sich eine Sonderbehandlung gentechnisch veränderter Pflanzen aus wissenschaftlicher Sicht zunehmend als fragwürdig“, so ein Zitat aus dem NFP 59-Abschlussbericht.

Auch eine Zusammenfassung der Ergebnisse der Europa-weit geförderten Sicherheitsforschung liegt seit 2010 vor[4]. Aus den 130 Forschungsprojekten, die in den letzten 25 Jahren mit insgesamt 300 Millionen Euro von der EU gefördert wurden, zog die EU-Kommission das Fazit, dass Gentechnik an sich keine größeren Risiken als konventionelle Methoden der Pflanzenzüchtung birgt. Für die EU-Forschungskommissarin waren diese Ergebnisse eine Bestätigung, dass gentechnisch veränderte Nutzpflanzen einen positiven Beitrag zur Verbesserung der landwirtschaftlichen Produktion und der globalen Lebensmittelsicherheit leisten könnten.

Wie geht es nun mit der biologischen Sicherheitsforschung weiter? Zurzeit werden drei große Forschungsprojekte zur biologischen Sicherheit von GVO von der EU-Kommission gefördert: AMIGA (Assessing and Monitoring the Impacts of Genetically Modified Plants on Agro-ecosystems)[5] untersucht die möglichen ökologischen und ökonomischen Auswirkungen beim Anbau von GVO in Europa. Das 2012 gestartete Projekt GRACE (GMO Risk Assessment and Communication of Evidence)[6] hat sich zum Ziel gesetzt, einen umfassenden Überblick über die wissenschaftliche Datenlage zur Risiko- und Nutzenbewertung von gentechnisch veränderten Pflanzen und daraus hergestellten Lebens- und Futtermitteln zu liefern. Hierbei werden nicht nur Daten zu Umwelt- und gesundheitlichen Aspekten, sondern auch zu den sozioökonomischen Auswirkungen von GVO analysiert und systematisiert. Im 7. Forschungsrahmenprogramm der EU begann 2013 ein Projekt zur Etablierung eines GMO ERA-NET[7], das zu einer stärkeren Koordinierung nationaler Forschungsprojekte auf EU-Ebene führen soll. Schließlich finden

alle zwei Jahre die Internationalen Symposien zur biologischen Sicherheitsforschung (ISBGMO) statt, bei denen die Forschungsergebnisse zur Sicherheit von bio- und gentechnologisch erzeugten Pflanzen auf internationaler Ebene diskutiert werden. Das 13. Symposium wird im November 2014 in Kapstadt stattfinden.

Ein aus meiner Sicht sehr wichtiges Ergebnis der national geförderten biologischen Sicherheitsforschung ist die Unterstützung der wissenschaftsbasierten Sicherheitsbewertung durch die Europäische Behörde für Lebensmittelsicherheit (EFSA)[8]. Die nationalen Aktivitäten haben durch die Bereitstellung von relevanten Forschungsdaten, die Ausbildung von Experten und durch einen effektiven Informationsaustausch zur kompetenten Arbeit dieser Behörde beigetragen. In den letzten Jahren konnte so ein solider Bewertungsprozess für gentechnisch veränderte Pflanzen und daraus hergestellte Produkte etabliert und weiterentwickelt werden. Die Sicherheitsbewertung basiert dabei auf einer langjährigen Erfahrung mit der akzeptierten Nutzung und der Biologie der jeweiligen Kulturpflanzen sowie auf Prüfmethoden in den Bereichen Analytik, Toxikologie, Ernährung und Umwelt. Dies hat ein international anerkanntes Niveau von Sicherheit für den Verbraucher und die Umwelt geschaffen.

In einem im Februar 2013 veröffentlichten Beitrag[9] unterstreicht Prof. Anne Glover, Chief Scientific Adviser des Präsidenten der Europäischen Kommission, die Bedeutung der EFSA für eine evidenzbasierte Sicherheitsbewertung: „Jetzt, im Jahr 2013 mit mehr Forschung im Bereich der GVO-Technologie als in irgend einem anderen Gebiet der Lebensmittelforschung, gibt es keine Hinweise, die nahe legen würden, dass die GVO-Technologie im Vergleich zu jeder anderen Technologie der Pflanzenzüchtung per se irgendein spezifisches Risiko bergen würde. (...) Unsere Pflicht als Bürger ist es, die vorliegenden Beweise zur Kenntnis zu nehmen und die Courage zu besitzen, unsere Auffassungen zu revidieren, wenn sich die Beweise häufen."

[1] Inge Broer und Joachim Schiemann (2009). Thesenpapier „Biologische Sicherheitsforschung an gentechnisch veränderten Pflanzen"
[2] bioSicherheit – Gentechnik – Pflanzen – Umwelt (www.biosicherheit.de)
[3] Nutzen und Risiken der Freisetzung gentechnisch veränderter Pflanzen, Nationales Forschungsprogramm NFP 59 (www.nfp59.ch)
[4] Europäische Kommission, Generaldirektion für Forschung und Innovation (2010). A decade of EU-funded GMO research (2001-2010)
[5] Amiga. Assessing and Monitoring the Impacts of Genetically Modified Plants on Agro-Ecosystems (www.amigaproject.eu)
[6] GRACE. GMO Risk Assessment and Communication of Evidence (www.grace-fp7.eu)
[7] PreSto GMO ERA-Net (www.presto-gmo-era-net.eu)
[8] Europäische Behörde für Lebensmittelsicherheit (www.efsa.europa.eu)
[9] Anne Glover (2013). Is there opportunity in risk and uncertainty? Leitartikel, EPSO Newsletter, Februar 2013 (www.epsoweb.org/file/1225)

Auf der Suche nach einer neuen Kultur der Debatte

Christian Dürnberger
Philosoph und Kommunikationswissenschaftler,
Hochschule für Philosophie München und Institut Technik-Theologie-Naturwissenschaften (TTN) an der Ludwig-Maximilians-Universität München

Biologische Sicherheitsforschung findet sich in einer paradoxen Grundsituation wieder. Zum einen erfüllt sie ein gesellschaftliches Bedürfnis: Sie prüft an konkreten Szenarien viel diskutierte Risiken einer Technologie und stellt ihre Resultate – beispielsweise auf der Website bioSicherheit.de – transparent und in einer für den interessierten Bürger verständlichen Art und Weise dar. Zum anderen finden die Erkenntnisse der Sicherheitsforschung gentechnisch veränderter Pflanzen jedoch nur bedingt Niederschlag in der gesellschaftlichen Auseinandersetzung wie auch in den politischen Entscheidungsprozessen. Im Besonderen nimmt die Öffentlichkeit die Risiken der Grünen Gentechnik als bedrohlicher wahr als es die Ergebnisse der biologischen Sicherheitsforschung tatsächlich nahelegen würden.

Es zeigt sich, dass Sicherheitsgefühl und Risikowahrnehmung keineswegs nur auf der naturwissenschaftlichen Erkenntnislage zu Wahrscheinlichkeit und Ausmaß eines etwaigen Schadens basieren, vielmehr spielen dabei übergeordnete Wertvorstellungen und kulturelle Leitbilder eine zentrale Rolle. In der Risikorhetorik, wie sie die öffentliche Diskussion prägt, äußert sich demnach ein Unbehagen, das sich aus angrenzenden Fragen speist. Etwa: Wie begegnet man der technischen Dynamik unserer Gesellschaft? An welchen Vorstellungen von Landwirtschaft und Natur orientieren wir uns?

Was bedeutet dies nun für die biologische Sicherheitsforschung? Für ihre eigentliche Forschungsarbeit: nichts. Zwar kann und soll – wie bei jeder wissenschaftlichen Tätigkeit – kritisch über Verbesserungen der Methoden und der Versuchdesigns diskutiert werden, der Kern der Arbeit aber bleibt unberührt: Es braucht schlicht Wissen über etwaige Auswirkungen von gentechnisch veränderten Pflanzen auf die Umwelt. Um der skizzierten Breite der Debatte gerecht zu werden, ist diese Forschung jedoch in ihren Kontext zu setzen. Naturwissenschaftliche Argumente allein können die Debatte nicht schultern und sind hinsichtlich einer Befriedung der Kontroverse auch nur bedingt resonanzfähig. Europa ist daher auf der Suche nach einer neuen Kultur der Debatte über gentechnisch veränderte Organismen: In der Diskussion sind verschiedenste sozioökonomische Kriterien, wenngleich dies ein heikles Unterfangen ist. Im Kontext der gesetzlich regulierten Zulassungsentscheidung von gentechnisch veränderten Pflanzen können sie keinen Platz haben, da eine Zulassungsentscheidung nicht an unbestimmte Kriterien geknüpft werden darf. Doch die Öffnung der Diskussion ist grundsätzlich zu begrüßen: Nicht nur etwaige Risiken sind zu diskutieren, sondern auch Fragen der sozialen Auswirkungen oder der vorhandenen Bedürfnisse. Aus ethischer Perspektive ist dabei der oftmals vorgetragenen Darstellung zu widersprechen, mit den sozioökonomischen Kriterien kämen nun auch endlich ethische Aspekte in der Debatte zu Wort; vielmehr beruht auch die „klassische“ Biologische Sicherheitsforschung immer schon auf ethischen Überzeugungen (etwa auf der Wertschätzung der Biodiversität).

Gilt es ein Zwischenfazit unter die Sicherheitsbewertung gentechnisch veränderter Pflanzen zu ziehen, so zeigt sich, dass diese Forschung im Spannungsfeld von Wissenschaft, Gesellschaft und Politik stattfindet und damit zentrale Fragen berührt, die weit über ihr eigentliches Forschungsgebiet hinausgehen. Die Politik wäre daher gut beraten, etwaige Entscheidungen im Kontext der Biotechnologie als Resultat einer politischen Willensbildung deutlich kenntlich zu machen. Auf der anderen Seite sind die Wissenschaften – nicht nur die Biologie und andere Naturwissenschaften, sondern auch ausdrücklich weitere Disziplinen wie Soziologie und Ethik – dazu aufgefordert, sich an der neuen Debattenkultur zu beteiligen.

BMBF Forschungsförderung: 25 Jahre biologische Sicherheitsforschung bei gentechnisch veränderten Pflanzen 9

BMBF research funding: 25 years of biological safety research on genetically modified plants 9

Ist Bt-Mais so sicher wie konventioneller Mais? 14

Fallbeispiel 1: Schmetterlinge. Bt-Wirkung im Labor, keine Gefahr im Freiland 16

Fallbeispiel 2: Honigbienen. Stress durch Bt-Mais? 18

Ergebnisse im Überblick: Bt-Mais und seine Umweltwirkungen 20

Biokunststoffe aus der Knolle: Die Cyanophycin-Kartoffel 23

Ausbreitungsverhalten von gentechnisch verändertem Raps 27

Pilzresistente Gerste: Nebenwirkungen auf nützliche Bodenpilze? 30

Feuerbrand-resistente Bäume: Werden nützliche Bakterien verdrängt? 33

Übertragung neuer Gene: Höhere Genauigkeit und möglichst ohne Markergene 36

Fremdgene „unter Verschluss“ 39

Glossar 42

Wissenschaftliche Veröffentlichungen 47

BMBF Forschungsförderung: 25 Jahre biologische Sicherheitsforschung bei gentechnisch veränderten Pflanzen

BMBF research funding: 25 years of biological safety research on genetically modified plants

Der Anbau gentechnisch veränderter Pflanzen in der Landwirtschaft und deren Nutzung als Lebens- oder Futtermittel ist ein seit Jahren in Politik und Gesellschaft kontrovers diskutiertes Thema. Bei diesen Pflanzen wird, im Gegensatz zu konventionell oder mittels moderner Züchtung erzeugten Pflanzen, das Erbgut durch Einfügung geeigneter Gene bzw. Genabschnitte gezielt verändert. Neben ethischen Aspekten sind die möglichen Auswirkungen dieser sogenannten Grünen Gentechnik auf Mensch, Tier und Umwelt zentrale Fragestellungen des öffentlichen Diskurses.

Um Sorgen und Vorbehalten vieler Bürgerinnen und Bürger gegenüber der Nutzung der Grünen Gentechnik Rechnung zu tragen, die Debatte über gentechnisch veränderte Pflanzen zu versachlichen und auf eine wissenschaftlich begründete Basis zu stellen, hat das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) 1987 eine Fördermaßnahme für eine begleitende biologische Sicherheitsforschung bei gentechnisch veränderten Pflanzen aufgelegt.

Ziel war es, den Erkenntnisstand zu sicherheitsrelevanten Zusammenhängen bei der Nutzung gentechnisch veränderter Pflanzen zu erweitern und die biologische Sicherheitsbewertung kontinuierlich an den Stand der Forschung anzupassen. Die Ergebnisse sollten dabei helfen, mögliche Risiken von gentechnisch veränderten Pflanzen für die Umwelt zu identifizieren. Die Bundesregierung wollte damit auch die notwendigen Voraussetzungen schaffen, dass Gesellschaft und Politik die Chancen und Risiken der Grünen Gentechnik vorurteilsfrei und auf Grundlage wissenschaftlicher Fakten bewerten können. Dabei griffen die Projekte der Sicherheitsforschung wissenschaftlich nachvollziehbare Einwände und Befürchtungen auf, die in der öffentlichen Debatte um die Grüne Gentechnik thematisiert wurden. Um einen hohen Grad an Transparenz zu erzielen,

Agricultural cultivation of genetically modified (GM) crops and their use in food and feed has been a controversial subject of political and public debate for years. Unlike conventionally bred plants, or plants developed using modern breeding methods, GM plants have had genes or gene segments added to their genome to modify them in specific ways. Besides ethical aspects, the public debate has focused on the impacts of plant genetic engineering on humans, animals and the environment.

In 1987, in response to widespread public anxiety and concerns about the use of plant genetic engineering, and in order to bring more objectivity to the GM crops debate and place it on a scientific footing, the German Federal Ministry of Education and Research (BMBF) set up a funding programme for biosafety research in the area of GM crops.

The aim was to increase our knowledge about the safety aspects of using GM plants and to keep updating biosafety assessments in line with the latest research findings. The results were to be used to help identify potential environmental risks of GM plants. The German government hoped this would create the conditions necessary for the government and the public to assess the opportunities and risks associated with plant genetic engineering impartially and on the basis of scientific facts. Some of the biosafety research projects focused on scientifically plausible objections and fears that have emerged in the public debate about plant genetic engineering. In order to maximise transparency, the ministry organised a fact-based, constructive dialogue process to accompany the research, involving the key stakeholder groups and interested members of the public. As part of this process, the results of the BMBF-funded biosafety research were presented and discussed with a broad cross-section of society at public status seminars. In addition, in 2009 and 2010, the minis-

organisierte das Ministerium begleitend zu den Forschungsarbeiten einen sachorientierten und konstruktiven Dialog mit den maßgeblichen gesellschaftlichen Interessensgruppierungen und der interessierten Öffentlichkeit. Im Rahmen öffentlicher Statusseminare wurden so beispielsweise die Ergebnisse der BMBF-geförderten biologischen Sicherheitsforschung einer breiten Öffentlichkeit vorgestellt und diskutiert. Darüber hinaus initiierte das BMBF 2009 und 2010 die Veranstaltungsreihe „Runder Tisch zur Pflanzengenetik“, bei der Vertretern aus Politik, Wissenschaft, Wirtschaft, Verbänden und Kirchen ein diskursives Forum gegeben wurde, um Fragen der Nutzung und Weiterentwicklung der Grünen Gentechnik sachorientiert zu erörtern. Ein von allen beteiligten Akteuren getragener Konsens ist in so einem konfliktreichen Themengebiet wie der Grünen Gentechnik nur schwer herzustellen, doch konnten mit diesem Dialog der Sach- und Informationsstand verbessert und die Meinungsbildung in der Öffentlichkeit gefördert werden.

Die nach 25 Jahren biologischer Sicherheitsforschung vorliegenden Ergebnisse zeigen für den Anbau gentechnisch veränderter Pflanzen im Vergleich zu konventionell gezüchteten Pflanzen kein höheres Risiko für Umweltbeeinträchtigungen. Um die angesichts von Klimawandel und Bevölkerungswachstum drängenden gesellschaftlichen Herausforderungen nach einer ausreichenden Versorgung mit Nahrungsmitteln und nachwachsenden Rohstoffen für eine stoffliche und energetische Nutzung zu erfüllen, ist die Entwicklung einer nachhaltigen und produktiven Landwirtschaft ein wichtiges Ziel der Bundesregierung. So sollen in künftigen Fördermaßnahmen des BMBF Projekte gefördert werden, die die sozialen, ökonomischen und ökologischen Auswirkungen pflanzenzüchterischer Innovationen, ungeachtet der jeweils verwendeten Züchtungsmethode, im jeweils relevanten Anbausystem (z. B. ökologischer oder konventioneller Pflanzenbau) bewerten. Aus dieser verbesserten Wissensgrundlage können für den Landwirt faktenbasierte Entscheidungshilfen abgeleitet werden, die einen wichtigen Beitrag zur Bewertung der Vor- und Nachteile moderner Pflanzenzüchtung, unter anderem auch der Grünen Gentechnik, im jeweiligen Anbausystem leisten können.

try initiated a series of panel discussions on plant genetic engineering, which gave representatives from government, science, industry, associations and churches a discussion forum in which they could explore objectively issues relating to the use and further development of plant genetic engineering. Achieving a consensus among all the stakeholders in an area as conflict-ridden as plant genetic engineering is extremely difficult, but the dialogue process succeeded in improving the factual basis and information available, and helped shape public opinion.

The results of 25 years of biosafety research show no higher risk to the environment from the cultivation of GM crops than from conventionally bred plants. In view of climate change and population growth and the urgent challenge of providing sufficient food and renewable raw materials for manufacturing and power generation, developing a sustainable, productive agricultural sector is an important government objective. Future BMBF funding programmes will therefore support projects that assess the social, economic and ecological impacts of plant-breeding innovations within specific cultivation systems (e.g. organic or conventional farming), regardless of the breeding method used. This improved knowledge base can be used to develop fact-based decision-making aids for farmers – tools that can help farmers evaluate the advantages and disadvantages of modern plant-breeding methods (including genetic engineering) for the cultivation system in question.

Versuchsfeld mit gentechnisch verändertem Mais
Trial field with genetically modified maize

Fördermaßnahme Biologische Sicherheitsforschung

Bis heute hat das BMBF mit mehr als 100 Millionen Euro über 300 Vorhaben der biologischen Sicherheitsforschung gefördert, davon über 140 Projekte zur Sicherheitsbewertung gentechnisch veränderter Pflanzen. Seit 2000 wurden drei Forschungsprogramme ausgeschrieben, die sich ausschließlich auf gentechnisch veränderte Pflanzen fokussierten. Die Auswahl der vom BMBF geförderten Projekte erfolgte durch unabhängige, nationale und internationale Experten. Insgesamt haben sich über 60 Hochschulen und andere Forschungseinrichtungen an den Forschungsprojekten beteiligt.

Im Rahmen der geförderten Forschungsprojekte wurden neben Laborexperimenten auch zahlreiche Freilandversuche durchgeführt. Solche Freilanduntersuchungen sind für die biologische Sicherheitsforschung essenziell, weil mit Labor- und Gewächshausuntersuchungen die natürlichen Umweltbedingungen nicht vollständig simuliert werden können. Dazu zählen unter anderem die Einflüsse eines variablen Wettergeschehens auf die Testpflanzen wie auch Wechselwirkungen mit anderen Pflanzen und Tieren im Agrarökosystem. Im Vordergrund standen dabei in den letzten Jahren Freilandversuche mit gentechnisch veränderten Maislinien.

Die beteiligten Wissenschaftler analysierten aber auch das Umweltverhalten weiterer gentechnisch veränderter Kulturpflanzen wie Kartoffeln, Gerste, Zuckerrüben und Raps. Die ausgewählten Pflanzen wurden mit dem Ziel des landwirtschaftlichen Anbaus zur Nutzung beispielsweise als Lebens- oder Futtermittel entwickelt. Als solche zeigen sie keine spezifischen negativen Auswirkungen auf die Umwelt im Vergleich zu konventionell gezüchteten Pflanzen.

Die Forschungsthemen

Die vorliegende Broschüre präsentiert einen exemplarischen Überblick über die 2001 bis 2011 durchgeführten, BMBF-geförderten Forschungsarbeiten zum Umweltverhalten gentechnisch veränderter Pflanzen. Die daran beteiligten Wissenschaftler untersuchten vor allem, wie sich der Anbau gentechnisch veränderter Kulturpflanzen (insbesondere Mais, Kartoffeln, Getreide, Raps und ausgewählte

Funding for biosafety research

To date, the BMBF has invested over 100 million euros in more than 300 projects relating to biological safety research. Of these, more than 140 projects concerned risk assessments of GM plants. Since 2000, three research programmes have been put out to tender that focus exclusively on GM plants. The projects selected for BMBF funding were chosen by independent, national and international experts. More than 60 universities and other research institutes took part in the research projects.

Besides laboratory experiments, numerous field trials were conducted as part of the funded research projects. Field trials are essential for biosafety research because laboratory and greenhouse experiments cannot fully simulate natural environmental conditions. These include the impact of variable weather conditions on the test plants and interactions with other plants and animals in the agro-ecosystem. In recent years, the focus has been on field trials with GM maize lines.

However, the scientists involved in the trials also analysed the environmental behaviour of other GM crops, including potato, barley, sugar beet and oilseed rape. The selected plants were developed for agricultural purposes and were intended for use in e.g. food or feed. As such, they do not present any specific negative impacts for the environment compared with conventionally bred plants.

The research topics

This brochure presents an overview of the BMBF-funded research projects conducted between 2001 and 2011 on the environmental behaviour of GM crops, using a selection of sample projects. The scientists involved in the projects were primarily interested in how the cultivation of GM crops (particularly maize, potato, cereals, oilseed rape and selected woody plants and trees) affects the biodiversity of the agro-ecosystem and adjacent open spaces.

Wherever it was possible and relevant, the research projects included a comparison of GM plants with non-GM plants and traditional farming methods. So far, the projects have not found any scientific evidence that GM plants per se present a higher risk than conventionally bred crop plants. The research

Gehölze) auf die biologische Vielfalt im Agrarsystem und auf benachbarte Naturräume auswirkt.

Die Forschungsprojekte umfassten, wo immer dies möglich und relevant war, den Vergleich von gentechnisch veränderten Pflanzen mit nicht gentechnisch veränderten Pflanzen und mit traditionellen Agrartechniken. Die durchgeführten Projekte lieferten bisher keine wissenschaftlichen Belege dafür, dass gentechnisch veränderte Pflanzen *per se* ein höheres Risikopotenzial besitzen als konventionell gezüchtete Kulturpflanzen. Bei den Untersuchungen mit Bt-Mais stellte sich zwar heraus, dass bei dessen Anbau durchaus Umwelteffekte gemessen werden konnten. Diese lagen aber innerhalb des Spektrums, das auch bei den untersuchten konventionellen Sorten gefunden wurde. Das betraf etwa die Zusammensetzung der Mikroorganismengemeinschaften im Boden oder die Artenzusammensetzung der auf Maisfeldern anzutreffenden Insekten. Auch der Einfluss anderer Standortfaktoren wie Klima oder Bodenbeschaffenheit war in der Regel wesentlich größer als die gemessenen Umweltwirkungen der Bt-Maispflanzen. Ein höheres Risiko für Umweltbeeinträchtigungen zeigten die untersuchten Bt-Maispflanzen im Vergleich zu konventionellen Sorten demnach nicht.

Immer neue Fragestellungen für die biologische Sicherheitsforschung ergeben sich aus den vermehrt stattfindenden Entwicklungsarbeiten an transgenen Pflanzen mit neuen und veränderten Inhaltsstoffen zur Herstellung funktioneller Lebensmittel, verbesserter Futtermittel, industriell nutzbarer Stoffe und pharmazeutischer Substanzen. Bei einigen dieser gentechnisch veränderten Pflanzen ist es zum Beispiel unabdingbar, dass keine Auskreuzungen und Vermischungen mit Pflanzen der Lebens- und Futtermittelkette stattfinden. Sie müssen also biologisch – und manchmal auch physikalisch – abgeschottet, quasi eingeschlossen werden. Das BMBF hat zahlreiche Projekte gefördert, in denen Konzepte hierfür entwickelt und deren Verlässlichkeit überprüft wurden. Zu den sogenannten biologischen Einschlussmethoden gehören beispielsweise Verfahren, die dazu führen, dass die gentechnisch veränderten Pflanzen die neu eingeführten Gene nicht im Pollen enthalten. Eine Auskreuzung auf konventionelle Pflanzen über den Pollenflug wäre damit ausgeschlossen.

with Bt maize did find that cultivating this crop produced measurable environmental effects, but these fell within the same spectrum measured for the conventional varieties studied. They included the composition of micro-organism communities in the soil and the species composition of insects found in maize fields. Generally, the role played by other location factors, such as climate and soil composition, was greater than the environmental effects caused by the Bt maize plants. The Bt maize plants therefore did not pose a higher risk to the environment than conventional varieties.

As a result of the increasing efforts being devoted to developing transgenic plants with new and modified substances for the production of functional foods, improved animal feed, industrial materials and pharmaceutical ingredients, new biological research questions are emerging all the time. For instance, in the case of some of these GM plants, it is vital that they do not outcross or mix with plants in the food and feed chain. This means that they have to be biologically – and sometimes even physically – sealed off, or contained. The BMBF has funded a large number of projects that have developed and checked the reliability of containment concepts. Biological containment methods include techniques to ensure that the new gene is not contained in the pollen of GM plants. This excludes the possibility of the GM plants cross-pollinating with conventional plants.

In other projects, scientists developed new methods for inserting genes in a more targeted manner, i.e. at precisely defined locations in the genome. This makes it possible to minimise or exclude interactions with other genes within the plant, and minimise the risk of undesirable side-effects.

The large-scale cultivation of GM crops on farms has to be accompanied by monitoring programmes. This legally prescribed post-market monitoring is designed to identify any indirect, unexpected impacts of GM crops on the environment that may occur despite all the testing beforehand – impacts that may become visible only when the plant is grown on a large scale. Carrying out these monitoring activities is one of the conditions imposed on the plant producer when a GM plant is approved for cultivation. As part of the BMBF-funded biosafety research, various project groups developed and checked objectives, criteria and suitable methods for monitoring GM plants. The results are intended to help the

In weiteren Projekten entwickelten Wissenschaftler neue Methoden, mit denen sie Gene gezielter, das heißt an genau definierten Orten im Erbgut, einbauen können. So lassen sich Wechselwirkungen mit anderen Genen der Pflanze und unerwünschte Nebenwirkungen minimieren oder ausschließen.

Der großflächige Anbau gentechnisch veränderter Pflanzen in der landwirtschaftlichen Praxis muss durch Monitoringprogramme begleitet werden. Dieses gesetzlich vorgeschriebene anbaubegleitende Monitoring soll vor allem indirekte sowie unerwartete und erst im großflächigen Anbau erkennbare Auswirkungen gentechnisch veränderter Pflanzen auf die Umwelt erfassen, falls solche wider Erwarten und trotz aller vorherigen Tests auftreten sollten. Es ist Teil der Zulassungsauflagen für den Anbau von gentechnisch veränderten Pflanzen, dass die Hersteller der Pflanzen solche Monitoringmaßnahmen durchführen. Im Rahmen der BMBF-geförderten Sicherheitsforschung haben sich verschiedene Projektgruppen damit befasst, Zielsetzungen, Kriterien und geeignete Methoden für das Monitoring gentechnisch veränderter Pflanzen zu entwickeln und zu überprüfen. Die Ergebnisse sollen Genehmigungsbehörden dabei unterstützen, die von den Herstellern durchgeführten Monitoringmaßnahmen und die gelieferten Monitoringdaten zu bewerten.

Die an der BMBF-geförderten Sicherheitsforschung beteiligten Wissenschaftler publizieren ihre Ergebnisse in renommierten wissenschaftlichen Fachzeitschriften und stellen sich damit einer Überprüfung durch die internationale Wissenschaftsgemeinschaft. Darüber hinaus wird das gewonnene Wissen für die interessierte Öffentlichkeit zugänglich gemacht. Seit 2002 sind zum Beispiel allgemeinverständliche Hintergrundinformationen und Erläuterungen zu sämtlichen Projekten über das Internetportal bioSicherheit (www.biosicherheit.de) abrufbar. Darüber hinaus fanden zur Diskussion und Dokumentation der Projektergebnisse alle ein bis zwei Jahre Statusseminare statt, bei denen sich Wissenschaftlern und interessierter Öffentlichkeit Möglichkeiten zum aktiven Dialog boten.

In dieser Broschüre werden die Ergebnisse aus 25 Jahren geförderter Forschung zur biologischen Sicherheit von gentechnisch veränderten Pflanzen beispielhaft an Hand aussagekräftiger Projekte vorgestellt. Zur weiteren Information ist eine Liste mit einer Auswahl von Fachpublikationen am Ende der Broschüre beigefügt.

approval authorities assess the monitoring activities carried out by plant producers and evaluate the monitoring data they provide.

The scientists involved in BMBF-funded biosafety research publish their findings in prestigious scientific journals, which involves submitting their papers to a peer review by the international scientific community. In addition, the findings are accessible to interested members of the public. Since 2002, for instance, clearly written background information and explanations of all the projects have been available on the GMO Safety website (www.gmo-safety.eu). The project results were also discussed and documented every year or so at status seminars, which gave scientists and interested members of the public opportunities to take part in active dialogue.

This brochure presents the results of 25 years of BMBF-funded research into the biological safety of GM plants, using a selection of interesting projects as examples. A list of specialist publications containing further information is included at the end of the brochure.

Statusseminare boten Möglichkeiten zum Dialog zwischen der interessierten Öffentlichkeit und der Wissenschaft.
Status seminars provided opportunities for dialogue between interested members of the public and the scientific community.

Ist Bt-Mais so sicher wie konventioneller Mais?

Insektenresistenter Bt-Mais ist die einzige gentechnisch veränderte Pflanze, die bisher in Europa in nennenswertem Umfang angebaut wird. Bei der Diskussion um die Sicherheit von gentechnisch veränderten Pflanzen stand daher Bt-Mais im Mittelpunkt – auch in der Forschung. Seit mehr als zehn Jahren fördert das BMBF Forschungsprogramme, die mögliche ökologische Auswirkungen durch den Anbau dieser Pflanzen untersuchen. Über 20 Einzelprojekte beschäftigten sich vor allem mit der Frage, ob die in Bt-Mais enthaltenen Bt-Proteine nicht nur gegen Schädlinge wie den Maiszünsler wirken, sondern auch andere sogenannte Nicht-Zielorganismen im Maisfeld und seiner Umgebung gefährden könnten. Dazu zählen beispielsweise Regenwürmer, Käfer, Spinnen, Bienen und Schmetterlinge. Auch Bodenbakterien wurden in die Untersuchungen einbezogen.

In den Projekten wurden verschiedene Bt-Mais-Linien untersucht. Die Pflanzen enthielten entweder nur ein Bt-Protein, um sie gegenüber dem Maiszünsler oder dem Westlichen Maiswurzelbohrer resistent zu machen, oder gleich drei verschiedene Bt-Proteine. Dieser Bt-Mais war gegenüber beiden Schädlingen resistent.

Bei ihren Untersuchungen verfütterten die Wissenschaftler im Labor Bt-Mais (Pollen, Blätter) oder gereinigtes Bt-Protein an verschiedene Tiergruppen, die natürlicherweise in oder in der Nähe von Bt-Maisfeldern vorkommen. Ziel war es, herauszufinden, welche Tiere prinzipiell durch Bt-Proteine beeinträchtigt werden könnten.

Für die Untersuchungen wurden dabei sowohl Tierarten ausgewählt, die sich direkt von der Maispflanze ernähren, als auch räuberische Insekten, die erst über ihre Beutetiere indirekt mit Bt-Protein in Kontakt kommen. So wurden auch mögliche Auswirkungen von Bt-Mais auf die Nahrungsnetze berücksichtigt.

Bei einigen wenigen Tierarten, insbesondere verschiedenen Tagfaltern, konnte im Labor eine schädigende Wirkung des Bt-Proteins nachgewiesen werden. Die Wirkung auf Tagfalter war aufgrund der engen Verwandtschaft zum Maiszünsler – beide gehören zur Ordnung der Schmetterlinge – nicht überraschend.

Um aber die Frage zu beantworten, ob verschiedene Organismengruppen auch in einem Bt-Maisfeld gefährdet sind, führten die Wissenschaftler Feldversuche unter realistischen Bedingungen durch. Dazu wurden Bt-Mais und zum Vergleich verschiedene herkömmliche Maissorten angebaut. Um verschiedene Anbausysteme zu vergleichen, wurden von Beginn an auch die Auswirkungen von Insektizidbehandlungen auf die Biodiversität im Agrarökosystem einbezogen.

In mehrjährigen Untersuchungen verfolgten die Wissenschaftler die Häufigkeit und das Artenspektrum bestimmter Insekten in Maisfeldern und der direkten Umgebung. Auch die Konzentration von Bt-Proteinen im Boden und etwaige Auswirkungen auf Bodenmikroorganismen wurden überprüft. Es zeigte sich, dass Bt-Mais keine negativen Auswirkungen auf das Maisökosystem hat. Auch bei Tieren, die im Labor durch Bt-Protein beeinträchtigt wurden, konnte dies im Freiland nicht bestätigt werden. Die Bt-Konzentrationen liegen hier deutlich unterhalb der schädigenden Dosis.

Die Spritzung eines Insektizids hatte hingegen deutliche Auswirkungen auf die Insektendichte und die Artenvielfalt. Auch der Anbau unterschiedlicher konventioneller Maissorten sowie klimatische Einflüsse führten zu größeren Auswirkungen auf die Biodiversität im Maisfeld als der Anbau von Bt-Mais.

Die Forschungsarbeiten zum Einfluss von Bt-Mais auf Schmetterlinge und Bienen werden als zwei Fallbeispiele nachfolgend näher beschrieben.

Dr. Stefan Rauschen, Verbundprojektleiter der Bt-Maisversuche 2008-2011

„Unsere Ergebnisse decken sich mit den Resultaten internationaler Studien. Das ökologische Profil von Bt-Mais ist besser als das von herkömmlichen Maissorten, die mit chemischen Insektiziden behandelt werden."

Gentechnisch veränderter Mais

Mais ist eine der wichtigsten Nahrungspflanzen der Welt. Vor allem Schadinsekten bedrohen die Maisernten. Daher war eine der ersten gentechnischen Anwendungen in der Pflanzenzüchtung die Erzeugung von insektenresistenten Bt-Maispflanzen. Weitere Beispiele für gentechnische Züchtungen bei Mais sind Anpassungen an Klima- und Standortfaktoren, z. B. Trocken- und Salztoleranz, sowie Herbizidtoleranzen und neue Inhaltsstoffe zur Verbesserung der Eignung von Mais als Nahrungs- und Futtermittel. Eine trockentolerante gentechnisch veränderte Maispflanze wurde 2011 in den USA zugelassen.

Insektenresistenter Bt-Mais

Bt-Mais enthält ein oder mehrere insektizide Bt-Proteine. Die entsprechenden Gene stammen aus dem Bodenbakterium *Bacillus thuringiensis*, daher das Kürzel Bt. Im Gegensatz zu vielen chemischen Insektiziden sind Bt-Proteine für den Menschen und die meisten anderen Organismen harmlos und werden in der Umwelt schnell abgebaut. Daher werden sie auch im ökologischen Landbau als Insektizid eingesetzt.

Bt-Maispflanzen mit Resistenzen gegen die Schädlinge Maiszünsler und Maiswurzelbohrer werden seit über 15 Jahren kommerziell angebaut. Dieser Mais benötigt zum Schutz vor Schädlingen deutlich geringere Mengen an chemischen Insektiziden.

Der Maiszünsler, ein kleiner grau-brauner Schmetterling, ist ein bedeutender Maisschädling. Die Larven des Zünslers fressen sich im Verlauf der Vegetationsperiode durch den Stängel. Schon bei leichten Beanspruchungen knickt die so geschwächte Pflanze ab. Dies verursacht Ernteverluste von bis zu 50 Prozent. Der Maiszünsler ist zum Beispiel in allen südlichen und südöstlichen europäischen Maisanbaugebieten verbreitet. Er wandert kontinuierlich Richtung Norden und hat inzwischen die Ostseeküste erreicht.

Die Larven des Westlichen Maiswurzelbohrers, eines schädlichen Käfers, greifen die Wurzeln der Maispflanze an. Der Maiswurzelbohrer ist in Europa ein neuer Schädling, der 2007 erstmalig auch den Süden Deutschlands erreichte.

Bt-Mais auf einem Versuchsfeld

Die Larve des Maiszünslers in einem Maisstängel

Der Maiswurzelbohrer

In Regionen mit hohem Zünslerbefall hat Bt-Mais gegenüber anderen Bekämpfungsmethoden deutliche Vorteile: Er wirkt gezielt und effektiv. Der Landwirt kann auf den Einsatz von chemischen Pflanzenschutzmitteln sowie auch auf das Unterpflügen von Pflanzenresten zur Zünslerbekämpfung verzichten. Das bedeutet geringere Rückstände von chemischen Pflanzenschutzmitteln in der Umwelt und im Endprodukt sowie durch den teilweisen oder vollständigen Verzicht auf Pflügen eine deutliche Reduzierung von Bodenerosion.

Bt-Mais kann aber noch einen weiteren Vorteil für den Verbraucher und für Nutztiere haben: Eine geringere Belastung durch Pilzgifte (Mykotoxine). Über Fraßverletzungen, die von den Zünslerlarven hervorgerufen werden, können Erreger von Pilzkrankheiten in die Maispflanze eindringen. Einige dieser Pilze, etwa Fusarien, produzieren hochwirksame Gifte, welche die aus Mais hergestellten Futter- und Lebensmittel belasten. In mehreren Untersuchungen wurde bestätigt, dass Bt-Maispflanzen in der Regel weniger Mykotoxine aufweisen als herkömmliche Maispflanzen.

Gentechnisch veränderter Mais (hauptsächlich Bt-Mais) wurde 2011 weltweit auf rund 51 Millionen Hektar angebaut. Alleine in den USA, wo er seit 1995 für den Anbau zugelassen ist, beträgt die Anbaufläche mehr als 30 Millionen Hektar. In nennenswertem Umfang wird er zudem in Brasilien, Argentinien, Südafrika, Kanada und auf den Philippinen genutzt. In Südafrika dient der angebaute Bt-Süßmais direkt als Nahrung, in den meisten anderen Ländern wird der Bt-Mais hauptsächlich als Futtermittel verwendet.

In Europa ist der gegen den Maiszünsler wirksame Bt-Mais MON810 für den Anbau zugelassen. Angebaut wird er in nennenswertem Umfang allerdings nur in Spanien. 2011 wuchs in Spanien auf beinahe 100.000 Hektar Bt-Mais, das sind 26 Prozent der spanischen Maiserzeugung.

In Deutschland wurde zwischen 2005 und 2008 auf geringen Flächen (2008: ca. 3200 Hektar) Bt-Mais MON810 angebaut. Im April 2009 wurde der Anbau verboten.

Fallbeispiel 1: Schmetterlinge

Bt-Wirkung im Labor, keine Gefahr im Freiland

Ein Forschungsprojekt der RWTH Aachen beschäftigte sich mit der Frage, ob die Schmetterlingsarten „Kleiner Fuchs“ und „Tagpfauenauge“ durch den Anbau von gentechnisch verändertem Bt-Mais gefährdet sein könnten. Das Fazit nach drei Jahren Forschungsarbeit: Das Risiko für diese Schmetterlingsarten durch den untersuchten Bt-Mais ist vernachlässigbar gering.

Der in diesem Projekt untersuchte Bt-Mais bildet drei verschiedene Bt-Proteine, von denen zwei die Pflanze speziell gegen den Maiszünsler, eine schädliche Schmetterlingsart, schützen. Die naheliegende Frage war, ob auch andere Schmetterlingsarten durch den Bt-Mais geschädigt werden könnten. Gefährdet wären insbesondere die Raupen, die – anders als erwachsene Schmetterlinge – Blattmaterial fressen. Die Raupen leben zwar nicht direkt in Maisfeldern, da sie sich nicht von Mais ernähren. Aber sie können Bt-Maispollen aufnehmen, wenn dieser auf ihre Futterpflanzen in der Nähe von Bt-Maisfeldern geweht wird.

Für die Untersuchungen wurden die Schmetterlingsarten Kleiner Fuchs und Tagpfauenauge ausgewählt, da sie häufig in der Agrarlandschaft vorkommen und ihre Larven sich auch zur Zeit der Maisblüte entwickeln. Die Larven ernähren sich nur von einer Futterpflanze, der Brennnessel.

Empfindlichkeitstests im Labor

Um zu klären, wie empfindlich Kleiner Fuchs und Tagpfauenauge auf Bt-Maispollen reagieren, führten die Wissenschaftler im Labor Fütterungsexperimente mit Schmetterlingslarven aus eigener Zucht durch. Die Raupen wurden mit Brennnesselblättern gefüttert, auf denen sich jeweils eine bestimmte Menge Bt-Maispollen oder zur Kontrolle Pollen einer konventionellen Maissorte befand. Die Fraßaktivität, das Gewicht, die Entwicklungsdauer sowie die Sterblichkeit der Larven wurden protokolliert.

Bei 200 bis 300 Pollenkörnern pro Quadratzentimeter eines Brennnesselblattes zeigten sich erste Auswirkungen der Bt-Pollenkost. Die Tiere fraßen weniger. Bei 1000 Pollenkörnern pro Quadratzentimeter lag dann die Sterblichkeit deutlich höher im Vergleich zur Fütterung mit konventionellen Maispollen.

Mechthild Schuppener führte die Untersuchungen mit Schmetterlingen an der RWTH Aachen durch.

„Die Untersuchungen haben deutlich gemacht, dass das Risiko für die Schmetterlinge durch diesen Bt-Mais vernachlässigbar gering ist."

Exposition unter natürlichen Bedingungen

Im Freiland wurde überprüft, wie viel Maispollen unter natürlichen Bedingungen auf die Futterpflanzen der Schmetterlingsraupen gelangt und ob dies bedenkliche Mengen sind. Die Wissenschaftler stellten während der Maisblüte in unterschiedlichen Entfernungen zum Versuchsfeld Brennnesselpflanzen auf. Wie zu erwarten war, wurden unmittelbar am Feldrand in Windrichtung die höchsten Pollenmengen auf den Brennnesselblättern gefunden, maximal 212 Pollen pro Quadratzentimeter. Durchschnittlich fanden sich direkt am Feldrand auf den Brennnesselblättern 34 Pollen pro Quadratzentimeter – weit unterhalb der schädlichen Pollenkonzentration. Außerdem wurde geprüft, ob die untersuchten Schmetterlingsarten in der Nähe von Maisfeldern vorkommen. Dazu haben die Wissenschaftler die Nester dieser Schmetterlingsarten zur Zeit der Maisblüte in zwei verschiedenen Agrarlandschaften

Tagpfauenauge aus eigener Zucht

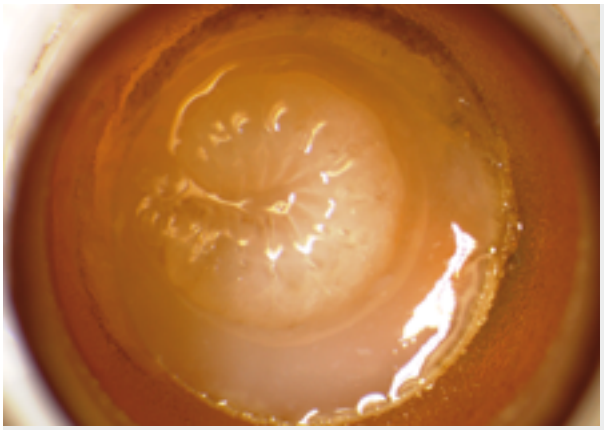
Im Labor wurden mit Schmetterlingsraupen Fütterungsexperimente durchgeführt.

In unterschiedlichen Entfernungen zum Mais-Versuchsfeld (Bild hinten) wurden Brennnesselpflanzen (Bild vorn) aufgestellt. Brennnesseln sind die „Futterpflanzen" für die Raupen des Tagpfauenauges.

Ein Großteil des Pollens, der auf den Futterpflanzen landet, bleibt offenbar nicht dort liegen, sondern wird durch den Wind heruntergeweht oder vom Regen abgewaschen. Außerdem lagert sich der meiste Pollen entlang der Blattrippen ab, die von den Larven nicht gefressen werden.

kartiert. Es zeigte sich, dass sich die Schmetterlingslarven zwar auch in der Nähe von Maisfeldern entwickeln, aber nur zum Teil während der Maisblüte. Dadurch kann nur ein Bruchteil der Schmetterlingsraupen überhaupt in Kontakt mit Bt-Maispollen kommen.

Die Pollenmengen, die im Labor zu ersten negativen Auswirkungen auf die Raupen führen, konnten im Freiland somit nur ausnahmsweise gefunden werden. Ausreichende Konzentrationen, die zu einer erhöhten Sterblichkeit führen, fanden die Wissenschaftler in keinem Fall.



Bienenlarve mit Maispollendiät

Fallbeispiel 2: Honigbienen

Stress durch Bt-Mais?

Die Bestäubungsleistung von Honigbienen ist ökologisch wie auch wirtschaftlich von großer Bedeutung. Entsprechend erheblich ist die Sorge über das seit einigen Jahren weltweit beobachtete Bienensterben. Bei der Suche nach den Ursachen geriet auch gentechnisch veränderter Bt-Mais stärker ins Blickfeld. Wissenschaftler der Universität Würzburg erprobten im Rahmen der biologischen Sicherheitsforschung eine Reihe neuer Methoden, um das Risiko gentechnisch veränderter Pflanzen für Honigbienen zuverlässig bewerten zu können. Ihr Fazit bislang: Bt-Mais ist kein Stressfaktor für Bienen.

Honigbiene sammelt Maispollen

Der in diesem Forschungsprojekt untersuchte Bt-Mais bildet drei verschiedene Bt-Proteine, die die Pflanzen gegenüber den Schädlingen Maiszünsler und Maiswurzelbohrer resistent machen.

In einem Versuch stellten die Würzburger Wissenschaftler Bienenvölker in Flugzelte. Diese standen entweder auf Parzellen mit Bt-Mais oder zum Vergleich auf Parzellen mit jeweils einer von drei verschiedenen konventionellen Maissorten. Die Bienen konnten nur den Pollen der jeweiligen Maissorte als Proteinquelle nutzen. Es wurde kein Einfluss von Bt-

Junge Bienen

Mais auf die Lebenserwartung von Bienen gefunden. Auch separate Fütterungsversuche mit ausgewachsenen Bienen und eine Untersuchung der Bienendärme im Labor auf Verdauungsaktivität ergaben keinerlei Hinweis auf eine akute oder chronische Toxizität von Bt-Maispollen für Honigbienen.

Um zu überprüfen, wie viel Maispollen unter realen Bedingungen in Bienenstöcke eingetragen wird, stellten die Wissenschaftler Bienenvölker in zwölf verschiedene Landschaftsräume. Diese unterschieden sich hinsichtlich des Anteils der Maisanbaufläche sowie der Verfügbarkeit alternativer Pollenquellen während der Maisblüte voneinander. Es zeigte sich, dass die Bienen Maispollen als Proteinquelle nutzen. Allerdings flogen sie für Maispollen nicht so weit wie für andere Pollenarten.

Doch mit diesen Ergebnissen gaben die Forscher sich noch nicht zufrieden. Wurde bisher der Einfluss von Bt-Mais vor allem bei erwachsenen Bienen untersucht, so entwickelten die Würzburger Wissenschaftler jetzt einen empfindlicheren Test mit im Labor gezüchteten Honigbienenlarven. Da die untersuchten Bt-Proteine vor allem Larvenstadien angreifen, sind Untersuchungen an Bienenlarven besonders aufschlussreich. Bei diesem Larventest werden die empfindlichen jungen Bienenlarven unter standardisierten Laborbedingungen mit künstlichem Futter aufgezogen. Pollen verschiedener herkömmlicher Maissorten und Bt-Maispollen wurden jeweils direkt in das Larvenfutter der Bienen gemischt. Im Vergleich zu den Kontroll-Maissorten zeigte der getestete Bt-Maispollen keinen negativen Einfluss auf das Überleben von Larven oder ihr Gewicht vor der Verpuppung. Auch die Verabreichung von reinem Bt-Protein, einzeln oder als Protein-Mix, führte zu keinem Effekt – selbst bei Dosierungen, die mehr als 100-mal höher lagen als die Bt-Dosierungen, die mit den Pollen aufgenommen werden können.

Einfluss von Bt-Mais auf gestresste Bienen

Aber wie steht es mit Bienen, die einer zusätzlichen Belastung ausgesetzt sind? Die Würzburger Wissenschaftler gingen dazu der Frage nach, ob Honigbienen durch eine Infektion zusätzlich gestresst werden, sodass sie in solchen Fällen negativ auf Bt-Proteine reagieren. Dazu untersuchten sie mit dem Erreger Nosema infizierte Bienen. Der Erreger löst bei den Tieren eine Darmerkrankung aus. Es konnten in ersten Experimenten jedoch keine Hinweise auf eine mögliche Wechselwirkung zwischen dem Darmparasiten und Bt-Wirkstoffen gefunden werden. Für eine umfassende Bewertung halten die Würzburger Wissenschaftler weitere Untersuchungen zur Nosemaproblematik für notwendig.

Dr. Stephan Härtel vom Lehrstuhl für Tierökologie und Tropenbiologie der Universität Würzburg ist wissenschaftlicher Mitarbeiter in dem Forschungsprojekt zu gentechnisch verändertem Bt-Mais.

„Wir konnten keinen Hinweis auf eine durch Bt-Maisernährung verursachte Schädigung von Honigbienen finden.“

Ergebnisse im Überblick: Bt-Mais und seine Umweltwirkungen

Insektenarten, die mit den Schädlingen Maiszünsler oder Maiswurzelbohrer eng verwandt sind

Bei diesen Arten können negative Auswirkungen des Bt-Proteins im Labor gefunden werden, da sie mit den Zielorganismen eng verwandt sind. Diese Ergebnisse lassen sich aber nicht auf alle gentechnisch veränderten Pflanzen übertragen.

Schmetterlinge

Das Tagpfauenauge und der Kleine Fuchs sind Schmetterlingsarten, die sich nicht von Mais ernähren, aber in der Nähe von Maisfeldern leben können. Sie können als Larve mit Bt-Maispollen in Kontakt kommen, wenn dieser auf ihre Futterpflanzen (Brennnesseln) geweht wird.
Bei Fütterungsversuchen im Labor mit Pollen von Bt-Mais reagierten solche Schmetterlingsarten auf hohe Dosen. Die Pollenmengen, die im Labor zu einer erhöhten Sterblichkeit der Schmetterlingslarven führten, kommen im Freiland aber nicht vor.

Laufkäfer

Laufkäfer jagen auf dem Boden lebende Insekten. Sie können mit dem Bt-Protein über ihre Beutetiere in Berührung kommen, wenn diese Maispflanzen gefressen haben.
In Freilandversuchen mit Bt-Mais und verschiedenen konventionellen Maissorten unterschieden sich Häufigkeit und Artenspektrum der Laufkäfer nicht in den verschiedenen Maisvarianten. Auch bei Fütterungsversuchen im Labor zeigte sich kein Bt-Effekt auf die Laufkäfer.

Blattkäfer

Blattkäfer kommen in der Umgebung von Maisfeldern vor. Sie können Bt-Maispollen aufnehmen, wenn er auf ihre Futterpflanzen geweht wird. Größere Mengen eines bestimmten Bt-Proteins wirkten sich negativ auf die Blattkäfer aus. Die im Freiland aufgenommene Bt-Proteinmenge liegt aber nach den Ergebnissen der Untersuchungen weit unterhalb einer schädlichen Dosis.

Andere oberirdisch lebende Nicht-Zielorganismen

Honigbienen

Bienen sammeln Pollen für die Aufzucht ihrer Larven und Jungbienen. Beim Anbau von Bt-Mais könnten sie auch Bt-Maispollen aufnehmen.
Eine Freilanduntersuchung zeigte, dass in der Agrarlandschaft Bienen Maispollen intensiv sammeln. In verschiedenen Fütterungsstudien im Labor und in Freiland-Zelten konnte aber kein schädigender Einfluss von Bt-Mais auf Honigbienen sowie auf ihre Larven festgestellt werden.

Maisökosystem: Gemeinschaft der Insekten und Spinnen

Die Gemeinschaft der Insekten im Maisfeld besteht aus Pflanzenfressern, die direkt Mais fressen (z. B. Thripse, Zikaden, Weichwanzen) und „Räubern“ (z. B. Spinnen, Blattlauslöwen, Marienkäfer), die sich von solchen Pflanzenfressern ernähren.
In mehrjährigen Freilandversuchen ergaben sich keine Hinweise darauf, dass Bt-Mais einen Einfluss auf die Häufigkeit und Artenvielfalt von Insekten und Spinnen hat. Im Vergleich mit verschiedenen konventionellen Maissorten zeigten sich vielmehr sortenbedingte Unterschiede sowie Schwankungen durch unterschiedliche Boden- und Witterungsbedingungen. Auch Insektizid-Behandlungen zeigten einen deutlichen Effekt auf verschiedene Insektengruppen.

Im Boden lebende Nicht-Zielorganismen

Trauermückenlarven, Springschwänze und Milben

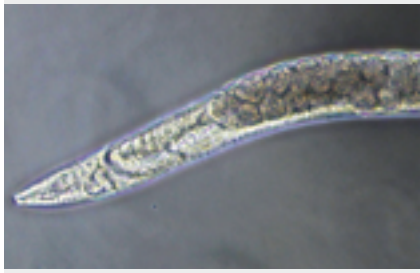
Diese Bodenbewohner zersetzen abgestorbenes Pflanzenmaterial. Dabei könnten sie auch Bt-Maisstreu aufnehmen.
Im Labor wurden bei Trauermückenlarven vereinzelt Reaktionen beobachtet, die sich aber nicht eindeutig auf Bt-Proteine zurückführen ließen. In Freilanduntersuchungen zeigten sich im Vergleich von Bt-Mais mit verschiedenen konventionellen Maissorten keine Unterschiede im Vorkommen und in der Fraßaktivität dieser Bodenorganismen. Dementsprechend wurde die Streu von Bt-Mais nicht langsamer zersetzt als die Maisstreu konventioneller Vergleichssorten.

Regenwürmer

Regenwürmer ernähren sich von verrottendem Pflanzenmaterial und können so auch Stängel, Blätter und Wurzeln von Bt-Mais fressen.
Im Freiland konnte kein negativer Einfluss von Bt-Mais auf Regenwürmer festgestellt werden. In einem „Regenwurmfluchttest“ konnte darüber hinaus auch gezeigt werden, dass Regenwürmer Bt-haltige Erde nicht meiden.

Nematoden

Nematoden kommen nahezu überall im Boden vor und haben eine bedeutende Position im Bodennahrungsnetz. Da Bt-Proteine über Ausscheidungen aus den Wurzeln von Bt-Mais und verrottende Pflanzenteile in den Boden gelangen, kommen auch Nematoden damit in Kontakt.
In Laborversuchen mit Bodenmaterial vom Maisversuchsfeld wurde kein Einfluss von Bt-Mais gefunden. Die gemessenen Bt-Protein-Konzentrationen im Boden waren sehr gering. Bei Bt-Mais, der gegen den Maiswurzelbohrer resistent ist, zeigte sich im Freiland zu einem Zeitpunkt ein Effekt auf die Zusammensetzung der Nematoden-Gattungen. In ihrer Funktion im Bodennahrungsnetz wurden die Nematodenlebensgemeinschaften allerdings nicht beeinträchtigt.



Bodenmikroorganismen

Mikroorganismen im wurzelnahen Boden

Mikrobielle Bodengemeinschaften aus Pilzen, Bakterien und Archaeen sind während der Vegetationsperiode Bt-Proteinen ausgesetzt, die über die Wurzeln der Maispflanzen ausgeschieden werden.
Die Untersuchungen zeigten, dass an Bt-Maiswurzeln genauso viele Bodenmikroorganismen wie an denen der nicht-gentechnisch veränderten Ausgangslinien lebten. Die Unterschiede bei den mikrobiellen Gemeinschaften auf den Versuchsflächen mit Bt-Mais und der jeweiligen nicht-gentechnisch veränderten Ausganglinie waren nicht größer als die Unterschiede, die beim Anbau verschiedener konventioneller Maissorten gefunden wurden.

Maisstreu abbauende Mikroorganismen

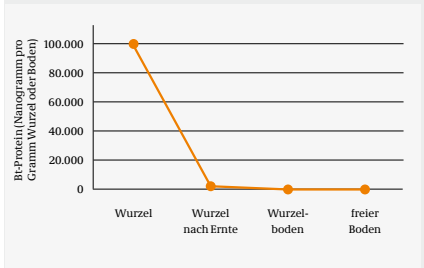
Reste von Bt-Mais verrotten nach der Ernte auf dem Feld und können daher Bt-Protein in den Boden freisetzen.
Die Zusammensetzung der mikrobiellen Gemeinschaften, die nach der Ernte bei der Verrottung der Maisstreu aktiv sind, war in erster Linie von der Bodenbeschaffenheit abhängig. Die angebaute Maissorte hatte hier keinen Einfluss. Auch die Intensität des mikrobiellen Streuabbaus war im Vergleich zwischen Bt-Mais und der konventionellen Ausgangssorte nicht unterschiedlich.

Bt-Proteine im Boden

Abbau von Bt-Proteinen

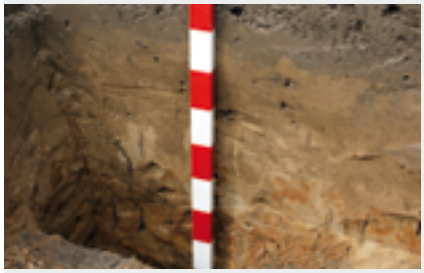
Eventuell schädigende Wirkungen von Bt-Proteinen auf Bodenorganismen sind auch davon abhängig, wie lange das Bt-Protein im Boden stabil ist. Daher wurde die Abbaurate von Bt-Proteinen im Boden bestimmt.
Bt-Proteine, die frei im Boden vorliegen, wurden von Mikroorganismen abgebaut. Im wurzelnahen Boden findet man bezogen auf das Gesamtgewicht 10.000 bis 100.000-mal weniger Bt-Protein als in frischen Wurzeln. Die Konzentrationen von freiem Bt-Protein im Boden lagen weit unterhalb der Konzentration, die Organismen schädigen können.

Abbau des Bt-Proteins im Boden



Verbleib von Bt-Proteinen im Boden

Bt-Proteine können sich an Bodenpartikel anlagern und von diesen gebunden werden. Die Bindung an Bodenpartikel hemmt teilweise den Abbau der Bt-Proteine, sodass ihre insektizide Wirkung erhalten bleiben könnte.
Nach bisherigen Untersuchungen liegt die Konzentration der gebundenen Bt-Proteine ebenfalls deutlich unterhalb der Schadschwelle für lebende Organismen.



Biokunststoffe aus der Knolle: Die Cyanophycin-Kartoffel

Kartoffeln sind nicht nur zum Essen da: Etwa ein Viertel der deutschen Kartoffelernte geht in industrielle Anwendungen, zum Beispiel in die Papierherstellung, Textil- und Kunststoffindustrie. Dafür gibt es spezielle Industriesorten, denn der Geschmack dieser Kartoffeln ist unwichtig und andere Eigenschaften geben den Ausschlag.

Wissenschaftler der Universitäten Rostock, Berlin, Bielefeld und Tübingen haben eine gentechnisch veränderte Kartoffel entwickelt, die Cyanophycin – das Ausgangsmaterial für einen biologisch abbaubaren Kunststoff – bildet. Diese Kartoffel wurde in langjährigen Gewächshausversuchen optimiert und schließlich auch im Freiland getestet. Parallel dazu wurden im Rahmen der biologischen Sicherheitsforschung mögliche Umweltauswirkungen dieser Kartoffel analysiert. Mitarbeiter der Universität Rostock und der Universität Trier überprüften, ob die Produktion von Cyanophycin möglicherweise einen Einfluss auf die Frostresistenz oder den Verrottungsprozess der Kartoffelknolle haben könnte – dies hätte möglicherweise Auswirkungen auf das Ausbreitungsverhalten der Pflanze oder auf die Zusammensetzung der Bodenmikroorganismen-Gemeinschaften.

Cyanophycin ist ein Stoff, der z. B. von Blaualgen (Cyanobakterien) gebildet wird. Sie nutzen ihn zur Speicherung von Stickstoff. Ein Bestandteil von Cyanophycin ist Polyaspartat, das technisch als biologisch abbaubarer Kunststoff oder in Waschmitteln als Wasserenthärter verwendet werden kann.
Die Herstellung von Cyanophycin mit Hilfe von Pflanzen ist schon seit einigen Jahren ein Forschungsthema. In einem vom damaligen Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (BMELV) geförderten Verbundprojekt entwickelten Wissenschaftler die „Cyanophycin-Kartoffel“. Durch Übertragung eines Gens aus einem Cyanobakterium wurden Kartoffeln dazu gebracht, Cyanophycin in relativ großen Mengen zu produzieren – bis zu acht Prozent an der Trockenmasse der Kartoffeln. Da die Kartoffeln normalerweise für die Stärkeproduktion angebaut werden, könnte auf diese Weise ein biologisch abbaubarer Kunststoff zusätzlich als „Beiprodukt“ kostengünstig hergestellt werden. Es würden keine zusätzlichen Flächen benötigt.

Frostresistenz und Verrottung

Unterscheidet sich die Cyanophycin-Kartoffel von herkömmlichen Kartoffeln?

Zwei Projekte der biologischen Sicherheitsforschung beschäftigten sich mit dieser Cyanophycin-Kartoffel. In einem der Projekte untersuchten die Wissenschaftler, ob die Knollen möglicherweise besser überwintern können. Da die Anreicherung von Cyanophycin in den Kohlenhydratstoffwechsel der Kartoffeln eingreift, könnte die Frostresistenz der gentechnisch veränderten Kartoffeln erhöht sein und auf dem Feld verbleibende Knollen im nächsten Jahr wieder auskeimen. Ein höheres Potenzial zur ungewollten Verbreitung dieser gentechnisch veränderten Kartoffeln wäre die Folge.

Cyanophycin kommt im Ackerboden normalerweise nicht in größeren Mengen vor. Deshalb wollten die Wissenschaftler auch wissen, ob Cyanophycin Auswirkungen auf Bodenbakterien und den Verrottungsprozess der Kartoffeln hat.

Auf einer Freisetzungsfläche wurden gentechnisch veränderte und konventionelle Kartoffelknollen an zwei Standorten in zwei unterschiedlichen Tiefen vergraben. Während der Überwinterungsdauer von etwa sechs Monaten wurden zu mehreren Zeitpunkten Knollen ausgegraben und Bodenproben genommen, die anschließend im Labor untersucht wurden.

Die Cyanophycin bildenden Kartoffeln waren entgegen der Erwartungen deutlich anfälliger gegenüber den Winterbedingungen als ihre konventionelle Ausgangssorte. Auch die Verrottungsgeschwindigkeit der gentechnisch veränderten Kartoffelknollen war höher. Damit besitzen diese Kartoffeln ein sehr geringes Ausbreitungspotenzial. Des Weiteren wurden die chemischen Eigenschaften des Bodens wie beispielsweise der pH-Wert sowie die Diversität der Mikroorganismen an der Knollenoberfläche und im knollennahen Boden untersucht. Es war auch hier kein Einfluss durch die gentechnische Veränderung nachweisbar.

Prof. Dr. Inge Broer, Universität Rostock, leitete die Forschungsprojekte zur Cyanophycin-Kartoffel

„Diese Kartoffeln überdauern weniger gut im Acker als die nicht gentechnisch veränderten Kartoffeln. Die Wahrscheinlichkeit, dass man sie im nächsten Jahr als Durchwuchs wiederfindet, ist also extrem gering."

Gentechnik bei Kartoffeln

Kartoffeln sind in gemäßigten Breiten ein Grundnahrungsmittel. Ein nicht unerheblicher Anteil der Ernte wird aber auch von der Industrie verarbeitet, die die Stärke als nachwachsenden Rohstoff einsetzt; in Deutschland ist es rund ein Viertel.

Gentechnisch veränderte Kartoffeln spielen bisher kaum eine Rolle im kommerziellen Anbau. In den USA wurden zwischen 1999 und 2001 auf etwa 25.000 Hektar gentechnisch veränderte Kartoffeln mit Resistenzen gegen Insekten und Viren angebaut.

Wichtigstes Züchtungsziel: Resistenz gegen die Kraut- und Knollenfäule

Das größte Problem im Kartoffelanbau ist die Kraut- und Knollenfäule, die viele als Kartoffelfäule kennen. Der Erreger ist der Algenpilz *Phytophthora infestans*, der vor mehr als 150 Jahren in Irland die großen Hungersnöte auslöste. Auch heute gehen Ertragsverluste von 20 Prozent und mehr auf sein Konto. Europäische Unternehmen und Hochschulen testeten bereits in Freisetzungsversuchen in Europa die ersten Phytophthora-resistenten gentechnisch veränderten Kartoffeln. Doch ein entsprechender EU-Zulassungsantrag für Anbau und Verwendung als Lebens- und Futtermittel wurde aufgrund von öffentlichen Protesten zurückgezogen.

Befall durch Kraut- und Knollenfäule bei Kartoffeln

Maßgeschneiderte Stärke

Ein bereits erreichtes Ziel ist die Züchtung von gentechnisch veränderten Kartoffelpflanzen, die optimierte Stärkequalitäten produzieren. Hierzu gehört beispielsweise die in Europa zugelassene Kartoffel Amflora, deren Stärkezusammensetzung so verändert wurde, dass die Knollen fast ausschließlich die Stärkekomponente Amylopektin enthalten, statt wie sonst Amylopektin und Amylose.

Das reine Amylopektin bietet als nachwachsender Rohstoff neue Einsatzmöglichkeiten in der Papierproduktion sowie zur Herstellung von Klebern, textilen Geweben und Baumaterialien.

Die Kartoffel wurde von BASF Plant Science entwickelt, in einem 13 Jahre währenden Zulassungsprozess mehrfach wissenschaftlich begutachtet und geprüft und schließlich 2010 von der Europäischen Kommission zugelassen. 2010 wurde die Amflora in Tschechien auf 150 Hektar, in Schweden auf 80 Hektar und in Deutschland auf 15 Hektar angebaut. Anfang 2012 hat die BASF aber die Vermarktung der Amflora in Europa aufgrund mangelnder Akzeptanz gestoppt.

Neue Inhaltsstoffe

In Zukunft könnten Kartoffeln auch pharmazeutische Wirkstoffe oder wie die Cyanophycin-Kartoffel die Ausgangssubstanzen für biologisch abbaubare Kunststoffe liefern. Kartoffeln, die zum menschlichen Verzehr bestimmt sind, könnten auch mit gesundheitsfördernden Inhaltsstoffen angereichert werden (Beispiel: Fruktan- und Zeaxanthin-Kartoffel, siehe Text).

rechts: Cyanophycin-Kartoffelpflanze, links: die Ausgangssorte

Kartoffeln mit gesundheitsfördernden Inhaltsstoffen: Keine Auffälligkeiten im Anbau

In Deutschland wurden Ende der 1990er Jahre zwei weitere gentechnisch veränderte Kartoffelsorten entwickelt, die zusätzliche Inhaltsstoffe mit einer möglicherweise gesundheitsfördernden Wirkung produzierten: Die „Fruktan-“ und die „Zeaxanthin-Kartoffel“. Beide wurden im Rahmen der biologischen Sicherheitsforschung untersucht.

Freilandversuch zur Untersuchung der Anfälligkeit von Fruktan-Kartoffeln gegenüber dem Kartoffelkäfer

Wissenschaftler des Max-Planck-Institutes für molekulare Pflanzenphysiologie in Potsdam züchteten die Fruktan-Kartoffel. Zwei aus der Artischocke übertragene Gene bewirken, dass Zuckermoleküle in der Knolle zum Ballaststoff Fruktan verknüpft werden. Eine Markteinführung dieser Kartoffel wurde zwar nicht mehr angestrebt, aber sie wurde als Modellpflanze für die biologische Sicherheitsforschung genutzt.

Es interessierte die Wissenschaftler, ob sich durch den gentechnischen Eingriff die Zusammensetzung der übrigen Inhaltsstoffe verändert, ob diese Kartoffeln stärker von Schädlingen oder Krankheiten befallen werden und ob wichtige Anbaueigenschaften verändert sind. Die Forschungsarbeiten zeigten, dass die Fruktan-Kartoffeln kälteempfindlicher waren und im Wuchs kleiner blieben, zeigten aber sonst keine Auffälligkeiten, die zu erhöhten Umweltrisiken führen könnten.

Im Rahmen eines vom BMBF geförderten Forschungsverbundes wurde eine gentechnisch veränderte Kartoffelpflanze entwickelt, deren Knollen mit dem Karotinoid Zeaxanthin angereichert waren. Diesem natürlicherweise in anderen Pflanzen wie der Paprika vorkommenden Stoff werden gesundheitsfördernde Wirkungen zugesprochen, so soll diese Substanz vor altersbedingten Augenerkrankungen schützen. Eine Markteinführung dieser Kartoffeln ist allerdings nicht mehr geplant.

Bei den Zeaxanthin-Kartoffeln wurde untersucht, ob der veränderte Karotinoid-Gehalt unerwartete Auswirkungen auf den Wuchs der Pflanzen und auf die Bakterien und Pilze im Wurzelraum hat.

Die gentechnisch veränderten Kartoffeln zeigten gegenüber ihrer konventionellen Ausgangslinie Veränderungen im Stoffwechsel, im Wurzelwachstum und in der Besiedlung mit Bodenmikroorganismen. Diese Unterschiede sind jedoch kleiner als die Unterschiede zwischen verschiedenen konventionellen Kartoffelsorten und damit aus Sicht der Sicherheitsforschung unkritisch.

Dr. Michael Schloter,
Helmholtz Zentrum München,
Institut für Bodenökologie

„Wir haben keine Effekte gefunden, die über die normalen Sortenunterschiede hinausgehen.“

Versuchsfeld mit Zeaxanthin-Kartoffeln

Das mobile „Labor“ am Versuchsfeld – hier wurden die Pflanzen gereinigt und die Proben für weitere Untersuchungen eingefroren.

Ausbreitungsverhalten von gentechnisch verändertem Raps

Raps besitzt im Gegensatz zu den meisten Kulturpflanzen die Fähigkeit, außerhalb des Anbaus zu verwildern und in einige nah verwandte Arten auszukreuzen. Sollte gentechnisch veränderter Raps angebaut werden, könnten sich so auch die neu eingeführten Gene verbreiten. Außerdem kann Rapssamen im Boden lange Zeiträume überdauern, sodass er als Unkrautraps – sogenannter Durchwuchsraps – auch in Folgekulturen wie Weizen auftritt. Verschiedene Projekte der Sicherheitsforschung haben sich daher nicht nur mit der Auskreuzung von gentechnisch verändertem Raps auf Rapspflanzen in Nachbarfeldern, sondern auch mit Verwilderung und Überdauerung von Raps beschäftigt.

Einkreuzung der Transgene in verwandte Wildpflanzen

Um die Wahrscheinlichkeit der Auskreuzung gentechnisch übertragener Gene auf Wildpflanzen näher zu untersuchen, wurden im Rahmen eines Forschungsprojektes des Julius Kühn-Institutes verwandte Wildarten von Raps (*Brassica napus*) in unmittelbarer Nähe zu Versuchsparzellen mit gentechnisch verändertem Raps angepflanzt. Dabei handelte es sich um die in den Versuchsregionen häufig vorkommenden Arten Ackersenf und Hederich sowie die weniger häufigen Arten Schwarzer Senf und Sareptasenf. Nach der Abblüte wurde der Samen der Wildpflanzen gesammelt, anschließend ausgesät und analysiert.

Die Wahrscheinlichkeit einer Auskreuzung auf mit Raps verwandte Unkrautarten ist nach den vorliegenden Ergebnissen bei den meisten untersuchten Wildpflanzen sehr gering. Unter Freilandbedingungen konnte zwar bei Sareptasenf (*Brassica juncea*) eine deutliche Auskreuzung des Transgens in erster Generation nachgewiesen werden. Die Hybriden aus Sareptasenf und Raps entwickelten sich gut, bildeten aber keine vermehrungsfähigen Samen, sodass die neuen Gene nicht in die Wildart gelangen konnten.

Schwarzer Senf (*Brassica nigra*)

Auskreuzungen auf Schwarzen Senf (*Brassica nigra*), Weißen Senf (*Sinapis alba*) oder Hirtentäschel (*Capsella bursa-pastoris*) und Acker-Hellerkraut (*Thlaspi arvense*) konnten unter Feldbedingungen nicht nachgewiesen werden. Allerdings ist aus anderen Untersuchungen bekannt, dass Auskreuzungen auf Hederich (*Raphanus raphanistrum*) unter Feldbedingungen möglich sind, wenn sie auch eher selten vorkommen. Möglich sind nach Untersuchungen der Universität Osnabrück auch Kreuzungen zwischen Raps und Rübsen, der in einigen Regionen Deutschlands als Kulturpflanze angebaut wird und teilweise verwildern kann.

Dr. Bernd Hommel,
Julius Kühn-Institut

„Rapspollen ist unter natürlichen Gegebenheiten einfach sehr, sehr selten kompatibel mit anderen Kreuzblütlern."

Auskreuzung zwischen gentechnisch verändertem und konventionellem Raps

In dreijährigen Freilandversuchen der Technischen Universität München wurde gemessen, wie stark gentechnisch veränderter Raps auf benachbarte Felder mit konventionellen Rapspflanzen auskreuzen kann. Es zeigte sich, dass die Auskreuzung mit zunehmender Entfernung stark abnahm. Bei einem Abstand von drei Metern lag die Auskreuzungsrate durchschnittlich bei 0,7 Prozent, bei 11 Metern bei weniger als 0,2 Prozent. Dabei waren die Auskreuzungsraten unabhängig von der jeweils vorherrschenden Windrichtung. Dies deutet darauf hin, dass die Pollen nicht durch Wind, sondern durch Blüten besuchende Insekten verbreitet werden.

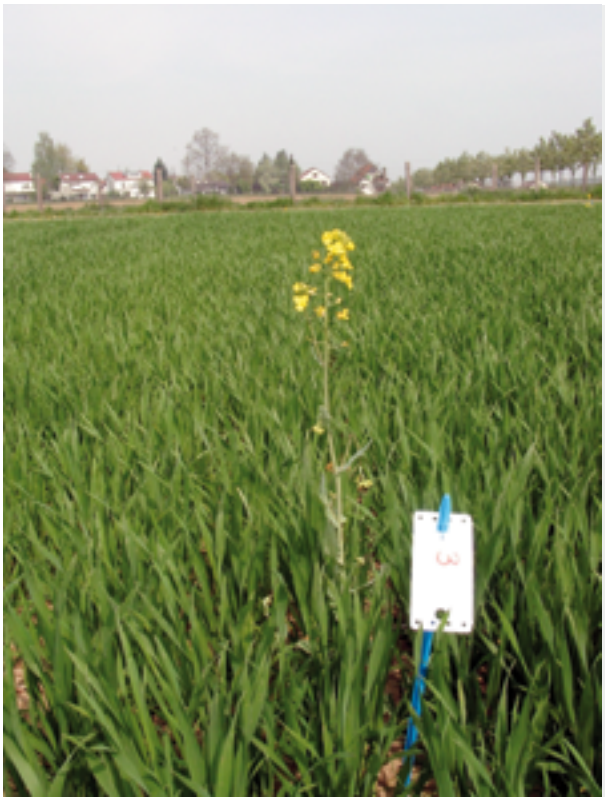
Diese Ergebnisse sind auch für die Koexistenz – das Nebeneinander des Anbaus von gentechnisch veränderten und konventionellen Rapssorten – wichtig. Eine Einkreuzung gentechnisch veränderter Rapssorten in Nachbarfeldern kann bei Einhaltung von Mindestabständen von wenigen Metern bereits stark reduziert werden.

Verminderung von Durchwuchsraps

Samen, die bei der Rapsernte häufig in beträchtlichen Mengen ausfallen und auf dem Feld verbleiben, können lange Zeit im Boden überdauern. Sie keimen dann oft erst nach Jahren und wachsen wie Unkräuter als Durchwuchsraps in den Folgekulturen. Wenn gentechnisch veränderter Raps angebaut wird, kann es auf diesem Wege zu ungewollten Vermischungen in konventionellen Raps-Folgekulturen kommen.

In zwei Forschungsprojekten des Julius Kühn-Institutes und der Universität Hohenheim wurden wesentliche Einflussfaktoren für die Samenüberdauerung und Entstehung von Durchwuchsraps identifiziert. Dazu gehören die Häufigkeit des Anbaus von Raps, die dem Rapsanbau folgende Bodenbearbeitung und die Sortenwahl. Denn die Samen einiger Rapssorten neigen stärker zur sogenannten sekundären Samenruhe (sekundäre Dormanz, siehe Kasten rechts). Die Keimung der Samen im Boden ist dadurch lange Zeit verzögert und dies führt zu größeren Mengen Durchwuchsraps in den darauf folgenden Anbauperioden.

Bei den Untersuchungen wurden Rapssorten identifiziert, deren Neigung zu sekundärer Dormanz deutlich geringer ist. Die Überdauerungsrate der Samen nach sechs Monaten im Boden ist stark abhängig von der Sorte und bewegte sich bei den untersuchten Rapssorten zwischen sieben und 95 Prozent. Die Wissenschaftler schlagen daher vor, Rapssorten mit geringer sekundärer Dormanz als Ausgangsmaterial für die Herstellung gentechnisch veränderter Rapspflanzen zu nutzen. Auch geeignete Anbaumaßnahmen wie weite Fruchtfolgen – bis zum nächsten Rapsanbau auf dem gleichen Feld werden möglichst viele andere Kulturarten zwischenzeitlich angebaut – und eine verzögerte Stoppelbearbeitung nach der Ernte können helfen, den Samenvorrat im Boden und damit Durchwuchsraps zu minimieren.



Durchwuchsraps in Winterweizen

Dormanz oder Samenruhe

Primäre Dormanz bezeichnet bei Samen den Zustand der Samenruhe. Diese verhindert das vorzeitige Auskeimen reifer Samen bereits in der Schote vor der Ernte. Ausgesäte Samen keimen dagegen in der Regel unverzüglich. Durch ungünstige Umweltbedingungen kann dieser Keimungsprozess jedoch unterbrochen und eine sekundäre Dormanz ausgelöst werden. Dies geschieht beispielsweise, wenn Rapssamen bei der Bodenbearbeitung tiefer in den Boden gelangen und dort unter Lichtabschluss einem Trockenstress ausgesetzt sind. Die Neigung zu dieser sekundären Dormanz ist bei verschiedenen Rapssorten unterschiedlich stark ausgeprägt.

Gering dormante Rapssorten beginnen im Auswuchstest bereits in der Schote zu keimen

Hingegen keimen Sorten mit hoher Dormanz nicht in der Schote

Gentechnik in der Rapszüchtung

Weltweit wurde gentechnisch veränderter Raps 2011 auf 8,2 Millionen Hektar angebaut, alleine in Kanada waren es 7,7 Millionen Hektar. Dabei handelt es sich nahezu ausschließlich um herbizidtolerante Pflanzen. Bisher wächst auf europäischen Feldern kein gentechnisch veränderter Raps. Die bisher erteilten Zulassungen beschränken sich hauptsächlich auf die Einfuhr von Lebensmitteln aus gentechnisch veränderten Rapspflanzen. Nach Mais ist Raps die Kulturpflanze mit den meisten Freisetzungsversuchen in Europa. Sie wurden vor allem in Frankreich (116), Großbritannien (106), Deutschland (40), Belgien (50) und Schweden (40) durchgeführt.

Die wichtigsten Ziele der Züchtung bei Raps mit gentechnischen Methoden sind:

- **Herbizidtolerante Rapssorten, bei denen mit Hilfe der Gentechnik Resistenzen gegenüber den Wirkstoffen Glyphosat bzw. Glufosinat übertragen wurden.**
- **Männlich sterile Rapspflanzen, welche die Züchtung von Hybridsorten vereinfachen.**
- **Eingriffe ins Stoffwechselgeschehen, die meist eine für einen Verarbeitungszweck maßgeschneiderte Fettsäurezusammensetzung zum Ziel haben.**

Pilzresistente Gerste: Nebenwirkungen auf nützliche Bodenpilze?

Ein großes Problem im Getreideanbau sind Pilzkrankheiten und die von einigen Pilzen produzierten Pilzgifte (sogenannte Mykotoxine), die in Lebens- und Futtermittel gelangen können. Die konventionelle Züchtung war bisher nicht erfolgreich, ausreichend resistente Getreidesorten zu produzieren, ebenso ist der chemische Pflanzenschutz gerade gegen Mykotoxin-bildende Pilze nicht effektiv genug. Mit gentechnischen Methoden könnten resistente Pflanzen entwickelt werden; erste Prototypen sind bereits vorhanden. Doch haben diese Pflanzen vielleicht auch unerwünschte Nebenwirkungen, z. B. auf nützliche Pilze im Boden? Zwei vom BMBF geförderte Projekte zeigten, dass hier keine schädlichen Auswirkungen zu erwarten sind.

Insbesondere Pilze wie *Fusarium* bilden Pilzgifte (Mykotoxine) in den Ähren von Getreidepflanzen. In Lebens- und Futtermitteln sind diese oft extrem giftigen Substanzen eine Belastung für die Gesundheit von Mensch und Tier. Zwar gibt es seit einigen Jahren in Europa Grenzwerte für verschiedene Mykotoxine in Getreideprodukten, doch bei starkem Pilzbefall – vor allem bei feucht-warmem Wetter und fehlendem Pflanzenschutz – gibt es immer wieder Schwierigkeiten, diese einzuhalten.

Gerstenpflanze mit Fusarium-Infektion

Gentechnik in der Getreidezüchtung

Bisher gibt es weltweit – abgesehen von Mais – keine gentechnisch veränderten Getreidepflanzen, die zugelassen sind oder gar schon landwirtschaftlich genutzt werden. Vor allem bei Weizen und Gerste wird intensiv an Sorten mit neuen oder verbesserten Eigenschaften gearbeitet. Pflanzenforscher und Züchter nutzen dabei verschiedene molekularbiologische Verfahren, auch die Gentechnik. In zahlreichen Ländern werden Freilandversuche mit gentechnisch verändertem Weizen oder Gerste durchgeführt, auch in Europa. Erste Markteinführungen sind in etwa fünf bis zehn Jahren zu erwarten.

Die wichtigsten Ziele der Pflanzenzüchtung bei Weizen und Gerste sind:

- **Resistenzen oder verbesserte Widerstandsfähigkeit gegen verschiedene Pilzkrankheiten (etwa Fusarien, Mehltau, Brandpilze)**
  Bei einigen Pilzkrankheiten ist die Züchtung resistenter Sorten schwierig oder gar unmöglich, da im Genpool der jeweiligen Art keine geeigneten Resistenzgene vorhanden sind.

- **Dürretoleranz, vor allem bei Weizen**
  Ziel ist die Entwicklung von Pflanzen, die auch bei Trockenheit gute Ernteerträge liefern. Damit könnte auch die Bewässerung der Felder reduziert werden.

- **Veränderte Inhaltsstoffe**
  Verschiedene Forschungsprojekte beschäftigen sich damit, die Nährstoffzusammensetzung von Weizen oder Gerste zu verändern.

Eine Patentlösung gegen Pilzkrankheiten und zu hohe Mykotoxinbelastungen gibt es nicht. Die Wirksamkeit von Pflanzenschutzmitteln (Fungiziden) ist ebenso begrenzt wie die Züchtung widerstandsfähiger Sorten. Und ausgerechnet eine schonende Bodenbearbeitung ohne Pflügen, wie sie aus ökologischen Gründen erwünscht ist, fördert die Verbreitung der parasitären Pilze.

Zudem ist im Zuge der Klimaerwärmung damit zu rechnen, dass Pilzkrankheiten verstärkt auch in bisher nicht davon betroffenen Regionen auftreten. Anders als bei Mehltau oder Rost, ebenfalls Pilzkrankheiten, ist es bei Fusarien schwierig, widerstandsfähige oder gar resistente Sorten zu züchten. Die gewünschte Resistenz basiert nämlich auf einem komplexen Zusammenspiel mehrerer Gene. Bis es den Züchtern deshalb gelingen wird, eine wirksame Resistenz aufzubauen, kann es Jahrzehnte dauern – möglicherweise zu lange, um neu auftretenden Pilzbefall einzugrenzen und damit die Mykotoxinbildung in Grenzen zu halten.

Mit gentechnischen Verfahren könnte die Entwicklung Fusarien-resistenter Getreidesorten beschleunigt und so besser an das Auftreten alter und neuauftretender Pilzerkrankungen angepasst werden. Inzwischen sind verschiedene Gene bekannt, die solche Resistenzen vermitteln können. Einige bilden Enzyme wie Chitinasen oder Glukanasen, die die Zellwände der Pilze abbauen, andere Gene unterdrücken die Ausbreitung der Pilze in der Pflanze oder befähigen die Pflanzenzellen, die Pilzgifte zu „neutralisieren“.

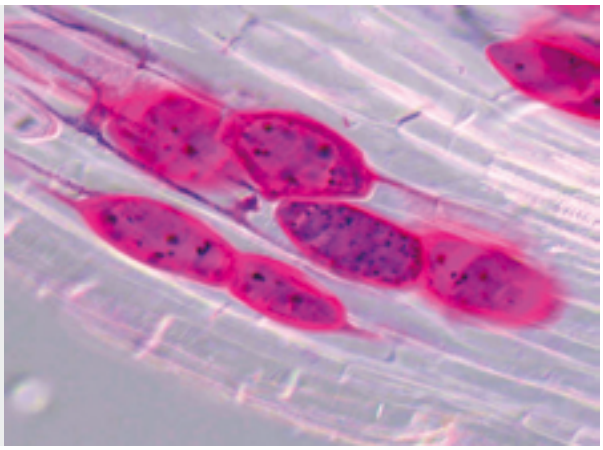
Auswirkungen der Pilzresistenz auf dem Prüfstand

Zwei vom BMBF geförderte Projekte der Sicherheitsforschung haben sich mit gentechnisch veränderter Gerste beschäftigt, die eine erhöhte Widerstandsfähigkeit gegenüber Pilzen besitzt. Diese Gerstenlinien wurden an der Washington State University entwickelt und in den USA bereits im Freiland geprüft.

Eine der beiden untersuchten gentechnisch veränderten Gerstenpflanzen enthielt ein zusätzliches Chitinase-Gen aus einem Bodenpilz (*Trichoderma harzianum*). Chitinasen bauen Chitin ab, das ein Bestandteil der Zellwände von Pilzen ist, und zerstören somit die Krankheitserreger. Die zweite untersuchte Gerstenpflanze besitzt ein Glukanase-Gen aus einem Bodenbakterium (*Bacillus amyloliquefaciens*). Das Gen wurde primär in Gerste übertragen, um die Braueigenschaften und die Verdaulichkeit als Tierfutter zu verbessern. Die dadurch in der Gerste gebildete Glukanase erhöht aber zugleich auch in gewissem Umfang die Pilzresistenz.

Zunächst überprüften die Wissenschaftler, ob durch die Bildung der Chitin und Glukan abbauenden Enzyme auch nützliche Pilze geschädigt werden. 70 bis 80 Prozent der Landpflanzen leben in Symbiose mit sogenannten Mykorrhiza-Pilzen im Boden, wobei Pflanze und Pilz beide von diesem engen Zusammenleben profitieren. Der Pilz versorgt die Pflanze mit Nährstoffen wie Phosphat, die Pflanze bietet dem Pilz einen geschützten Lebensraum und liefert ihm lebensnotwendige Kohlenhydrate.

Gerste im Freilandversuch unter einem Sicherheitsnetz. Erhebliche Teile der Freisetzungsfläche wurden mehrfach durch Gentechnikgegner zerstört.



Mikroskopische Analyse der Wurzelbesiedlung von transgener Gerste mit nützlichen Mykorrhiza-Pilzen. Die Besiedelung erfolgt wie bei herkömmlichen Gerstenpflanzen.

In mehrjährigen und mehrortigen Versuchen im Labor, Gewächshaus und Freiland zeigte sich, dass die gentechnisch veränderten Gerstenpflanzen in normalem Umfang mit nützlichen Mykorrhiza-Pilzen besiedelt werden. Auch die Struktur der Pilzhyphen wie die sogenannten Nährzellen (Arbuskeln) an den Gerstenwurzeln waren anatomisch nicht verändert.

Prof. Dr. Karl-Heinz Kogel,
Institut für Phytopathologie und Angewandte Zoologie (IPAZ),
Justus-Liebig-Universität Gießen

„Ein Ergebnis ist, dass auch gentechnisch veränderte Pflanzen von nützlichen Mykorrhiza-Pilzen besiedelt werden."

Ein weiteres Projekt beschäftigte sich mit der Frage, ob die Bildung der beiden neuen Enzyme in der Pflanze andere unerwünschte Auswirkungen auf Pflanzeneigenschaften und Inhaltsstoffe haben könnte. Hierbei stellte sich heraus, dass die gentechnische Veränderung der Gerste nur minimale Veränderungen in der Genaktivität und der stofflichen Zusammensetzung der Pflanzen bewirkt. Der Unterschied zwischen den beiden konventionellen Ausgangssorten war erheblich größer als der zwischen gentechnisch veränderter Gerste und der jeweiligen Elternsorte.

Außerdem zeigte sich, dass eine Besiedlung mit Mykorrhiza-Pilzen die Stoffzusammensetzung der Gerstenpflanzen in hohem Maße verändert – unabhängig davon, ob es sich um gentechnisch veränderte oder konventionelle Gerste handelt.

Die Ergebnisse bestätigen und verdeutlichen, dass klassische Züchtung und Umwelteinflüsse Kulturpflanzen in erheblich stärkerem Umfang verändern als das gezielte gentechnische Hinzufügen eines einzelnen Gens.

Prof. Dr. Uwe Sonnewald,
Lehrstuhl für Biochemie,
Friedrich-Alexander Universität Nürnberg-Erlangen

„Der Einfluss der gentechnisch hinzugefügten Gene ist im Wesentlichen auf ihre unmittelbare Funktion begrenzt."

Feuerbrand-resistente Bäume: Werden nützliche Bakterien verdrängt?

Feuerbrand gehört zu den bedrohlichsten Infektionen bei Obstbäumen. Am Julius Kühn-Institut, Bundesforschungsinstitut für Kulturpflanzen in Dresden, wurden Apfelbäume so gentechnisch verändert, dass sie den bakteriellen Erreger des Feuerbrandes abwehren. Da die Blätter von Apfelbäumen einen natürlichen Lebensraum für eine Vielzahl von Bakterien bieten, war die Frage, ob die antibakteriell wirkenden Gene auch nützliche Bakterien verdrängen könnten. Außerdem testeten die Forscher eine neue Methode, um die Auskreuzung von gentechnisch veränderten Apfelbäumen zu unterbinden.

Feuerbrand: Ein nicht gelöstes Problem im Obstbau

Feuerbrand wird hervorgerufen durch das Bakterium *Erwinia amylovora*. Gefährdet sind vor allem Obstbäume wie Apfel, Birne und Quitte sowie einige Ziergehölze. In Deutschland trat die Krankheit erstmals im Jahr 1971 auf und breitet sich seitdem aus. 2004 war nahezu das gesamte Bundesgebiet von dem Erreger betroffen.

In einigen europäischen Ländern werden zu seiner Bekämpfung Antibiotika-haltige Pflanzenschutzmittel (z. B. Streptomycin) eingesetzt, die jedoch in Deutschland nicht bzw. nicht mehr zugelassen sind.

Die am Markt verfügbaren Apfelsorten sind anfällig für Feuerbrandinfektionen. Am Julius Kühn-Institut in Dresden konnten zwar mit klassischen Züchtungsmethoden Obstgehölze mit erhöhter Resistenz gewonnen werden. Doch das Problem ist, dass diese Sorten bislang nicht gleichzeitig eine sehr gute Fruchtqualität, eine hohe Ertragsleistung und Ertragsstabilität aufweisen und sich daher auf dem Markt nicht durchgesetzt haben.

Auch mit gentechnischen Verfahren wurden am Dresdener Institut Resistenzgene gegen Feuerbrand in Apfelpflanzen übertragen – so zum Beispiel ein Gen, das die Bildung des antibakteriell wirksamen Stoffes Lysozym bewirkt. Zudem wurden weitere gentechnisch veränderte Apfelbäume hergestellt, in die Resistenzgene auch gegen die Pilzkrankheiten Mehltau und Apfelschorf übertragen wurden.

Mit Feuerbrand infizierter Obstbaum. Der Befall mit dem Bakterium führt zu braunen Blüten, Blättern oder Früchten. Das verleiht den Pflanzen das Aussehen wie nach einem Brand. Übertragen wird der Erreger hauptsächlich durch Insekten, aber auch durch Regen, Wind, Vögel oder Schnittwerkzeuge.

Sicherheitsforschung: Auswirkung auf Mikroorganismen?

Das Bundesforschungsinstitut führte mit den Feuerbrand-resistenten Apfelbäumen in den nachfolgenden Jahren Experimente in speziellen Sicherheitszelten durch, in denen freilandähnliche Bedingungen geschaffen wurden. Es sollte überprüft werden, welche Auswirkungen die antibakteriell wirkenden Gene auf nützliche, die Blätter besiedelnde Bakterien haben, denn die Blätter der Apfelpflanzen bieten einen natürlichen Lebensraum für eine Vielzahl von Bakterien. Über ihre Lebensweise, ihre Funktion und ihre Interaktion mit den Wirtspflanzen und anderen Mikroorganismen ist noch wenig bekannt. Einige von ihnen unterstützen die Pflanze bei der Abwehr von Krankheitserregern. So wirkt etwa die Anwesenheit des Bakteriums *Pseudomonas fluorescens* bei Apfelpflanzen hemmend auf den Erreger des Apfelschorfes. Mit Bakterienkulturen und DNA-Analysemethoden charakterisierten die Wissenschaftler die Bakterien der Apfelblätter. Es zeigte sich, dass die

transgenen Apfelbäume wie herkömmliche Bäume von Bakterien besiedelt wurden. Das Artenspektrum der Bakterien unterschied sich nicht.

Neue Methode für „Gentechnik-freie“ Früchte und Pollen

Die Wissenschaftler arbeiteten auch an einer neuen Methode, um eine Auskreuzung von gentechnisch übertragenen Genen bei Bäumen zu verhindern. Die Methode nutzt die Tatsache, dass Obstbäume gewöhnlich veredelt werden. Dabei werden Zweige der gewünschten Sorte auf den Wurzelstock einer robusten Sorte gepfropft und wachsen als eine Pflanze zusammen. Hier wird nun nur der Wurzelstock gentechnisch verändert, der obere aufgepfropfte Teil des Apfelbaums mit den Früchten und Blüten ist hingegen unverändert. Wenn die Blüten und Früchte die gentechnische Änderung nicht enthalten, können Sie diese auch nicht an ihre Nachkommen weitergeben. Der transgene Wurzelstock enthält aber eine genetische Anweisung, mit der Gene gezielt auch im oberen Teil der Pflanze ausgeschaltet werden sollten. Diese Information wird – so die Theorie – vom Wurzelstock über die Leitungsbahnen auch in den oberen gentechnisch unveränderten Teil der Pflanze transportiert. Bei diesem Experiment sollte ein Gen, das für die Bildung von roten Blattfarbstoffen verantwortlich ist, ausgeschaltet werden. Es zeigte sich, dass zumindest zeitweise der rote Farbstoff in den Blättern nicht mehr gebildet wurde. Dieser Effekt nahm aber im Laufe der Vegetationsperiode ab. Weitere Untersuchungen sind daher noch notwendig, um dieses Ergebnis zu bestätigen und die Methode weiterzuentwickeln.

Transgene Apfelpflanzen in einem speziellen Sicherheitszelt

Weitere Forschungsthemen bei Gehölzen

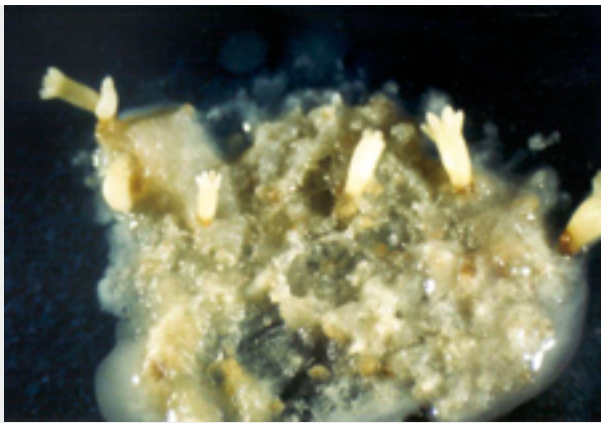
Ausbreitung verhindern

Gehölze haben eine Besonderheit, die für die Risikobewertung gentechnischer Eingriffe von großer Bedeutung ist: Sie haben eine extrem lange Lebensdauer und können sich über sehr weite Distanzen auskreuzen oder über ihren Samen verbreiten. Um die langfristigen Folgen der Freisetzung von transgenen Gehölzen im sensiblen Ökosystem Wald kontrollieren zu können, werden deshalb weltweit Strategien entwickelt, wie sich die Ausbreitung durch Pollen oder Samen gezielt verhindern lässt (biologisches Confinement).

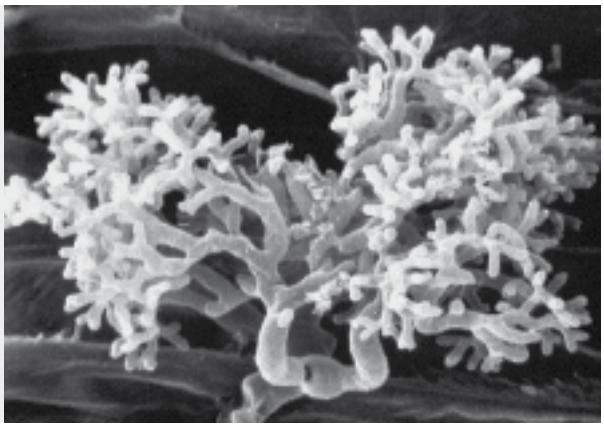
Am Institut für Forstgenetik in Großhansdorf wird seit vielen Jahren daran gearbeitet, bei Pappeln männliche bzw. weibliche Sterilität zu erzeugen. In Projekten der biologischen Sicherheitsforschung werden dort aktuell zwei Confinement-Systeme überprüft. Bei einem Ansatz wurde männliche Sterilität erzeugt, sodass die Pollenbildung unterbleibt, bei einem anderen Konzept wird der Pollen zwar gebildet, enthält aber keine Transgene mehr.

Übertragung von Transgenen auf Pilze und Bakterien?

Bäume leben in intensiver Symbiose mit Pilzgemeinschaften im Wurzelbereich. Beide zusammen bilden eine sogenannte Mykorrhiza. Diese sichert die Versorgung mit Wasser und Nährstoffen. Sollte eine Übertragung neu eingeführter Gene auf diese nützlichen Pilze stattfinden, wäre auch über sie eine Weiterverbreitung möglich. Auch auf endophytische Bakterien, die natürlicherweise im Inneren verschiedener Pflanzen leben, könnte veränderte Erbinformation übertragen werden. In mehreren Projekten der Sicherheitsforschung wurde ein möglicher horizontaler Gentransfer auf Mykorrhiza-Pilze und endophytische Bakterien untersucht. Aber weder im Freiland noch im Labor konnte ein horizontaler Gentransfer nachgewiesen werden.



Endophytische Bakterien



Mykorrhiza-Pilz

Forschung beschleunigen

Die Forschungsarbeit bei Gehölzen ist ein langwieriger, mehrere Jahrzehnte dauernder Prozess. Neue Eigenschaften können zwar mit Hilfe der Gentechnik in überschaubaren Zeiträumen „eingebaut“ werden, aber es sind dann wiederum Jahre oder Jahrzehnte nötig, um zu überprüfen, ob die gentechnische Veränderung wie das „biologische Confinement“ funktioniert und von Dauer ist. Um diesen Prozess zu beschleunigen, werden Bäume durch Übertragung verschiedener „Frühblühgene“ dazu gebracht, früher zu blühen. Pappeln, die üblicherweise erst mit etwa acht Jahren blühen, kommen nun schon nach einigen Monaten bis drei Jahren zur Blüte. Auch beim Apfel ist es durch Übertragen eines Gens aus der Birke gelungen, dass die Pflanzen schon im ersten Jahr statt nach sechs bis acht Jahren zu blühen beginnen.

Gentechnik in der Gehölzezüchtung

Im Vergleich mit gentechnisch veränderten landwirtschaftlichen Kulturpflanzen, die bereits weltweit kommerziell angebaut werden, spielen gentechnisch veränderte Gehölze bislang eine untergeordnete Rolle. Einer der Gründe hierfür ist, dass sie eine sehr lange Lebensdauer haben. Um zu überprüfen, ob eine gentechnische Veränderung die gewünschte Wirkung zeigt und auf Dauer stabil bleibt, sind etliche Jahre oder Jahrzehnte Forschung nötig.

Gentechnisch veränderte Gehölze werden in Europa kommerziell bisher nicht genutzt. In den USA gibt es aber bereits erste Marktzulassungen für Papaya (seit 1996) und Pflaume (seit 2007) mit gentechnisch erzeugter Virusresistenz.

Die wichtigsten Ziele der Forschung bei Obst- und Ziergehölzen sowie Bäumen im großflächigen Plantagenbau sind beispielsweise:

- **Schnell wachsende Bäume mit höherer Kälteresistenz (z. B. Pappeln oder Eukalyptus)**
- **Bäume mit weniger Lignin zur einfacheren Papierherstellung. Der Pflanzenstoff Lignin muss bisher in aufwändigen und umweltbelastenden Verfahren herausgelöst werden, um die reinen Cellulosefasern zu gewinnen.**
- **Krankheits- und schädlingsresistente Gehölze. Bei den Forstgehölzen geht es in erster Linie um Insekten und bei den Obstgehölzen um Resistenzen gegen bakterielle Erreger wie Feuerbrand, gegen Pilzerkrankungen wie Apfelschorf oder Mehltau sowie gegen Viren.**
- **Bäume zur Entgiftung von belasteten Böden an ehemaligen Bergbau- oder Chemiestandorten. Mit Hilfe der Gentechnik soll hierbei die natürliche Fähigkeit der Bäume, Schwermetalle durch chemische Reaktionen zu „entgiften“ und in ihren Blättern zu lagern, verbessert werden.**

Übertragung neuer Gene: Höhere Genauigkeit und möglichst ohne Markergene

Zahlreiche Projekte der biologischen Sicherheitsforschung beschäftigten sich damit, die Präzision bei der Übertragung und Integration neuer Gene zu verbessern. Diese Projekte zielten darauf, ausschließlich das gewünschte Gen langfristig in die Zielpflanze zu übertragen und zusätzliche DNA-Abschnitte wie Markergene wieder zu entfernen. Außerdem sollte der Ort im Erbgut, an dem das neue Gen eingebaut wird, möglichst bekannt und gut charakterisiert sein.

Prof. Reinhard Hehl von der Technischen Universität Braunschweig leitete sechs Jahre lang den Forschungsverbund „Optimierung der biologischen Sicherheit transgener Pflanzen". Im Gespräch mit bioSicherheit.de zieht er Bilanz.

Prof. Dr. Reinhard Hehl, Institut für Genetik, Technische Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig. Er koordinierte das Verbundprojekt „Optimierung der biologischen Sicherheit transgener Pflanzen".

bioSicherheit: In den letzten zehn Jahren gab es zahlreiche Forschungsprojekte, in denen die Methoden zur Übertragung neuer Gene in Pflanzen weiterentwickelt wurden. Der stabile Einbau der Transgene, also der übertragenen Fremdgene, und die Entfernung von Markergenen waren dabei wichtige Fragestellungen. Können Sie eine Bilanz ziehen? Wo wurden Fortschritte erzielt, wo sehen Sie noch Schwächen?

Reinhard Hehl: Für die Übertragung neuer Gene in Pflanzen steht uns die Transformation mit Agrobakterien als ein sehr präzises Verfahren zur Verfügung. Dabei können wir die gewünschten Transgene heute wesentlich präziser als noch vor 15 Jahren übertragen. Fortschritte wurden auch bei der Entwicklung spezieller Methoden zur Markergen-Entfernung gemacht. Außerdem konnte das Spektrum an transformierbaren Pflanzenarten wesentlich erweitert werden. Schwächen sehe ich dort, wo Methoden, die in Modellpflanzen gut etabliert wurden, in Nutzpflanzen nicht oder nur suboptimal funktionieren.

bioSicherheit: Bis 2008 nahm die Entfernung von Markergenen einen besonderen Schwerpunkt in Ihrem Forschungsverbund ein. Gibt es dafür jetzt praxisreife Ansätze und werden diese auch genutzt?

Reinhard Hehl: Ja – die Erzeugung markergenfreier Pflanzen ist mittlerweile Stand der Technik. Ein sehr erfolgversprechender Ansatz ist die Co-Transformation. Das Prinzip beruht darauf, dass Transgen und Markergen getrennt voneinander in das pflanzliche Genom, also das Erbgut, übertragen und folglich auch an unterschiedlichen Stellen eingebaut werden. Auf diese Weise sind die Chancen sehr hoch, dass die beiden Gene später während der Reifeteilung der Zellen getrennt werden und in der nächsten Generation Pflanzenlinien selektiert werden können, die nur noch das Transgen tragen. Diese Methode ist bereits etabliert und sicher die am häufigsten angewendete Methode zur Markergen-Entfernung bei gut transformierbaren Pflanzen.

bioSicherheit: Gibt es noch weitere Methoden, Markergen-freie Pflanzen zu erzeugen?

Reinhard Hehl: Da sind vor allem zwei Methoden zu erwähnen. Die eine Methode beruht darauf, das Markergen mit Hilfe spezieller Enzyme aus dem Genom wieder „herauszuschneiden". Die andere Methode beruht auf einem sogenannten Transposon-System. Wir nutzen hier ein bekanntes Phänomen. Es gibt genetische Elemente in der Pflanze, die bestimmten Genen zum „Springen" in einen anderen Genomabschnitt verhelfen. Wir übertragen Transgen und Markergen gemeinsam und sorgen anschließend dafür, dass das Transgen an eine andere Stelle des Genoms „springt" und auf diese Weise vom Markergen getrennt wird. Auch hier können dann in der Folgegeneration die Markergen-freien von den Markergen-tragenden Pflanzen getrennt werden.

Das konnten wir am Beispiel der Zuckerrübe zeigen. Es gibt damit, auch Dank des Forschungsverbundes, heute genügend Methoden, Markergene aus transgenen Pflanzen zu entfernen.

Genübertragung und Markergene

Eine der am häufigsten angewandten Methoden, um gentechnisch veränderte Pflanzen zu erzeugen, ist die Genübertragung mit Agrobakterien. Diese besitzen die natürliche Fähigkeit, genetische Informationen in Pflanzenzellen zu transportieren und in das Genom einzubauen.

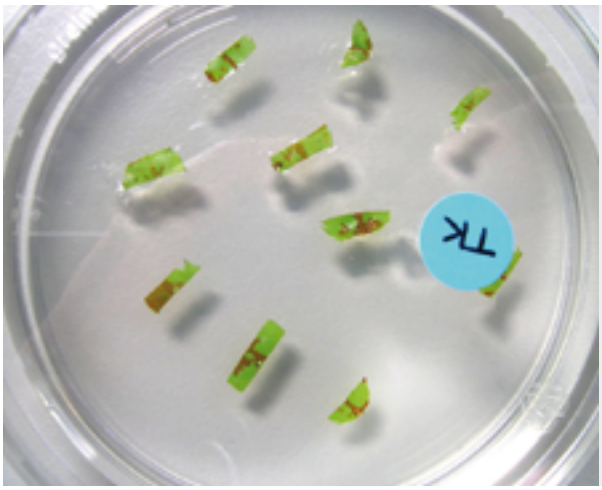
Um festzustellen, ob die Übertragung eines Gens erfolgreich war, benötigt man ein Markergen. Es wird zusammen mit dem Zielgen übertragen und verleiht den Pflanzen eine zusätzliche Eigenschaft, mit deren Hilfe man sie leicht erkennen kann. Meistens benutzt man dafür Gene, die eine Resistenz gegen ein Antibiotikum vermitteln.

Immer wieder wurden Befürchtungen laut, bei der biologischen Zersetzung gentechnisch veränderter Pflanzen könnten Markergene von Bodenbakterien aufgenommen werden und so zur Verbreitung von Antibiotikaresistenzen beitragen. Wissenschaftliche Untersuchungen haben jedoch gezeigt, dass die Aufnahme von freier DNA durch Bodenbakterien äußerst unwahrscheinlich ist. Zudem sind natürliche Antibiotikaresistenzen in Bodenbakterien nicht selten.

Dennoch wird an Methoden gearbeitet, die eine Entfernung der Markergenen ermöglichen und somit in Zukunft jedes Restrisiko vermeiden.

bioSicherheit: In den letzten Jahren wurde in Ihrem Forschungsverbund verstärkt an der Weiterentwicklung der sequenzspezifischen Integration gearbeitet. Was muss man sich darunter vorstellen?

Reinhard Hehl: Gene sollen in Zukunft genau dort eingebaut werden, wo wir sie haben wollen, das heißt an spezifischen, vorher gut charakterisierten Stellen im Genom. Damit erreicht man zum Beispiel, dass unerwünschte Mutationen ausgeschlossen werden und dass das Transgen an seiner Integrationsstelle optimal abgelesen wird.



Antibiotikaresistenzgene werden oft zusätzlich zu dem eigentlichen „Zielgen“ in die Pflanzen übertragen. Nach der gentechnischen Transformation wird das Pflanzenmaterial (hier: Apfel) auf Antibiotika-haltigen Nährboden gelegt. Darauf können nur die Pflanzenzellen überleben und wachsen, die erfolgreich transformiert wurden, weil sie eine Antibiotika-Resistenz besitzen.

bioSicherheit: Mit welchen Methoden kann man das erreichen?

Reinhard Hehl: Da gibt es zwei Ansätze. Beide nutzen die Rekombination. Das ist ein Mechanismus, der in allen lebenden Organismen vorkommt und mit dem ähnliche oder identische DNA-Abschnitte im Genom gegeneinander ausgetauscht werden. Wenn ein neues Gen an einer ganz bestimmten Stelle im Pflanzengenom eingebaut werden soll, kann man das im Prinzip dadurch erreichen, dass man es in eine DNA-Sequenz einbettet, die auch an der gewünschten Stelle im Pflanzengenom zu finden ist. Dann kann es zum Austausch der ähnlichen DNA-Stücke kommen, und auf diese Weise wird das Transgen genau dort eingebaut, wo man es haben will. Der Haken dabei ist, dass solche Rekombinationsvorgänge bei Pflanzen relativ selten auftreten, deutlich seltener als bei Bakterien, Hefen oder auch Tieren.

bioSicherheit: Und wie wollen Sie dieses Problem dann lösen?

Reinhard Hehl: Zum einen kann man versuchen, die zelleigenen Rekombinationsvorgänge in Pflanzen zu stimulieren, damit sie häufiger stattfinden. Hier gibt es inzwischen Ergebnisse aus der Grundlagenforschung, aber eine praxisnahe Anwendung ist noch nicht abzusehen. Ein zweiter Ansatz nimmt Enzyme zur Hilfe, die eigentlich für Rekombinationsvorgänge in Bakterien zuständig sind. Diese Enzyme – sie heißen Rekombinasen – erkennen bestimmte DNA-Sequenzen, schneiden dort DNA-Abschnitte aus und fügen andere ein. Ein DNA-Abschnitt, der eingefügt werden soll, muss ebenfalls die Erkennungssequenz enthalten. Ziel der aktuellen Arbeiten ist es, solche Erkennungssequenzen an gut charakterisierten Orten im Pflanzengenom zu integrieren. Dann könnte man dort mit Hilfe von Rekombinasen jedes beliebige Transgen gezielt einbauen.

bioSicherheit: Wenn Sie ein Resümee über die noch offenen Fragen einer Optimierung von Gentransfermethoden ziehen, woran sollte im Rahmen der Sicherheitsforschung weiter gearbeitet werden?

Reinhard Hehl: Die Optimierung der Gentransformation ist in Zukunft sicher nicht die wichtigste Fragestellung der Sicherheitsforschung. Aber wenn es gelingt, neue Gene routinemäßig an bekannten und gut charakterisierten Orten im Genom zu integrieren, kann mit großer Wahrscheinlichkeit der Aufwand bei der Sicherheitsbewertung reduziert werden. Weitere Aspekte, die bisher bei molekulargenetischen Arbeiten zur Sicherheitsforschung nur unzureichend berücksichtigt wurden, sind die gewebespezifische Aktivität und das spontane Abschalten der Transgene. Man sollte in Zukunft zu erreichen versuchen, dass ein Transgen nur in den Teilen der Pflanze abgelesen wird, wo es tatsächlich benötigt wird, und man sollte die Möglichkeit haben, ein spontanes Abschalten des Gens, das sogenannte Silencing, zu verhindern.

bioSicherheit: Vielen Dank für das Gespräch.

Fremdgene „unter Verschluss“

Gentechnisch veränderte Pflanzen zur Gewinnung industrieller oder pharmazeutischer Stoffe sollen sich nicht in der Umwelt verbreiten. Ein gemeinsames Forschungsprojekt der Universität Rostock, TU München und LMU München entwickelt dafür eine geeignete Methode – die Plastidentransformation. In der Modellpflanze Petunie funktioniert diese Methode bereits. Nun soll diese Methode für Raps und Mais etabliert werden.

Mit gentechnischen Methoden übertragene Gene (sogenannte Transgene) gelangen normalerweise in die Zellkerne der Pflanzen und sind dann in jeder Zelle einer Pflanze enthalten. Somit enthalten auch die Pollen der gentechnisch veränderten Pflanzen die neuen Gene – und diese können auf andere Pflanzen in der Umgebung übertragen werden.

Um dies zu verhindern, haben die Forscher die Transgene an einem anderen Ort in der Pflanze untergebracht: In den Plastiden. Plastiden sind kleine abgeschlossene Gebilde innerhalb von Pflanzenzellen. Sie enthalten eigene Erbinformationen und haben spezielle Aufgaben. Zum Beispiel produzieren sie als grüne Chloroplasten Zucker aus Sonnenenergie und Kohlendioxid (Photosynthese). Bei vielen landwirtschaftlichen Nutzpflanzen enthält der Pollen keine Plastiden und damit können die gentechnisch in Plastiden übertragenen Gene nicht an andere Pflanzen mittels Pollenübertragung weitergegeben werden – sie sind damit „unter Verschluss“. Eine solche Methode nennt man Confinement (engl. „Einschließung“).

Petunien als Testfall

Im Freiland wollten die Wissenschaftler klären, wie zuverlässig diese Einschlussmethode bei einer Modellpflanze, der Petunie, funktioniert. Petunienpflanzen mit einem gentechnisch übertragenen Markergen („Spenderpflanzen“) wurden Reihe an Reihe in Nachbarschaft zu herkömmlichen Petunien („Empfängerpflanzen“) gepflanzt. Die Empfängerpflanzen wurden dann natürlich oder per Hand mit dem Pollen der gentechnisch veränderten Petunienpflanzen befruchtet. In den drei Jahren konnten über 700.000 Samen durch Handbestäubung mit dem Pollen gentechnisch veränderter Petunienpflanzen erzeugt werden. Knapp 100.000 Keimlinge aus diesen Samen wurden erfolgreich im Labor untersucht.

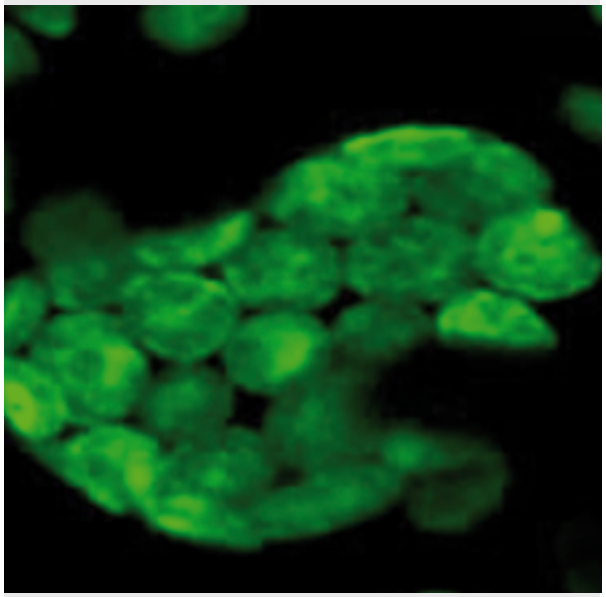
Wäre das Markergen der gentechnisch veränderten Petunien in den Samenkapseln vorhanden gewesen, wäre in diesen Fällen das Transgen in den Plastiden mit den Pollen übertragen worden. Dies konnten die Wissenschaftler aber in keinem Fall finden.
Zurzeit optimieren die Forscher die Methoden, um Transgene gezielt in die Plastiden von Raps- und Maispflanzen zu übertragen und damit diese biologische Einschlussmethode auch für diese wichtigen Kulturpflanzen verfügbar zu machen. Ob auch hier die Übertragung der Transgene auf andere Pflanzen zu 100 Prozent verhindert werden kann, muss noch überprüft werden.

Das Versuchsfeld: Die violett gefärbten Petunien sind die gentechnisch veränderten Pflanzen mit einem Markergen in den Plastiden. Die weißen Pflanzen sind die Empfängerpflanzen, mit deren Hilfe überprüft wird, ob eine Auskreuzung stattfindet.

Einfluss von Stressfaktoren auf einen zuverlässigen biologischen Einschluss

Wissenschaftler am Max-Planck-Institut in Potsdam haben einen weiteren Aspekt untersucht: Können durch Stressfaktoren wie extreme Klimabedingungen Transgene über den Pollen auskreuzen, obwohl sie in die Plastiden der Pflanzen übertragen wurden? Dazu sind Tabakpflanzen mit einem Reportergen in den Plastiden zum Zeitpunkt der Pollenbildung verschiedenen Stressbedingungen ausgesetzt worden (Hitze-, Trocken-, Hochlicht- und Kältestress). Mit den Pollen dieser Pflanzen haben die Wissenschaftler dann konventionelle Linien bestäubt. Erfolgt eine Vererbung der Transgene über Pollen, zeigen die Nachkommen unter UV-Licht fluoreszierende Blattbereiche.

Bei den meisten Stressbedingungen konnte keine Veränderung der Auskreuzungsrate im Vergleich zu Standardbedingungen festgestellt werden. Somit ist das Einbringen der Fremdgene in die Plastiden unter den meisten Stressbedingungen ein sehr gutes System, eine Auskreuzung zu verhindern.



Fluoreszierende Bereiche in den Blättern zeigen an, dass das Reportergen der gentechnisch veränderten Pflanzen auf konventionelle Pflanzen übertragen wurde.

Im Rahmen der biologischen Sicherheitsforschung wurden neben der Plastidentransformation noch weitere biologische Einschlussmethoden für Kulturpflanzen wie Raps und Mais sowie für Bäume entwickelt und getestet. Selbst Methoden, mit denen die Auskreuzung gentechnisch veränderter Pflanzen auf konventionelle Pflanzen in der Nachbarschaft nicht vollständig verhindert, aber sehr stark reduziert werden, sind dabei von Interesse. Die Koexistenz, also das Nebeneinander von landwirtschaftlichem Anbau mit und ohne gentechnisch veränderten Pflanzen, würde dadurch auf jeden Fall vereinfacht.

Männliche Sterilität bei Mais

Rispe einer männlich sterilen Maispflanze

Bestimmte Maissorten bilden natürlicherweise keinen befruchtungsfähigen Pollen. Die Fähigkeit, Pollen zu bilden, kann jedoch durch die Aktivität bestimmter Gene oder durch extreme Umweltbedingungen reaktiviert werden. Mitarbeiter des Julius Kühn-Instituts in Quedlinburg prüften die Stabilität verschiedener männlich steriler Maishybriden in unterschiedlichen Umweltbedingungen. Unter den getesteten Pflanzen war auch eine Linie, deren männliche Sterilität stabil war und deren Auskreuzungsrate in Nachbarfelder um 98 Prozent geringer war als bei herkömmlichen Maissorten. Diese Maislinie könnte dann genutzt werden, wenn eine Auskreuzung verringert werden soll, aber nicht zu 100 Prozent ausgeschlossen werden muss.

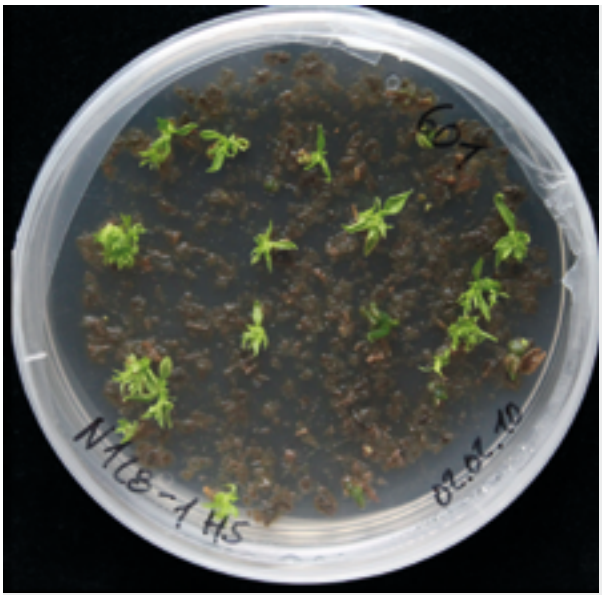
Gezieltes Ausschalten der Pollenbildung

Sterile frühblühende Pappel

Eine andere Möglichkeit, die Pollenbildung zu hemmen, ist die Nutzung von Genen, welche die Pollenentwicklung verhindern. Dazu wurde ein Gen aus der Weinrebe zusammen mit einem speziellen Steuerelement in die Pflanze eingebracht. Das Steuerelement lässt dieses Gen nur in solchen Pflanzenzellen aktiv werden, die für die Entwicklung der Pollen erforderlich sind. In den pollenbildenden Zellen entsteht ein Enzym, das die normale Pollenentwicklung verhindert. Dieses Sterilitätskonzept wurde am Johann Heinrich von Thünen-Institut in Großhansdorf an gentechnisch veränderten Pappeln überprüft. Nach den bisherigen Ergebnissen waren 70 Prozent der Blüten pollenfrei.

Transgen-freier Pollen nach Hitzeschock

Bei dieser Methode werden zunächst Pflanzen erzeugt, die das neue Gen in allen Pflanzenteilen enthalten und es auch über den Pollen an die Folgegeneration weitergeben. Zusätzlich enthalten die Pflanzen zwei spezielle Enzyme, die nach Wärmebehandlung einen zweistufigen Prozess einleiten, der letztlich dazu führt, dass während der Pollenentwicklung das Transgen aus dem reifen Pollen entfernt wird. Der Züchter führt daher die Wärmebehandlung am Ende des Züchtungsprozesses durch, nachdem er das Saatgut vermehrt hat. Die dann beim Landwirt aus diesem Saatgut hervorgehenden Pflanzen besitzen die neue gentechnisch vermittelte Eigenschaft, können sie aber nicht mehr über den Pollen an die Nachkommen weitergeben. Eine Auskreuzung ist damit unmöglich. Diese Methode wurde erfolgreich an der Universität Hamburg an Mais durchgeführt und wird am Johann Heinrich von Thünen-Institut zurzeit noch an Pappeln validiert.



Hitzebehandelte Blattstücke einer Pappel werden im Labor wieder zu ganzen Pflanzen „regeneriert“. In diesen Pflanzen ist eine Rekombinase aktiv, die Fremdgene aus dem Erbgut der Pollen herausschneiden kann.

Glossar

Agrobacterium tumefaciens

Weit verbreitetes Bodenbakterium, welches von Natur aus die Fähigkeit besitzt, Teile seines Erbmaterials in Pflanzenzellen zu übertragen. In der Gentechnik wird dies genutzt, um beliebige Fremdgene in Pflanzen einzuschleusen und damit gentechnisch veränderte Pflanzen zu erzeugen.

Anthere

Der Staubbeutel (Anthere) bildet zusammen mit dem Staubfaden (Filament) das sogenannte Staubblatt, den männlichen Teil einer Blüte. Bei den meisten Blütenpflanzen bestehen die Staubbeutel aus zwei Kammern, die jeweils zwei Pollensäcke enthalten. Darin reift der Pollen.

Amylose, Amylopektin (Stärke)

In den Stärkekörnern der Pflanzen liegt die Stärke in zwei unterschiedlichen Varianten vor: Amylose (20-30 Prozent) und Amylopektin (70-80 Prozent). Diese Varianten unterscheiden sich hinsichtlich der Verzweigung der Molekülketten. Interessant für eine technische Nutzung der Stärke in der Lebensmittel-, Papier- und chemischen Industrie ist in erster Line das stark verzweigte Amylopektin mit den charakteristischen Eigenschaften wie Wasserbindefähigkeit oder -löslichkeit. Amylopektin-Stärke eignet sich etwa für Kleister, Kleb- und Schmierstoffe. Auch Stärkezutaten in Lebensmitteln nutzen die Eigenschaften von Amylopektin.

Auskreuzung

Vererbung einer bestimmten Eigenschaft aus einer Individuengemeinschaft (Population, Kulturpflanzensorte) in eine andere. Die Auskreuzung, d. h. die Übertragung von Genen oder auch Transgenen, findet in der Regel durch die Übertragung von Pollen statt.

Bacillus thuringiensis (Bt)

Bodenbakterium, das verschiedene gegen Insekten wirksame Bt-Proteine enthalten kann; es wird als biologisches Schädlingsbekämpfungsmittel in der Land- und Forstwirtschaft und in der Bekämpfung von krankheitsübertragenden Stechmücken eingesetzt.

Bt-Protein, auch: Bt-Toxin

Ein Protein, das vom Bodenbakterium *Bacillus thuringiensis* gebildet wird und seit langem als biologisches Schädlingsbekämpfungsmittel eingesetzt wird. Es gibt ca. 170 natürlich vorkommende Bt-Proteine, die spezifisch gegen einzelne Insektengruppen wirksam sind. Mit Hilfe gentechnischer Verfahren können die aus Bt-Bakterien isolierten Wirkstoff-Gene auf Pflanzen übertragen werden. Auf diese Weise sind bei verschiedenen Kulturpflanzen gentechnisch vermittelte Insektenresistenzen erzeugt worden. Im Gegensatz zu vielen chemischen Insektiziden sind Bt-Proteine für den Menschen und die meisten Tierarten harmlos.

Chitinase

Ein Enzym, das Chitin (ein Zellwandbaustein der meisten Pilze) abbaut. Chitin übt bei verschiedenen wirbellosen Tieren (z. B. Insekten, Spinnen) ähnliche Stützfunktionen aus wie Cellulose bei Pflanzenzellen. Verschiedene Mikroorganismen können das Enzym Chitinase produzieren. Werden Chitinase-Gene in das Genom von Pflanzen übertragen, können diese krankheitserregende Pilze abtöten, indem sie das Chitin in deren Zellwand angreifen.

Confinement (biologisches Confinement)

Bei Pflanzen: Maßnahmen zur Begrenzung der Ausbreitungsfähigkeit von gentechnisch veränderten Pflanzen. Das kann z. B. durch eine Unterdrückung der Fortpflanzung erreicht werden. Mit konventioneller Züchtung oder mit Hilfe der Gentechnik können Pflanzen hergestellt werden, die nicht mehr in der Lage sind, Pollen zu produzieren, die keine Blüten ausbilden oder deren Samen steril sind. Ein alternativer Ansatz ist die gentechnische Übertragung neuer Gene in die Plastiden. Plastiden sind

Einheiten in der Pflanzenzelle, die über eigene DNA verfügen. Die meisten landwirtschaftlichen Nutzpflanzen vererben die Plastiden-DNA nur mütterlicherseits, d. h. nicht über den Pollen. Bei einer gentechnischen Veränderung der Plastiden befinden sich daher die neuen Gensequenzen wegen der besonderen Vererbung nicht im Pollen.

DNA / DNS

Bezeichnung für den chemischen Aufbau der Erbinformation. Die Bausteine der DNA bzw. DNS (engl.: *Desoxyribonucleic acid*, dt.: *Desoxyribonukleinsäure*) sind die sogenannten Nukleotide, die sich aus jeweils einem Zucker (Desoxyribose), einem Phosphat und einer Base zusammensetzen. Diese Bausteine bilden ein Riesenmolekül aus zwei Nukleotidsträngen, welches die Form einer Doppelhelix hat.

Endophyten

Pilze oder Bakterien, die im Innern von Pflanzen leben. Endophyten (griech. endo = innen, phyton = Pflanze) können den Pflanzenwirt schädigen, sie können aber auch in einer für beide Partner vorteilhaften Symbiose mit der Pflanze leben. Der Übergang zwischen diesen Zuständen ist dabei fließend – so kann es sein, dass ein Endophyt bei Schwächung der Pflanze eine Krankheit verursacht.

Freisetzung

Immer, wenn gentechnisch veränderte Pflanzen, Tiere oder Mikroorganismen außerhalb eines „geschlossenen Systems" – etwa Labor, Gewächshaus oder Produktionsanlage – absichtlich in die Umwelt ausgebracht werden sollen, liegt eine Freisetzung vor. Jede Freisetzung muss genehmigt werden; sie wird nur erlaubt, wenn Mensch und Umwelt nach dem Stand des Wissens nicht gefährdet werden. Für die Freisetzung gelten in allen EU-Ländern die gleichen gesetzlichen Vorschriften.

Fusarien

Der Befall mit dem Pilz der Gattung Fusarium ist weltweit die wichtigste Getreidekrankheit. Als natürlicher Bodenpilz baut er Pflanzenreste ab. Jedoch sind viele der Fusarien-Arten auch Pflanzenparasiten und bilden auf den Getreiden Schimmelpilzgifte (Mykotoxine). Die Sporen von Fusarium werden durch Tiere verbreitet. Der Verzehr von Mykotoxin-belastetem Getreide führt beim Menschen zu schweren Erkrankungen z. B. des Magen-Darm-Traktes. Durch Reinigungsmaßnahmen des Rohgetreides wird ein Teil des Toxins vor der Verarbeitung entfernt.

Fruktan

Fruktane ist der Sammelbegriff für eine Gruppe von Polysacchariden (Mehrfachzuckern), die alle fast ausschließlich aus Fructose (Fruchtzucker) bestehen. Zu der Gruppe der Fruktane gehören etwa Inuline, die vor allem in Chicorée, Zwiebeln, Artischocken oder Knoblauch gebildet werden. Inuline sind unverdauliche Ballaststoffe, sie fördern das Wachstum bestimmter Mikroorganismen im Darm, denen gesundheitsfördernde oder gar krankheitsvorbeugende Wirkungen zugeschrieben werden (probiotische Wirkung). Zumeist aus Chicorée gewonnene Inuline und andere Polyfructosen werden heute in Joghurts und Milchspeisen eingesetzt, um deren gesundheitlichen Wert zu erhöhen (*functional foods*).

Gen

Üblicherweise wird der Begriff Gen als ein definierter Abschnitt auf der DNA (engl.: *desoxyribonucleic acid*) verstanden. Im klassischen Sinn bedeutet der Begriff eine „Merkmalsanlage", die sich an einer bestimmten Stelle auf einem Chromosom (dem Genort oder Genlocus) befindet. Die Ausprägung eines Merkmals kann von mehreren Genen gesteuert werden, oder ein Gen beeinflusst verschiedene Merkmale. Der Mensch besitzt beispielweise etwa 30.000-40.000 Gene, die im Zellkern von jeder Körperzelle vorhanden sind.

Genom

Das gesamte Erbgut bzw. die Erbinformation eines Lebewesens. Die Erbinformation ist in den Genen eines Lebewesens gespeichert. Gene sind Abschnitte auf der DNA (engl.: *Desoxyribonucleic acid*). Das menschliche Genom mit 30.000 bis 40.000 Genen sowie das Genom von nahezu 100 weiteren Organismen – etwa der Maus mit ca. 30.000 Genen, der Fruchtfliege mit 13.000 und der Ackerschmalwand mit 25.000 – sind mittlerweile sequenziert.

Gentechnisch veränderter Organismus (GVO)

„Gentechnisch verändert" ist ein Organismus, dessen genetisches Material in einer Weise verändert worden ist, wie sie unter natürlichen Bedingungen durch Kreuzen oder natürliche Rekombination nicht vorkommt – so ähnlich beschreibt Artikel 2 der europäischen Freisetzungs-Richtlinie (2001/18/EG) einen GVO. Der Umgang mit GVO – etwa Freisetzung, Arbeiten in geschlossenen Systemen, Produktionsanlagen und Vermarktung – sind durch besondere Gesetze geregelt.

Gentransfer; horizontal und vertikal

Allgemein beschreibt der Begriff den Austausch genetischen Materials zwischen verschiedenen Lebewesen. Dabei wird zwischen dem vertikalen und horizontalen Gentransfer unterschieden.
Der vertikale Gentransfer, üblicherweise als Kreuzung bezeichnet, beschreibt den Gentransfer auf sexuellem Weg. Der horizontale Gentransfer ist die Weitergabe bzw. Aufnahme genetischen Materials außerhalb der sexuellen Fortpflanzungswege und unabhängig von bestehenden Artgrenzen.

Glufosinat

Glufosinat (ein Ammoniumsalz der Aminosäure Phosphinothricin) wird als Wirkstoff in Pflanzenschutzmitteln zur Unkrautkontrolle (Herbizide) eingesetzt. Seine Wirkung beruht auf der Hemmung des Enzyms Glutaminsynthetase. Dadurch reichert sich in den Pflanzenzellen das Zellgift Ammoniak an und die Pflanze stirbt ab.

Glukanase

Enzym, das Glukane abbaut. Glukane sind wichtige Stützsubstanzen in den Zellwänden von Pflanzen oder Pilzen. Sie gehören zu den Kohlehydraten. Chemisch bestehen sie aus den gleichen Grundbausteinen (Einfachzucker) wie Stärken, unterscheiden sich von diesen jedoch durch besondere Bindungsformen innerhalb der Moleküle. Viele Mikroorganismen bilden natürlicherweise Glukanasen. Mit diesen Enzymen können sie die Glukane in den Pflanzen aufschließen und als Nährstoffe verwerten.

Glyphosat

Glyphospat wird als Wirkstoff in Pflanzenschutzmitteln zur Unkrautkontrolle (Herbiziden) eingesetzt. Es hemmt das Enzym EPSP-Synthetase. Dieses Enzym wird zur Herstellung von lebenswichtigen aromatischen Aminosäuren benötigt. Können diese infolge der Einwirkung von Glyphosat nicht gebildet werden, stellt die Pflanze das Wachstum ein und stirbt nach drei bis sieben Tagen ab.

Hybride; Hybridsorte

Im biologischen Sinne ein Individuum, dass durch Kreuzung zweier genetisch weit entfernter Elternorganismen entstanden ist. Es kann sich bei den Eltern um Individuen verschiedener Arten oder auch um stark separiert gezüchtete Organismen einer „Inzuchtlinie" handeln, wie es in der Pflanzenzüchtung üblich ist.
Bei Pflanzensorten, die aus der Kreuzung von zwei definierten Inzuchtlinien hervorgehen, spricht man von Hybridsorten. Hybride haben den Vorteil, über die genetisch unterschiedlichen Eltern mit einem breiteren Repertoire verschiedener genetischer Informationen ausgestattet zu sein, wodurch sich die sogenannte Heterosis (Bastardwüchsigkeit) erklären lässt. Dieser Heterosis-Effekt lässt Pflanzen größer und widerstandsfähiger werden und wird daher in der Landwirtschaft bei vielen Kulturpflanzen genutzt. Bei Mais oder Zuckerrüben werden heute fast ausschließlich Hybridsorten angebaut.

Koexistenz

Als Koexistenz bezeichnet man das Nebeneinander eines landwirtschaftlichen Anbaus mit und ohne Gentechnik. Koexistenz ist ein zentraler Grundsatz in den europäischen Rechtsvorschriften zur Gentechnik. Es soll weiterhin auf Dauer möglich sein, landwirtschaftliche Produkte und Lebensmittel zu erzeugen, bei denen ausdrücklich auf Gentechnik verzichtet wird. Es muss also sichergestellt sein, dass gentechnisch veränderte Pflanzen sich nicht mit konventionell oder ökologisch erzeugten vermischen. Nach europäischem Gentechnikrecht sind geringfügige Spuren in der EU zugelassener gentechnisch veränderter Organismen (GVO) erlaubt.

Maiswurzelbohrer

Der Maiswurzelbohrer ist ein fünf bis acht Millimeter großer, schwarz-gelber Käfer. In seiner Heimat Nordamerika ist der Schädling für erhebliche Ernteeinbußen verantwortlich. Er wird deshalb dort auch der „Eine-Milliarde-Dollar-Käfer“ genannt. Anfang der 1990er wurde der Maiswurzelbohrer in Osteuropa eingeschleppt, einige Jahre später breitete er sich auch in Westeuropa aus. 2007 wurde er in Deutschland erstmals gesichtet.

Maiszünsler

Der Maiszünsler ist in Deutschland der wirtschaftlich bedeutendste Maisschädling. Die Larven dieses Kleinschmetterlings fressen zuerst an den Maisblättern und bohren sich später in den Stängel oder den Kolben der Maispflanze. Der Maiszünsler durchläuft in Deutschland nur eine Generation pro Jahr. Er überwintert in den Stoppeln und verpuppt sich im Mai. Der Schädling wurde um 1910 aus Europa in die USA verschleppt.

Mutation

Mutationen sind Änderungen im Genom, die an einer mehr oder weniger zufälligen Stelle stattfinden. Mutationen können spontan auftreten. Sie können aber auch künstlich erzeugt werden, z. B. in der Pflanzenzüchtung durch den Einsatz chemischer Stoffe oder ionisierender Strahlen.

Mykorrhizapilze

Mykorrhizapilze besiedeln Pflanzenwurzeln. Unter einer Mykorrhiza (altgriechisch; mykos = Pilz, rhiza = Wurzel) versteht man eine Symbiose von Pilzen und Pflanzenwurzeln. Wesentlich ist der gegenseitige Stoffaustausch.

Mykotoxine

Sammelbezeichnung für eine Gruppe hochgiftiger Stoffwechselprodukte, die von verschiedenen Schimmelpilzarten gebildet werden, etwa Aspergillen oder Fusarien. Fusarien sind Erreger von Pilzkrankheiten, die hauptsächlich Getreide und Mais befallen. Sie führen nicht nur zu Ernteausfällen, sondern können durch die Bildung von Mykotoxinen Futter- und Lebensmittel belasten. Fusarien-Toxine führen in akuten Fällen zu Erbrechen und Unfruchtbarkeit.

Nicht-Zielorganismus

Pflanzenschutzmaßnahmen „zielen“ immer auf bestimmte Organismen, die Kulturpflanzen schädigen können. Zielorganismen sind z. B. Unkräuter oder tierische Schädlinge. Ganz gleich, ob chemische Mittel oder biologischer Pflanzenschutz – jede Maßnahme soll möglichst nur gegen den Zielorganismus wirksam sein. Unerwünscht ist, dass auch Nicht-Zielorganismen von der Maßnahme betroffen sind. So sollen etwa keine Nützlinge geschädigt werden.

Nematode

Nematoden (Fadenwürmer) bilden die arten- und individuenreichste Gruppe unter den mehrzelligen Organismen im Boden und im Wasser. Es gibt eine große Anzahl Nematoden-Arten, die jeweils bestimmte Wirtspflanzen oder -tiere befallen und diese parasitieren. So sind etwa im Zuckerrübenanbau Rübenzysten-Nematoden gefürchtet. Dagegen sind freilebende, nicht parasitische Nematoden für die Funktionsfähigkeit von Böden von großer Bedeutung. Sie eignen sich deshalb als ökologische Indikatoren für die Bewertung des Einflusses von Pflanzenschutzmaßnahmen auf Bodenorganismen.

Nosema

Der Parasit *Nosema apis* ist der Erreger der Bienenseuche Nosemose. Diese hochansteckende Bienenkrankheit wird durch die mit der Nahrung aufgenommenen Sporen des Parasiten übertragen und führt zu schweren Schädigungen des Mitteldarms. Betroffen sind vorwiegend erwachsene Bienen. Die Sporen sind in jedem Bienenvolk latent vorhanden. Beim Zusammentreffen verschiedener ungünstiger Faktoren kann es zu einer massiven Vermehrung der Erreger kommen. Eine Bekämpfung ist schwierig, meist hilft nur eine umfangreiche Prophylaxe.

Protein, auch: Eiweiß

Aus Aminosäuren aufgebaute Moleküle, die Struktur und Funktion jeder lebenden Zelle bedingen. Als „Grundstoff des Lebens“ sind sie verantwortlich für die Form, den Aufbau der Zellen und für die biochemischen Prozesse des Stoffwechsels. Ein Mensch besitzt Hunderttausende verschiedener Proteine, gebildet aus nur zwanzig Aminosäuren, deren Abfolge im genetischen Code (DNA) festgelegt ist. Die Eigenschaften eines Organismus hängen wesentlich von der Art, Zusammensetzung und Struktur seiner Proteine ab.

Transformation

Bei der Transformation werden Gene, d. h. DNA, in einen Wirtsorganismus übertragen. Diese Gene wurden vorher aus einem Spenderorganismus (Bakterien, Pflanzen u. a.) isoliert. Eine erfolgreich durchgeführte Transformation hat eine gentechnisch veränderte Zelle zum Ergebnis.

Transgen

Gen, das mit gentechnischen Verfahren in das Erbgut eines Organismus eingebracht wurde. Vielfach wird der Begriff als Adjektiv für gentechnisch veränderte Organismen gebraucht, z. B. „transgene Pflanze“.

Zeaxanthin

Natürlicher Farbstoff, der vor allem in Pflanzen vorkommt. Er gehört zu der Gruppe der Carotinoide. Zeaxanthin ist essenzieller Bestandteil des gelben Fleckes (Makula) auf der Augen-Netzhaut. Eine erhöhte Aufnahme von Zeaxanthin könnte der altersbedingten Makula-Degeneration vorbeugen. Nicht selten führt diese Erkrankung zur Erblindung. Viele Carotinoide wirken als Antioxidantien. Ihnen wird daher eine vorbeugende Wirkung gegen Krebs und degenerative Krankheiten zugesprochen.

Wissenschaftliche Veröffentlichungen (Auswahl)

Mais

- Baumgarte S., Tebbe C.C. (2005) Field studies on the environmental fate of the Cry1Ab Bt-toxin produced by transgenic maize (MON810) and its effect on bacterial communities in the maize rhizosphere. Molecular Ecology 14:2539–2551
- Eckert J., Gathmann A., Schuphan I. (2003) Auswirkungen des Anbaus von Bt-Mais auf Nichtzielorganismen: Thripse und ihre Gegenspieler. Mitteilungen der Deutschen Gesellschaft für Allgemeine und Angewandte Entomologie 14:439-442
- Einspanier R., Lutz B., Rief St., Berezina O., Zverlov V., Schwarz W., Mayer J. (2004) Tracing residual recombinant feed molecules during digestion and rumen bacterial diversity in cattle fed transgene maize. European Food Research and Technology 218:269-273
- Felke M., Langenbruch G.A. (2001) Gefährdet Bt-Pollen Schmetterlinge? Gesunde Pflanzen 53:24-28
- Felke M., Langenbruch G.A. (2002) Gefährdet der Pollen von Bt-Mais unsere Schmetterlinge? – Untersuchungen an Erdeulenraupen (Agrotis segetum) und Tagpfauenaugen (Inachis io). Mitteilungen aus der Biologischen Bundesanstalt für Land- und Forstwirtschaft 390:324-325
- Felke M., Langenbruch G.A. (2003) Wirkung von Bt-Mais-Pollen auf Raupen des Tagpfauenauges im Laborversuch. Gesunde Pflanzen 55:1-7
- Felke M., Lorenz N., Langenbruch G.A. (2002) Laboratory studies on the effects of pollen from Bt-maize on larvae of some butterfly species. Journal of Applied Entomology 126:320-325
- Gathmann A., Wirooks L., Bartsch D., Schuphan I. (2003) Auswirkungen des Anbaus von Bt-Mais auf Nichtzielorganismen: Schmetterlingslarven in Unkrautstreifen. Mitteilungen der Deutschen Gesellschaft für Allgemeine und Angewandte Entomologie 14:427-430
- Höss S., Arndt M., Baumgarte S., Tebbe C., Nguyen H.T., Jehle J. (2008) Effects of transgenic corn and Cry1Ab protein on the nematode Caenorhabditis elegans. Ecotoxicology and Environmental Safety 70:334-340
- Höss S., Nguyen H.T., Menzel R., Pagel-Wieder S., Miethling-Graf R., Tebbe C.C., Jehle J.A., Traunspurger W. (2011) Assessing the risk posed to free-living soil nematodes by a genetically modified maize expressing the insecticidal Cry3Bb1 protein. Science of the Total Environment 409:2674-2684
- Hendriksma H.P., Härtel S., Babendreier D., von der Ohe W., Steffan-Dewenter I. (2012) Effects of multiple Bt-proteins and GNA-Lectin on in vitro reared honey bee larvae. Apidologie 43(5):549-560
- Hendriksma H.P., Härtel S., Steffan-Dewenter I. (2011) Testing pollen of single and stacked insect-resistant Bt-maize on in vitro reared honey bee larvae. PLoS ONE 6(12):e28174
- Hendriksma H.P., Härtel S., Steffan-Dewenter I. (2011) Honey bee risk assessment: new approaches for in vitro larvae rearing and data analyses. Methods in Ecology and Evolution 2:509-517
- Hendriksma H. P., Härtel S. (2010) A simple trap to measure worker bee mortality in small test colonies. Journal of Apicultural Research 49:215-217
- Kaiser-Alexnat R. (2009) Protease activities in the midgut of Western corn rootworm (Diabrotica virgifera virgifera LeConte). Journal of Invertebrate Pathology 100(3):169-174
- Kaiser-Alexnat R., Huber J., Büch W., Langenbruch G.A. (2009) Untersuchungen zur Verarbeitung der B.t.-Toxine Cry3Bb1 und Cry34Ab1/Cry35Ab1 im Mitteldarm des Westlichen Maiswurzelbohrers. Journal für Kulturpflanzen 61(6):185-200
- Kaiser-Alexnat R., Meise T., Langenbruch G.A., Hommel B., Huber J. (2005) Untersuchungen zur frühzeitigen Entdeckung einer Resistenzentwicklung des Maiszünslers (Ostrinia nubilalis) gegenüber dem Bt-Mais-Toxin Cry1Ab. Nachrichtenblatt des Deutschen Pflanzenschutzdienstes 57(7):144-151
- Kaiser-Alexnat R., Wagner W. (2007) Untersuchungen zur frühzeitigen Entdeckung einer Resistenzentwicklung des Maiszünslers (Ostrinia nubilalis) gegenüber dem B.t.-Mais-Toxin Cry1Ab und zur Aufklärung möglicher Resistenzmechanismen. Nachrichtenblatt des Deutschen Pflanzenschutzdienstes 59(12):302-309
- Kaiser-Alexnat R., Wagner W., Langenbruch G.A., Kleespies R.G., Keller B., Hommel B. (2004) European corn borer (Ostrinia nubilalis): Studies on proteinase activity and proteolytical processing of the B.t.-toxin Cry1Ab in transgenic corn. IOBC WPRS Bulletin 27(3):97-102

- Kaiser-Alexnat R., Wagner W., Langenbruch G.A., Kleespies R.G., Keller B., Meise T., Hommel B. (2005) Selection of resistant European Corn Borer (Ostrinia nubilalis) to B.t.-corn and preliminary studies for the biochemical characterization. IOBC WPRS Bulletin 28 (3):115-118
- Lang A., Ludy C., Vojtech E. (2004) Dispersion and deposition of Bt maize pollen in field margins. Journal of Plant Diseases and Protection 111:417-428
- Ludy C., Lang A. (2006) A 3-year field-scale monitoring of foliage-dwelling spiders (Araneae) in transgenic Bt-maize field and adjacent margins. Biological Control 38:314-324
- Ludy C., Lang A. (2006) Bt maize pollen exposure and impact on the garden spider, Araneus diadematus. Entomologia Experimentalis et Applicata 118(2):145–156
- Ludy C., Lang A. (2004) How to catch foliage-dwelling spiders (Araneae) in maize fields and their margins: a comparison of two sampling methods. Journal of Applied Entomology 128:501-509
- Lutz B., Wiedemann S., Einspanier R., Mayer J., Albrecht C. (2005) Degradation of Cry1Ab-protein from genetically modified maize in the bovine gastrointestinal tract. Journal of Agricultural and Food Chemistry 53:1453-1456
- Lutz B., Albrecht C., Meyer H.H.D. (2005) Transgene Futtermittel – Einfluss auf die Milchqualität? Deutsche Molkerei Zeitung 126:30-33
- Lutz B., Wiedemann S., Albrecht C. (2006) Degradation of transgenic Cry1AB DNA and protein in Bt-176 maize during the ensiling process. Journal of Animal Physiology and Animal Nutrition 90:116-123
- Meissle M., Lang A. (2005) Comparing methods to evaluate the effects of Bt maize and insecticide on spider assemblages. Agriculture, Ecosystems & Environment 107:359-370
- Miethling-Graff R., Baumgarte S., Tebbe C.C. (2010) Release of the recombinant Cry3Bb1 protein of Bt maize MON88017 into field soil and detection of effects on the diversity of rhizosphere bacteria. European Journal of Soil Biology 46:41-48
- Nguyen H.T., Jehle J.A. (2007) Quantitative analysis of the seasonal and tissue-specific expression on Cry1Ab in transgenic maize Mon810. Journal of Plant Diseases and Protection 114 (2):82-87
- Nguyen H.T., Hunfeld H., Meissle M., Miethling-Graff R., Pagel-Wieder S., Rauschen S., Zubruegg C., Eber S., Tebbe C.C., Jehle J.A. (2008) Round robin quantitation of Cry3Bb1 using the qualitative PathoScreen™ ELISA. IOBC WPRS Bulletin 33:59-66
- Nguyen H.T., Jehle J.A. (2009) Expression of Cry3Bb1 in transgenic corn MON88017. Journal of Agricultural and Food Chemistry 57(21):9990–9996
- Pagel-Wieder S., Gessler F., Niemeyer J., Schröder D. (2004) Adsorption of the Bacillus thuringiensis toxin (Cry1Ab) on Na-montmorillonite and on the clay fractions of different soils. Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde, 167(2):184-188
- Pagel-Wieder S., Niemeyer J., Fischer R.W., Gessler F. (2007) Effects of physical and chemical properties of soils on adsorption of the insecticidal protein (Cry1Ab) from Bacillus thuringiensis at Cry1Ab protein concentrations relevant for experimental field sites. Soil Biology and Biochemistry 39(12):3034-3042
- Poerschmann J., Rauschen S., Langer U., Augustin J., Gorecki T. (2009) Fatty acid patterns of genetically modified Cry3Bb1 expressing Bt-maize MON88017 and its near-isogenic line. Journal of Agricultural and Food Chemistry 57(1):127-132
- Poerschmann J., Rauschen S., Langer U., Augustin J., Gorecki T. (2008) Molecular level lignin patterns of genetically modified Bt-maize MON88017 and three conventional varieties using tetramethylammonium hydroxide (TMAH)-induced thermochemolysis. Journal of Agricultural and Food Chemistry 56(24):11906–11913
- Rauschen S., Eckert J., Gathmann A., Schuphan I. (2004) Impact of growing Bt-maize on cicadas: Diversity, abundance and methods. IOBC WPRS Bulletin 27(3):137-142
- Rauschen S., Eckert J., Schaarschmidt F., Schuphan I., Gathmann A. (2008) An evaluation of methods for assessing the impacts of Bt-maize MON810 cultivation and pyrethroid insecticide use on Auchenorrhyncha (Planthoppers and Leafhoppers). Agricultural and Forest Entomology 10(4):331-339
- Rauschen S., Nguyen H.T., Schuphan I., Jehle J.A., Eber S. (2008) Rapid degradation of the Cry3Bb1 protein from Diabrotica-resistant Bt-corn MON88017 during ensilation and fermentation in biogas production facilities. Journal of the Science of Food and Agriculture 88:1709-1715

- Rauschen S., Schultheis E., Pagel-Wieder S., Schuphan I., Eber S. (2009) Impact of Bt-corn MON88017 in comparison to three conventional lines on Trigonotylus caelestialium (Kirkaldy) (Heteroptera: Miridae) field densities. Transgenic Research 18(2):203-214
- Ruhland M., Engelhardt G., Pawlizki K.H. (2000) Verbleib und Metabolismus von Glufosinat in transgenen, BASTA-resistenten Raps- und Maiszellen. Gesunde Pflanzen 52:248-253
- Ruhland M., Engelhardt G., Pawlizki K.H. (2002) A comparative investigation of the metabolism of the herbicide glufosinate in cell cultures of transgenic glufosinate-resistant and non-transgenic oilseed rape (Brassica napus) and corn (Zea mays). Environmental Biosafety Ressearch 1:29-37
- Schmalenberger A., Tebbe C.C. (2002) Bacterial community composition in the rhizosphere of a transgenic, herbicide-resistant maize (Zea mays) and comparison to its non-transgenic cultivar Bosphore. FEMS Microbiology Ecology 40:29-37
- Schuppener M., Mühlhause J., Rauschen S. (2012) Environmental risk assessment for the small tortoiseshell *Aglais urticae* and a stacked Bt-maize with combined resistances against Lepidoptera and Chrysomelidae in central European agrarian landscapes. Molecular Ecology (18):4646-62
- Zimmermann O. (2004) Der Einsatz von Trichogramma-Schlupfwespen in Deutschland: Zum aktuellen Stand der Forschung und Nutzung von Eiparasitoiden gegen Schadlepidopteren im biologischen Pflanzen- und Vorratsschutz. Gesunde Pflanzen 56:157-166
- Zimmermann O., Zhang G., Hassan S.A. (2004) Sicherheitsforschung zum Anbau von transgenen Pflanzen: Prüfung der Nebenwirkungen von Bt-Mais auf Mikrohymenopteren der Gattung Trichogramma (Hym., Trichogrammatidae). Mitteilungen der Deutschen Gesellschaft für Allgemeine und Angewandte Entomologie 14:431-434

Kartoffel

- Ahrenholtz I., Harms K., de Vries J., Wackernagel W. (2000) Increased killing of Bacillus subtilis on the hair roots of transgenic T4 lysozyme producing potatoes. Applied and Environmental Microbioly 66(5):1862-65
- Becker R., Behrendt U., Hommel B., Kropf S., Ulrich A. (2008) Effects of transgenic fructan-producing potatoes on the community structure of rhizosphere and phyllosphere bacteria. FEMS Microbiology Ecology 66:411–425
- Böhme H., Hommel B., Flachowsky G. (2005) Nutritional assessment of silage from transgenic inulin sythesizing potatoes for pigs. Journal of Animal and Feed Science 14, Suppl. 1:333-336
- Catchpole G.S., Beckmann M., Enot D.P., Mondhe M., Zywicki B., Taylor J., Hardy N., Smith A., King R.D., Kell D.B., Fiehn O., Draper J. (2005) Hierarchical metabolomics demonstrates substantial compositional similarity between genetically modified and conventional potato crops. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America 102(40):14458–14462
- de Vries J., Heine M., Harms K., Wackernagel W. (2003) Spread of recombinant DNA by roots and pollen of transgenic potato plants, identified by highly specific biomonitoring using natural transformation of an Acinetobacter sp. Applied and Environmental Microbiology 69:4455-4462
- de Vries J., Meier P., Wackernagel W. (2001) The natural transformation of the soil bacteria Pseudomonas stutzeri and Acinetobacter sp. by transgenic plant DNA strictly depends on homologous sequences in the recipient cells. FEMS Microbiology Letters 195:211-215
- de Vries J., Wackernagel W. (2002) Integration of foreign DNA during natural transformation of Acinetobacter sp. by homology-facilitated illegitimate recombination. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America 99:2094-2099
- Degenkolbe T., Hannah M.A., Freund S., Hincha D.K., Heyer A.G., Köhl K. (2005) A quality-controlled microarray method for gene expression profiling. Analytical Biochemistry 346(2):217-24
- Dong X., Meisel B., Block A., Graßmann J., Radl V., Weinert N., Meincke R., Berg G., Wenzel G., Schloter M., Molert V. (2011) Expression analysis of zeaxanthin epoxidase of genetically engineered zeaxanthin-rich potatoes in comparison to conventional cultivars under field conditions. Transgenic Plant Journal 5:35-42
- Flatken S., Ungewickell V., Menzel W., Maiss E. (2008) Construction of an infectious full-length cDNA clone of potato virus M. Archives of Virology 153(7):1385-1389

- Gschwendtner S., Esperschütz J., Buegger F., Reichmann M., Müller M., Radl V., Munch J.C., Schloter M. (2011) Effects of a genetically modified starch metabolism in potato plants on photosynthate fluxes into the rhizosphere and on microbial degraders of root exudates. FEMS Microbiology Ecology 76:564-575
- Gschwendtner S., Reichmann M., Müller M., Radl V., Munch J.C., Schloter M. (2010) Cultivar-dependent effects of different potato varieties on microbial communities involved in nitrogen mineralisation in the rhizosphere. Biology and Fertility of Soils 46:649-652
- Gschwendtner S., Reichmann M., Müller M., Radl V., Munch J.C., Schloter M. (2010) Effects of genetically modified amylopectin-accumulating potato plants on the abundance of beneficial and pathogenic microorganisms in the rhizosphere. Plant and Soil 335:413-422
- Heuer H., Kroppenstedt R.M., Lottmann J., Berg G., Smalla K. (2002) Effects of T4 lysozyme release from transgenic potato roots on bacterial rhizosphere communities are negligible relative to natural factors. Applied and Environmental Microbiology 68:1325-1335
- Hommel, B. (2010) Rückblick auf die mehrjährigen Feldversuche in Dahnsdorf (Land Brandenburg) zur Bewertung gentechnisch veränderter Kulturpflanzen für die Ziele des integrierten Pflanzenschutzes und der Koexistenz. Journal für Kulturpflanzen 62(9):341-351
- Knipp G, Honermeier B. (2006) Effect of water stress on proline accumulation of genetically modified potatoes (Solanum tuberosum L.) generating fructans. Journal of Plant Physiology 163(4):392-7
- Knipp G., Honermeier B. (2005) Fruktankartoffel - gesundheitsfördernde Ballaststoffe in neuartiger Knolle. Ernährungsumschau 52(7):272-275
- Lottmann J., Berg G. (2000) Phenotypic and genotypic characterization of antagonistic bacteria associated with roots of transgenic and non-transgenic potato plants. Microbiology Research 156(1):75-82
- Lottmann J., Heuer H., de Vries J., Mahn A., Düring K., Wackernagel W., Smalla K., Berg G. (2000) Establishment of introduced antagonistic bacteria in the rhizosphere of transgenic potatoes and their effect on the bacterial community. FEMS Microbiology Ecology 33:41-49
- Lottmann J., Heuer H., Smalla K., Berg G. (1999) Influence of transgenic T4 lysozyme-producing potato plants on potentially beneficial plant-associated bacteria. FEMS Microbiology Ecology 29:365-377
- Meincke R., Weinert N., Smalla K., Schloter M., Berg G. (2010) Development of a molecular approach to describe the composition of Trichoderma communities. Journal of Microbiological Methods 80:63-69
- Milling A., Smalla K., Maidl F., Schloter M., Munch J.C. (2004) Effects of transgenic potatoes with an altered starch composition on the diversity of soil and rhizosphere bacteria and fungi. Plant and Soil 266:23-39
- Rasche F., Lueders T., Schloter M., Schaefer S., Buegger F., Gattinger A., Hood C., Sessitsch A. (2009) DNA- based stable isotope probing enables the identification of active bacterial endophytes in potatoes. New Pytologist 181:802-807
- Schloter M. (2009). Soil microbes and soil quality - Definition of a monitoring strategy for the assessment of effects of genetically modified plants on soils. Gefahrstoffe - Reinhaltung der Luft 69:395-399
- Smalla K., Oros-Sichler M., Milling A., Heuer H., Baumgarte S., Becker R., Neuber G., Kropf S., Ulrich A., Tebbe C.C. (2007) Bacterial diversity of soils assessed by DGGE, T-RFLP and SSCP fingerprints of PCR-amplified 16S rRNA gene fragments: do the different methods provide similar results? Journal of Microbiological Methods 69(3):470-479
- Schubert J. (2006) Transgene Kartoffeln im Freilandversuch: Hält die Resistenz? Forschungs Report 1/2006:25-28
- Ulrich A., Becker R. (2006) Soil parent material is a key determinant of the bacterial community structure in arable soils. FEMS Microbiology Ecology 56(3):430-43
- Ulrich A., Hommel B., Becker R. (2007) Auswirkungen des Einsatzes gentechnisch veränderter Pflanzen auf eine nachhaltige Landwirtschaft. In: Köster B., Vogt M., van Saan-Klein B. (Herausgeber). Agro-Gentechnik im ländlichen Raum – Potenziale, Konflikte und Perspektiven. J.H.Röll Verlag, Band 22:149-161.
- Weinert N., Meincke R., Gottwald C., Heuer H., Schloter M., Berg G., Smalla K. (2010) Bacterial diversity on the surface of potato tubers in soil and influence of the plant genotype. FEMS Microbiology Ecology 74:114-123
- Weinert N., Meincke R., Gottwald C., Heuer H., Gomes N., Schloter M., Berg G., Smalla K. (2009) Rhizosphere communities of genetically modified zeaxanthin-accumulating potato plants and their parent cultivar differ less than those of different potato cultivars. Applied Environmental Microbiology 12(75):3859-3865

- Weinert N., Meincke R., Gottwald C., Radl V., Dong X., Schloter M., Berg G., Smalla K. (2010) Effects of genetically modified potatoes with increased zeaxanthin content on the abundance and diversity of rhizobacteria with in vitro antagonistic activity do not exceed natural variability among cultivars. Plant and Soil 326:437-452
- Weinert N., Meincke R., Schloter M., Berg G., Smalla K. (2010) Effects of genetically modified plants on soil microorganisms, in: Mitchell, R. (ed) Environmental Microbiology:235-258
- Weinert N., Piceno Y., Ding G., Heuer H., Berg G., Schloter M., Andersen G., Smalla K. (2011) PhyloChip hybridisation uncovered an enormous bacterial diversity in the rhizosphere of different potato cultivars: many common and few cultivar-dependent taxa. FEMS Microbiology Ecology 75:497-506

Raps

- Hommel B., Tirkot C. (2005) Rapsauskreuzung und Auftreten von Durchwuchsraps während eines 8-jährigen Freisetzungsversuches mit Glufosinat-resistentem Winterraps. Vorträge für Pflanzenzüchtung 67:181-187
- Mohr K.I., Tebbe C.C. (2006) Diversity and phylotype consistency of bacteria in the guts of three bee species (Apoidea) at an oilseed rape field. Environmental Microbiology 8:258-272
- Mohr K.I., Tebbe C.C. (2007) Field study results on the probability and risk of a horizontal gene transfer from transgenic herbicide-resistant oilseed rape pollen to gut bacteria of bees. Applied Microbiology and Biotechnology 75(3):573-582
- Saure C., Kühne S., Hommel B. (2001) Insekten als Pollenüberträger vom Raps auf andere Kreuzblütler: Ein Beitrag zur Risikobewertung transgener Pflanzen. Mitteilungen der Deutschen Gesellschaft für allgemeine und angewandte Entomologie, Bd. 13:265-268
- Saure C., Kühne S., Hommel B., Bellin U. (2003) Transgener, herbizidresistenter Raps – Blütenbesuchende Insekten, Pollenausbreitung und Auskreuzung. Agrarökologie 44:103
- Sick M., Kühne S., Hommel B. (2003) Transgener Rapspollen in der Bienennahrung – Teil einer Modelluntersuchung zur Wahrscheinlichkeit des horizontalen Gentransfers von Pflanzen auf Bakterien. Mitteilungen der Deutschen Gesellschaft für allgemeine und angewandte Entomologie. 14:423-426

Gehölze

- Flachowsky H., Hanke M.-V. (2009) Identification of cultivable bacteria from in vitro cultures of apple. Acta Horticulturae 814:733-738
- Flachowsky H., Hanke M.-V., Peil A., Strauss S.H., Fladung M. (2009) A review on transgenic approaches to accelerate breeding of woody plants. Plant Breeding 128:217-226
- Fladung M., Becker D. (2010) Targeted integration and removal of transgenes in hybrid aspen (Populus tremula L. x P. tremuloides Michx.) using site-specific recombination systems. Plant Biology 12:334-340
- Fladung M., Hönicka H. (2006) Mit sterilen Pappeln die Auskreuzung in forstliche Ökosysteme verhindern. ForschungsReport 1/2006:17-20
- Fladung M., Schenk T.M.H., Polak O., Becker D. (2010) Elimination of marker genes and targeted integration via FLP/FRT-recombination system from yeast in hybrid aspen (Populus tremula L. x P. tremuloides Michx.). Tree Genes Genomes 6:205-217
- Hättasch C., Flachowsky H., Hanke M.-V., Szankowski I., Wolff P., Waidmann S. (2009) Systemic acquired silencing of a gusA transgene in apple. Acta Horticulturae 839:393-396
- Hoenicka H., Fladung M. (2006) Faster evaluation of sterility strategies in transgenic early flowering poplar. Silva Genetica 55:241-292
- Hoenicka H., Lautner S., Klingberg A., Koch G., El-Sherif F., Lehnhardt D., Zhang B., Burgert I., Odermatt J., Melzer S., Fromm J., Fladung M. (2012) Influence of over-expression of the FLOWERING PROMOTING FACTOR 1 gene (FPF1) from Arabidopsis on wood formation in hybrid poplar (Populus tremula L. x P. tremuloides Michx.). Planta 235:359–373

- Hönicka H., Fladung M. (2006) Biosafety in Populus spp. and other forest trees: from non-native species to taxa derived from traditional breeding and genetic engineering. Trees 20:131-144
- Hönicka H., Nowitzki O., Hanelt D., Fladung M. (2008) Heterologous overexpression of the birch FRUIT-FULL-like MADS-box gene BpMADS4 prevents normal senescence and winter dormancy in Populus tremula L. Planta 227:1001–1011
- Kaldorf M., Fladung M., Muhs H.-J., Buscot F. (2002) Mycorrhizal colonization of transgenic aspen in a field trial. Planta 214:653-660
- Kaldorf M., Fladung M., Muhs H.-J., Buscot F. (2000) Interaktionen zwischen Mykorrhizapilzen und transgenen Bäumen. In: Ebert I. (Ed.) Freisetzung transgener Gehölze – Stand, Probleme, Perspektiven. Umweltbundesamt, Berlin:86-91
- Rathmacher G., Niggemann M., Köhnen M., Ziegenhagen B., Bialozyt R. (2010) Short-distance gene flow in P. nigra L. accounts for small-scale spatial genetic structures - implications for in-situ conservation measures. Conservation Genetics 11(4):1327-1338
- Rathmacher G., Niggemann M., Wypukol H., Gebhardt K., Ziegenhagen B., Bialozyt R. (2009) Allelic ladders and reference genotypes for rigorous standardisation of poplar microsatellite data. Trees -Structure and Function 23:573-583
- Schäfer T., Buscot F., Flachowsky H., Hanke M.-V., Kaldorf M., König S. (2009) First results on the effect of increased chitinase expression in transgenic apple trees on mycorrhization with Glomus intraradices and G. mosseae. Acta Horticulturae 839:719-724
- Schäfer, T., Hanke M.-V., Flachowsky H., König S., Peil A., Kaldorf M., Polle A., Buscot F. (2012) Chitinase activities, scab resistance, mycorrhization rates and biomass of own-rooted and grafted transgenic apple trees. Genetics and Molecular Biology 35(2):466-473
- Scherling C., Ulrich K., Ewald D., Weckwerth W. (2009) A metabolic signature of the beneficial interaction of the endophyte Paenibacillus sp. isolate and in vitro-grown poplar plants revealed by metabolomics. Molecular Plant-Microbe Interactions 22(8):1032-7
- Szankowski I., Flachowsky H., Li H., Halbwirth H., Treutter D., Regos I., Hanke M.-V., Stich K., Fischer T.C. (2009) Shift in polyphenol profile and sublethal phenotype caused by silencing of anthocyanidin synthase in apple (Malus sp.). Planta 229:681-692
- Szankowski I., Li H., Flachowsky H., Höfer M., Fischer T., Hanke M.V., Forkmann G., Treutter D., Schwab W., Hoffmann T. (2009) Metabolic engineering of flavonoid biosynthesis in apple (Malus domestica BORKH.). Acta Horticulturae 814:511-516
- Szankowski I., Waidmann S., El-Din Saad Omar A., Flachowsky H., Hättasch C., Hanke M.-V. (2009) RNAi-silencing of MdTFL1 induces early flowering in apple. Acta Horticulturae 839:633-636
- Tränkner C., Lehmann S., Hoenicka H., Hanke M.-V., Fladung M., Lenhardt D., Dunemann F., Gau A., Schlangen K., Malnoy M., Flachowsky H. (2011) Note added in proof to: Over-expression of an FT-homologous gene of apple induces early flowering in annual and perennial plants. Planta 233:217–218
- Tränkner C., Lehmann S., Hoenicka H., Hanke M.-V., Fladung M., Lenhardt D., Dunemann F., Gau A., Schlangen K., Malnoy M., Flachowsky H. (2010) Over-expression of an FT-homologous gene of apple induces early flowering in annual and perennial plants. Planta 232:1309-1324
- Ulrich K., Ewald D. (2008) „Probiotische“ Bakterien für Bäume? Bedeutung endophytischer Bakterien in Forstgehölzen. AFZ, Der Wald 63(20):1183-1185
- Ulrich K., Stauber T., Ewald D. (2008) Paenibacillus - a predominant endophytic bacterium colonising tissue cultures of woody plants. Plant Cell Tissue and Organ Culture 93(3):347-351
- Ulrich K., Ulrich A., Ewald D. (2008) Diversity of endophytic bacterial communities in poplar grown under field conditions. FEMS Microbiology Ecology 63(2):169-80
- Walter C., Fladung M., Boerjan W. (2010) The 20-year environmental safety record of GM trees. Nature Biotechnology 28:656-658
- Ziegenhagen B., Gneuss S., Rathmacher G., Leyer I., Bialozyt R., Heinze B., Liepelt S. (2008) A fast and simple genetic monitoring reveals the spread of poplar hybrids at a natural Elbe river site. Conservation Genetics 9:373-379

Getreide (außer Mais)

- Horvath H., Huang J., Wong O., Kohl E., Okita T., Kannangara C.G., von Wettstein D. (2000) The production of recombinant proteins in transgenic barley grains. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America 97:1914-1919
- Kogel K.-H., Voll L.M., Schäfer P., Jansen C., Wuc Y., Langen G., Imani J., Hofmann J., Schmiedl A., Sonnewald S., von Wettstein D., Cook J., Sonnewald U. (2010) Transcriptome and metabolome profiling of fieldgrown transgenic barley lack induced differences but show cultivar-specific variances. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America 107:6198-6203
- Von Wettstein D., Mikhaylenko G., Froseth J.A., Kannangara C.G. (2000) Improved barley broiler feed with transgenic malt containing heat-stable (1,3-1,4)-beta-glucanase. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America 97:13512-12517
- Von Wettstein D., Warner J., Kannangara C.G. (2003) Supplements of transgenic malt or grain containing (1,3-1,4)- glucanase increase the nutritive value of barley-based broiler diets to that of maize. British Poultry Science 44:438-449

Gentransferoptimierung

- Fladung M., Schenk M.H.T., Polak O., Becker D. (2009) Elimination of marker genes and targeted integration via FLP/FRT recombination system from yeast in hybrid aspen (Populus tremula L. P. tremuloides Michx.). Tree Genetics & Genomes 6(2):205-217
- Goedeke S., Hensel G., Kapusi E., Gahrtz M., Kumlehn J. (2007) Transgenic barley in fundamental research and biotechnology. Transgenic Plant Journal 1:104-117
- Hensel G., Valkov V., Middlefell-Williams J., Kumlehn J. (2008) Efficient generation of transgenic barley: the way forward to modulate plant-microbe interactions. Journal of Plant Physiology 165(1):71-82
- Hinze A., Becker D. (2012) Next generation biotechnology: how sophisticated constructs lead to further insights and new approaches towards biotechnology's demands. iForest 5:131-137
- Puchta H. (2005) The repair of double-strand breaks in plants: mechanisms and consequences for genome evolution. Journal of Experimental Botany 56(409):1-14

Monitoring

- Böttinger P., Schiemann J. (2008) Data acquisition by farm questionnaires – progress, problems and prospects. Journal für Verbraucherschutz & Lebensmittelsicherheit 2(1):52-55
- Schmidt K., Wilhelm R., Schmidtke J., Beißner L., Mönkemeyer W., Böttinger P., Sweet J., Schiemann J. (2008) Farm questionnaires for monitoring genetically modified crops: a case study using GM maize. Environmental Biosafety Research 7:163-179

Diese Druckschrift wird im Rahmen der Öffentlichkeitsarbeit vom Bundesministerium für Bildung und Forschung unentgeltlich abgegeben. Sie ist nicht zum gewerblichen Vertrieb bestimmt. Sie darf weder von Parteien noch von Wahlwerberinnen/Wahlwerbern oder Wahlhelferinnen/ Wahlhelfern während eines Wahlkampfes zum Zweck der Wahlwerbung verwendet werden. Dies gilt für Bundestags-, Landtags- und Kommunalwahlen sowie für Wahlen zum Europäischen Parlament.
Missbräuchlich ist insbesondere die Verteilung auf Wahlveranstaltungen und an Informationsständen der Parteien sowie das Einlegen, Aufdrucken oder Aufkleben parteipolitischer Informationen oder Werbemittel. Untersagt ist gleichfalls die Weitergabe an Dritte zum Zwecke der Wahlwerbung.
Unabhängig davon, wann, auf welchem Weg und in welcher Anzahl diese Schrift der Empfängerin/dem Empfänger zugegangen ist, darf sie auch ohne zeitlichen Bezug zu einer bevorstehenden Wahl nicht in einer Weise verwendet werden, die als Parteinahme der Bundesregierung zugunsten einzelner politischer Gruppen verstanden werden könnte.

Impressum

Herausgeber
Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF)
Referat 617 – Bioökonomie
10117 Berlin / 53170 Bonn

Bestellungen
schriftlich an den Herausgeber
Postfach 30 02 35
53182 Bonn
oder per
Tel.: 01805 – 262 302
Fax: 01805 – 262 303
(0,14 Euro/Min. aus dem deutschen Festnetz)
E-Mail: books@bmbf.bund.de
Internet: http://www.bmbf.de

Stand
Dezember 2014 (2. inhaltlich unveränderte Auflage)

Redaktion
Klaus Minol, Gabriele Völcker (genius GmbH, Darmstadt)
Heike Baron, Sigrid Fuhrmann, Gerd Spelsberg
(i-bio Information Biowissenschaften, Aachen)

Gestaltung
Piva & Piva (Studio für visuelles Design, Darmstadt)

Druck
WIRmachenDRUCK GmbH, Backnang

Bildnachweis/Nähere Informationen
Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (S. 30), Bundesanstalt für Forst- und Holzwirtschaft (S. 35), Helmholtz Zentrum München (S. 26 links), ©iStock.com/sshepard (S. 18 Mitte), ©iStock.com/Henrik_L (S. 21 zweites Bild von oben), ©iStock.com/Difydave (S. 27 rechts oben), Julius Kühn-Institut (S. 5, S. 25 rechts, S. 27 rechts unten, S. 34, S. 37, S. 40 rechts), Ludwig-Maximilian-Universität München (S. 7), Martin Felke (S. 20 drittes Bild von oben), Mihaly Czepko (S. 15 unten rechts), RWTH Aachen (S. 17 links und rechts unten), Sven Kreutz (S. 27 links), Technische Universität München (S. 26 rechts), Thünen Institut (S. 40 links, S. 41), Universität Bielefeld (S. 21 unten), Universität Braunschweig (S. 36), Universität Gießen (S. 32 links oben), Universität Hohenheim (S. 28, 29), Universität Trier (S. 11 unten rechts), Universität Würzburg (Titel, S. 18 oben, S. 19), übrige Fotos: Projekt bioSicherheit (i-bio Information Biowissenschaften/genius GmbH)