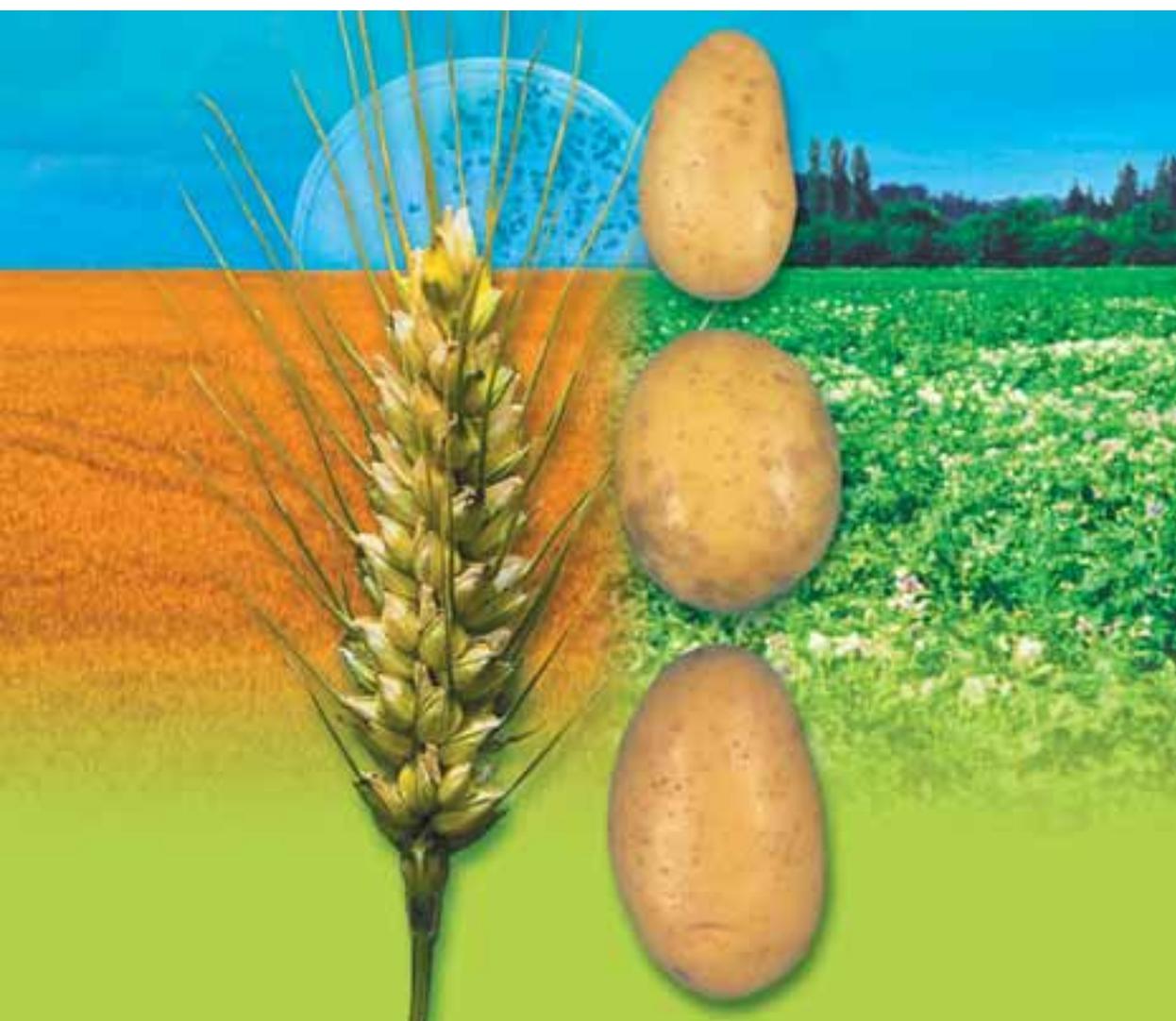


Pflanzenzüchtung

Von der klassischen Züchtung
bis zur Biotechnologie



Inhalt

Biokraftwerk Pflanze	3
Bedeutung der Pflanzenzüchtung	5
Klassische Sortenzüchtung	7
Neue Züchtungsmethoden	9
Gentechnik in der Diskussion	19
Glossar	22
Weiterführende Informationsquellen	23

Impressum

Herausgeber

Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL)
Vöttinger Straße 38, 85354 Freising
www.LfL.bayern.de

Bayerisches Staatsministerium
für Landwirtschaft und Forsten
Postfach 220012, 80535 München
www.stm.bayern.de

2. Auflage/Ausgabe 2006

Redaktion

Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL),
Institut für Pflanzenbau und Pflanzenzüchtung (IPZ)
Vöttinger Straße 38, 85354 Freising
IPZ@LfL.bayern.de

Autoren

Martin Müller, Gert Daniel, Peter Doleschel, Joachim Eder,
Stephan Hartmann, Markus Herz, Andreas Jungbluth,
Berta Killermann, Birte Krützfeldt, Sabine Mikolajewski,
Christine Papst, Helga Miehle, Michael Reichmann,
Günther Schweizer, Andrea Schwarzfischer, Stefan Seefelder,
Elisabeth Seigner, Gerhard Zimmermann

Bildnachweis

Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL),
Institut für Pflanzenbau und Pflanzenzüchtung (IPZ)
Flad & Flad Communication GmbH

Grafische Gestaltung

Flad & Flad Communication GmbH
Thomas-Flad-Weg 1, 90562 Heroldsberg b. Nürnberg
www.flad.de

Druck

Nova Druck Goppert GmbH
Andernacher Straße 20, 90411 Nürnberg

Biokraftwerk Pflanze

Grüne Pflanzen bilden die Grundlage des Lebens auf der Erde, da sie zur Photosynthese fähig sind. Sie bauen mit Hilfe von Sonnenenergie organische Materie auf. Bei diesem Prozess werden Kohlendioxid aus der Luft und Wasser aus dem Boden in Zucker umgewandelt und vor allem in Form von Stärke gespeichert; Sauerstoff wird freigesetzt (Abb. 1). Ohne diesen von den Pflanzen freigesetzten Sauerstoff in der Atmosphäre könnten weder Tiere noch Menschen auf der Erde leben.



Abb. 1: Summenformel der Photosynthese grüner Pflanzen

Die Pflanzenzelle

Die Pflanzenzelle ist die kleinste lebensfähige Einheit einer Pflanze. Pflanzliche Zellen übernehmen vielfältige Aufgaben im Rahmen der Energiegewinnung, der Stoffspeicherung, des Stofftransports sowie der Vermehrung. Alle Pflanzenzellen vermehren sich durch Zellteilung. Sie ist die Voraussetzung für Wachstum und Entwicklung des vielzelligen pflanzlichen Organismus sowie für seine ungeschlechtliche Vermehrung.

In den Geschlechtszellen der Blüten gehen aus Reifeteilungen Eizellen und Pollenzellen hervor. Im Zuge der geschlechtlichen Fortpflanzung vereinigen sich diese bei der Befruchtung zu einer Zelle mit neu kombinierter Erbinformation.

Abb. 2: Junge Pflanzenzelle



- 1** Die **Zellwand**: Sie besteht hauptsächlich aus Zellulose und bietet der Zelle mechanischen Schutz.
- 2** Die **Zellmembran**: Sie umschließt den Zellinhalt und ermöglicht durch Poren den Stoffaustausch mit ihren Nachbarzellen bzw. der Außenwelt.
- 3** Das **Zellplasma** umfließt und bewegt die Zellorganellen.
- 4** Die **Zellsaftvakuole** ist Speicherort oder Endlager für zahlreiche lösliche Stoffe wie Ionen von Mineralsalzen und verschiedene organische Stoffe wie z. B. Kohlenhydrate und sekundäre Pflanzenstoffe (z.B. Alkaloide).
- 5a** Die **Ribosomen** sind Nukleinsäure-Protein-Komplexe, an denen die Proteinbiosynthese stattfindet.
- 5b** Das **endoplasmatische Retikulum** ist ein System aus verzweigten Membranschläuchen, in denen die Speicherung und der Transport von Eiweißstoffen (Proteinen) stattfindet.
- 6** Der **Golgi-Apparat** ist ein System aus Membransäcken, in dem beispielsweise Sekrete gespeichert, in Membransäckchen (Vesikel) verpackt und abgegeben werden.

- 7a** Der **Zellkern** ist die Informations- und Steuerzentrale der Zelle. In ihm liegt das Erbmaterial, die DNA, in Form langer Fäden (Chromosomen) vor. Auf den Chromosomen befinden sich informationstragende Abschnitte, die Gene. Sie werden in Boten-RNA (mRNA) übersetzt, die als Bauplan für die Proteine durch die Kernporen wandert und zu den Ribosomen transportiert wird.
- 7b** Das **Kernkörperchen** (Nukleolus) im Inneren des Zellkerns liefert Bauteile (rRNA) für die Ribosomen.

- 8** **Chloroplasten** sind die Orte der Photosynthese. Mit ihrem Farbstoff Chlorophyll fangen sie Sonnenenergie ein und bilden damit aus dem Kohlendioxid der Luft und dem Wasser des Bodens Kohlenhydrate wie Zucker und Stärke. Dabei geben sie Sauerstoff ab.
- 9** In den **Mitochondrien**, den Kraftwerken der Zelle, laufen die letzten Schritte des Kohlenhydratabbaus zur Energiefreisetzung ab. Für diesen Vorgang der Zellatmung ist Sauerstoff nötig. Dabei werden Kohlendioxid und Wasser abgegeben. Die frei werdende Energie wird portionsweise in ATP-Molekülen gespeichert.
- 10** **Chromoplasten** sind Organellen, die zur Farbenpracht von Blüten und Früchten beitragen.

Pflanzen – Nahrung für Mensch und Tier

Pflanzen sind die Ernährungsgrundlage für Mensch und Tier. Bisher und auch in Zukunft muss eine Vielzahl von Kulturpflanzenarten in den unterschiedlichsten Klimazonen die Versorgung der Menschheit mit Nahrungsmitteln gewährleisten. Derzeit stehen weltweit etwa 1,5 Milliarden Hektar landwirtschaftlich genutzte Fläche zur Verfügung. Diese Fläche wird jedoch auf Grund von Erosion, Übernutzung, Versalzung, Urbanisierung (Zersiedelung), Ausweitung der Wüstengebiete etc. ständig vermindert. Um die steigende Zahl der Menschen mit Nahrung zu versorgen, ist deshalb eine dauerhafte Steigerung der Produktion durch eine effizientere Nutzung der bereits bewirtschafteten Flächen notwendig.

Besonders in Ländern der Dritten Welt mit hohem Bevölkerungswachstum und Nahrungsmangel werden verstärkt Kulturpflanzen benötigt, die trotz der dort häufig widrigen Standortbedingungen ertragreich sind. Das heißt, sie müssen Hitze, Dürre, hohe Salz- und Metallgehalte und Nährstoffarmut im Boden ertragen und widerstandsfähig gegen eine Vielzahl von Krankheiten und Schädlingen sein. Letztere Eigenschaften sind natürlich auch in den begünstigteren Agrarregionen wie Nordamerika und Mitteleuropa von Bedeutung. Schutz und Aufmerksamkeit muss aber auch die Umwelt erfahren. Mit robusten und widerstandsfähigen Kulturpflanzen können qualitativ hochwertige Nahrungsmittel umweltschonend, d. h. mit relativ geringem Produktionsmitteleinsatz, bereitgestellt werden.

Pflanzen – Rohstofflieferanten und Energiequelle

Pflanzen sind die einzigen Lebewesen auf der Erde, die in der Lage sind, Sonnenenergie dauerhaft in Form von Biomasse (z. B. Holz) zu speichern. Auch Erdöl, Kohle und Erdgas sind nichts anderes als in Millionen von Jahren durch Pflanzen in Form von Biomasse gesammelte Sonnenenergie, eingelagert unter der Erde.

Pflanzenbauer und Pflanzenzüchter stehen durch den Einsatz von Biomasse als Energiequelle vor einer neuen Herausforderung. War bislang die landwirtschaftliche Produktion auf die Verwendung als Nahrungs- und Futtermittel ausgerichtet, rückt nun eine optimale Ausnutzung der Pflanze als Energieträger in den Blickpunkt. Durch seine hohen Hektarerträge gilt Mais als eine besonders erfolgversprechende Feldfrucht zur Erzeugung von Biogas.

Summenformel der Photosynthese grüner Pflanzen

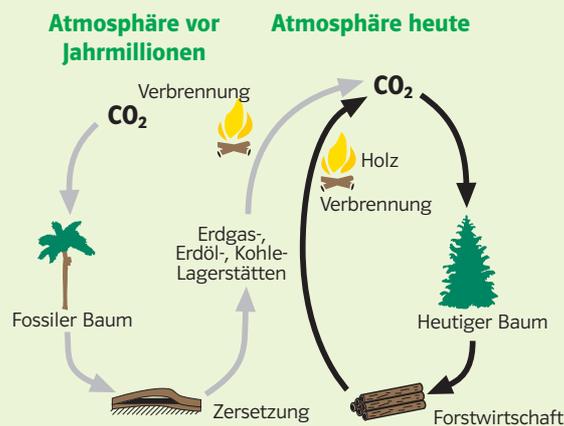


Abb. 3: Energiequelle pflanzliche Biomasse

Agenda 21: nachhaltige Entwicklung – sustainable development

Umweltschutz und Nahrungssicherung – die Ziele des Umweltgipfels von Rio de Janeiro (1992) – sind nur durch effiziente Züchtungsmaßnahmen zu erreichen. Die Erhaltung und die Weiterentwicklung der Genvielfalt im Pflanzenreich sind hierfür Voraussetzung.

Kyoto-Protokoll

Die Bedeutung der Pflanzenzüchtung und der Pflanzen als erneuerbare Energiequelle ist auch im 1997 verabschiedeten Kyoto-Protokoll der UN-Organisation United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC) festgeschrieben. Es ist eine völkerrechtlich verbindliche Vereinbarung, in der sich die jeweiligen Länder zu konkreten Reduzierungen der Treibhausgasemissionen bis 2012 verpflichten. Insgesamt soll zwischen 2008 bis 2012 eine Reduzierung um mindestens fünf Prozent gegenüber dem Niveau von 1990 erreicht werden. Dabei spielt die Förderung nachhaltiger landwirtschaftlicher Bewirtschaftungsformen unter Berücksichtigung von Klimaänderung und innovativen, umweltverträglichen Technologien wie der Pflanzenzüchtung und der Biotechnologie eine wichtige Rolle.

Bedeutung der Pflanzenzüchtung

Die Pflanzenzüchtung sorgt für die Grundvoraussetzung einer umweltverträglichen Produktion hochwertiger heimischer Nahrungsmittel und pflanzlicher Rohstoffe. Sie stellt der Landwirtschaft angepasste Sorten mit kontinuierlich verbesserten Resistenz- und Qualitätseigenschaften zur Verfügung. Unterstützt werden die klassischen Methoden der Pflanzenzüchtung heute durch biotechnologische Verfahren.

Die Erfolge der Pflanzenzüchtung in der Vergangenheit sind eindrucksvoll. So lässt sich z. B. die vierfache Steigerung der Ertragsleistung bei Weizen in den vergangenen 50 Jahren zu etwa 40 % der züchterischen Verbesserung der Sorten zuschreiben. Hatte in der Vergangenheit die Ertragssteigerung Vorrang, so stehen heute die Ertragssicherheit und die verwertungsgerechte Qualität als Zuchtziele im Vordergrund. Ertragssicherheit bedeutet, dass neue Sorten widerstandsfähig gegen eine Vielzahl von Schaderregern sein müssen, seien es Viren, Bakterien, Pilze oder tierische Schädlinge. Weitere Stressfaktoren, die nicht auf biologische Ursachen zurückzuführen sind, wie Hitze, Frost, Trockenheit, Nährstoffmangel, sind vom Züchter zusätzlich zu berücksichtigen. Da die Stress-Situationen in der Natur sehr unregelmäßig auftreten, muss mit „künstlichen“ Prüfmethoden im Feld, im Gewächshaus und im Labor gearbeitet werden, die solche Situationen simulieren. Erst dieser hohe Aufwand ermöglicht es, krankheits- und stressresistente Sorten zu selektieren, die den Anforderungen eines umweltgerechten Pflanzenbaus entsprechen, stabile und sichere Erträge bringen und den Aufwand an chemisch-synthetischen Pflanzenschutzmitteln minimieren helfen.

Auch für besondere Produktionssysteme wie z. B. den Ökologischen Landbau muss die Züchtung Sorten bereitstellen, die an diese Anbaubedingungen angepasst sind. Die Resistenz gegen verschiedene Stressfaktoren (z. B. Nährstoffmangel, Trockenheit) und Krankheiten oder Schädlinge hat hier im Vergleich zum konventionellen Anbau eine größere Bedeutung.

In der Qualitätszüchtung müssen sowohl die Ansprüche der Verbraucher als auch die der Verarbeiter der Nahrungsrohstoffe (zum Beispiel bei Weizen Müller und Bäcker) berücksichtigt werden. In dieser Beziehung haben die heimischen Züchter besondere Leistungen vorzuweisen. Die Tatsache, dass sie den Qualitätsgedanken immer hoch gehalten haben, hat es ermöglicht, dass heute z. B. unser gesamter Brotweizenbedarf aus heimischer Produktion gedeckt werden kann, während noch vor 30 Jahren ein Viertel des Bedarfs in Form von Weizen mit höchster Qualität aus Übersee importiert werden musste, um die hier erzeugten qualitätsschwachen Partien „aufzumischen“.

Aus einer Analyse der Rentabilität des staatlichen und privaten Pflanzenzüchtungssektors in Deutschland für den Zeitraum 1980 - 2000 geht hervor, dass sich der technische Fortschritt, der auf Forschungsaktivitäten zurückzuführen ist, hierzulande in den letzten 20 Jahren um durchschnittlich 1,5 % pro Jahr erhöht hat. Dies entspricht unter aktuellen Bedingungen einer potentiellen Erlössteigerung von über 600 Mio. Euro pro Jahr. Jeder Euro, der seit 1980 in die Pflanzenzüchtung investiert wurde, hat sich gesamtwirtschaftlich durchschnittlich nach 8 - 12 Jahren amortisiert und in jedem weiteren Jahr mit ca. 0,10 Euro verzinst.



Bedeutung der Pflanzenzüchtung

Pflanzenzüchtung – Von der Wildpflanze zur Kulturpflanze

Vor etwa 10.000 Jahren begann der Mensch die Erkenntnis zu nutzen, dass bestimmte pflanzliche Merkmale von einer Generation auf die andere weitergegeben werden:

Unterstützt durch Beobachtung und Erfahrung wurden besonders wertvolle Pflanzen, auf die erwünschten Merkmale hin ausgelesen und weitervermehrt. So wurden im Laufe der Jahrtausende Wildpflanzen zu den ertragssicheren und ertragreicheren Kulturpflanzen.

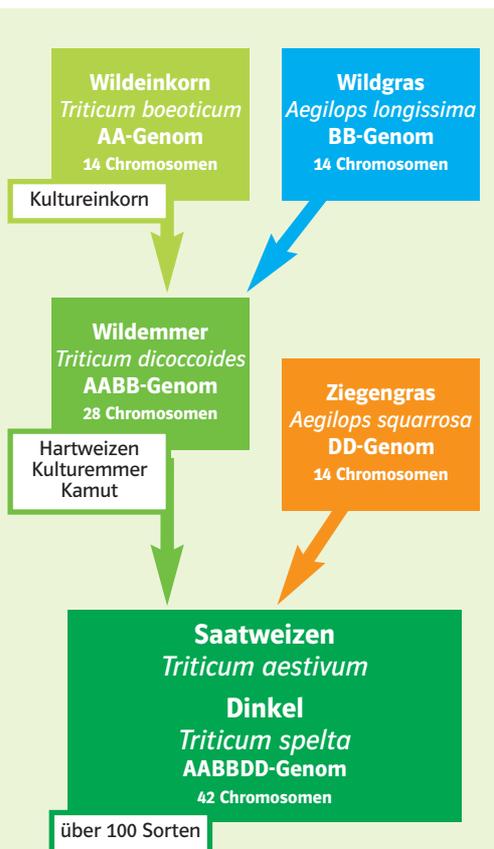


Abb. 4: Weizen – von der Wildpflanze zur Kulturpflanze

Die Natur sorgt durch stetige Veränderungen (Mutationen) im Erbgut einer Art dafür, dass immer wieder Individuen mit sehr unterschiedlichen Eigenschaften entstehen. Diese Mutationen können auf verschiedene Weise zustande kommen. Sie reichen von kleinsten Kopierfehlern auf der Ebene der DNA-Moleküle, bis zur Änderung der Chromosomenzahlen und Verschmelzung ganzer Chromosomensätze.

Letzteres soll am Beispiel des Weizens dargestellt werden, der zusammen mit Reis und Mais die weltweit wichtigste Nahrungspflanze darstellt.

Der heute bei uns angebaute Saatweizen ist aus der natürlichen Vereinigung der Chromosomensätze von drei Wildgräsern entstanden, die heute noch als selbständige Arten existieren. Die drei Weizenvorfahren (s. Abb. 4) haben jeweils $2 \times 7 = 14$ Chromosomen; die doppelten Chromosomensätze werden mit AA, BB und DD bezeichnet. Somit ist unser heutiger Weizen mit 42 Chromosomen der Zusammensetzung AABBDD ausgestattet.

Die Vereinigung der AABB- mit den DD-Chromosomen hat höchstwahrscheinlich im Bereich des „Fruchtbaren Halbmondes“ (Türkei, Irak, Iran) stattgefunden und kann etwa auf 8000 vor Christus datiert werden. Die Menschen dieser Zeit haben die günstigen Eigenschaften dieser „neuen“ Nahrungspflanze sicher schnell erkannt und genutzt. Zu der höheren Ertragsfähigkeit kam hinzu, dass aus dem neuen Getreide Brot gebacken werden konnte.

Jahr Beginn im Juni 2005 mit der Kreuzung

2006 F₁ Alle Pflanzen gleich

Handsaat,
ca. 20 Pflanzen pro Kreuzung

2007 F₂ Spaltungsgeneration

Einzelkornsaat
ca. 800 Pflanzen pro Kreuzung

2008 F₃ Reihensaart

40 – 60 Nachkommen von
selektierten Einzelpflanzen
pro Kreuzung
1 Reihe je selektierter Pflanzen

2009 F₄ Reihensaart

4 – 6 Nachkommen pro Kreuzung
aus den 40 – 60 F₃en

2010 F₅ Reihensaart und Parzellensaart

Pro selektierter Reihe in F₄
werden 12 Reihen in F₅ angebaut;
parallel 1. Ertragsprüfung mit
1 – 5 Kandidaten pro verbliebener
Kreuzung

2011 F₆ Reihensaart ähnlich F₅

Parallel dazu mehrortiger Anbau
in Parzellen

2012 F₇ – F₈ ähnlich F₆

bis Zunehmende Zahl von Prüferten,
2013 Erfassung aller Ertrags-, Qualitäts-
und Resistenzeigenschaften,
weitere Einschränkung der
Sortenkandidaten

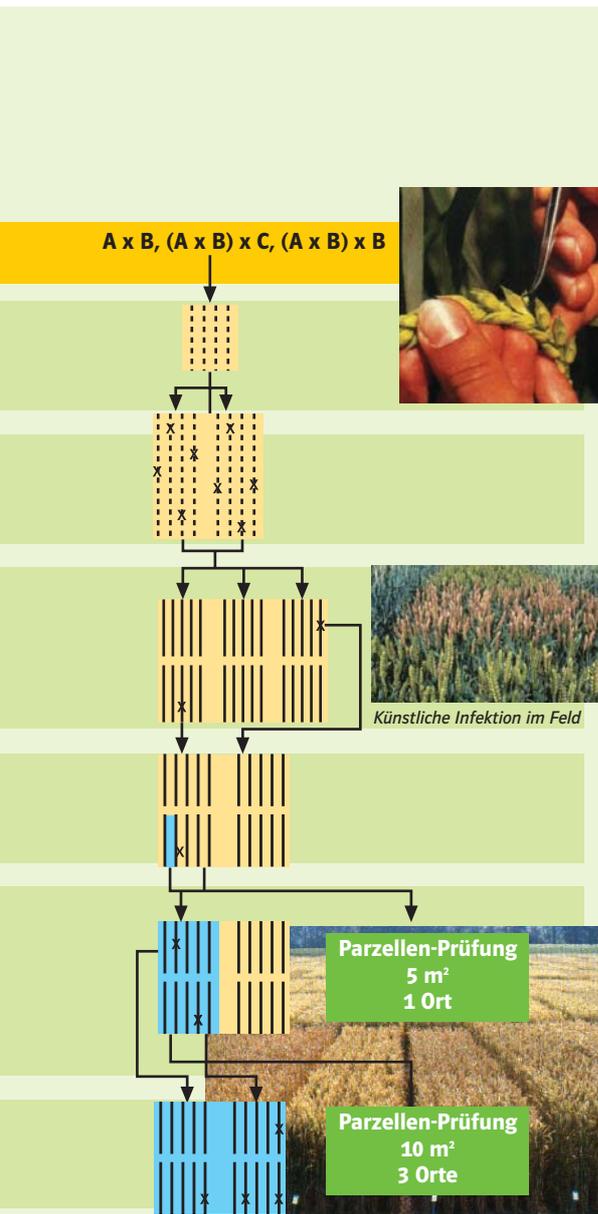
2014 bis 2016 10. – 12. Jahr Wertprüfung durch Bundessortenamt

Sortenschutz und -zulassung,
Sorte vertriebsfähig

2017 bis 2019 13. – 15. Jahr Prüfung in Landessortenversuchen auf regionale Anbauwürdigkeit

Abb. 5: Entstehung einer Weizensorte von der Ausgangskreuzung bis zur Sortenzulassung

Klassische Sortenzüchtung



1793 erkannte Christian Conrad Sprengel, dass die Übertragung von Pollen auf die Narbe einer Blüte für die Frucht- und Samenbildung notwendig ist. Nun konnte man Pflanzen durch manuelles Übertragen von Blütenstaub bewusst miteinander kreuzen.

Die Vererbungslehre von Gregor Mendel schließlich ermöglicht seit etwa 100 Jahren eine geplante und zielgerichtete Pflanzenzüchtung. Bei der heute überwiegend angewendeten Kombinationszüchtung wird das gesamte Erbgut (ca. 40.000 Gene) zweier Kreuzungseltern neu vermischt und nach den Mendelschen Gesetzen auf die Nachkommen verteilt. Diese werden anschließend über mehrere Generationen gezielt nach den gesuchten Merkmalskombinationen ausgelesen bis das vorher festgelegte Zuchtziel erreicht ist. Von der Festlegung eines Zuchtziels bis zum Anbau einer neuen Sorte durch den Landwirt vergehen durchschnittlich 15 Jahre.

Am Beispiel Weizen ist der typische Züchtungsgang in vereinfachter Weise in der Abbildung 5 dargestellt:

Die Kreuzungseltern (A, B, C) haben umfangreiche Prüfungen durchlaufen und der Züchter hat sich ein genaues Bild ihrer Merkmale gemacht. Die Kreuzung AxB (der Kreuzungspartner A ist die Mutterpflanze, B ist die Vaterpflanze) wird als Einfachkreuzung bezeichnet. (AxB)xC nennt man Einkreuzung oder Dreiweg-Kreuzung; hierbei soll durch Kreuzen der Hybridpflanzen (F1-Generation) aus der AxB-Kreuzung das Erbgut eines dritten Partners (C) hinzukombiniert werden. (AxB)xB nennt man Rückkreuzung; die Nachkommen enthalten zu 75 Prozent das Erbgut des Partners B. Eine oder mehrere Rückkreuzungen sind insbesondere dann erforderlich, wenn der Partner A als Spender einer ganz bestimmten Eigenschaft dienen soll, im Übrigen aber viele ungünstige Eigenschaften mitbringt. Das ungünstige Erbgut muss durch die Rückkreuzung „verdrängt“ werden. Da der Weizen Selbstbefruchter ist, sind die für die Kreuzung verwendeten Partner reinerbig und alle Pflanzen der ersten Nachkommen-Generation (F1) sind entsprechend dem 1. Mendel-Gesetz gleichförmig, so dass keine Selektion möglich ist. Diese setzt erstmals in der F2-Generation ein und wird, wie in

der Abbildung 5 gezeigt, über viele Generationen fortgeführt bis die angestrebte Merkmalskombination in Form der neuen Sorte dem Landwirt für den Anbau zur Verfügung steht.

Sehr eindrucksvoll kann der Züchtungserfolg am Beispiel der Kartoffel gezeigt werden. Die Kartoffeln in der obersten Reihe im Bild (Abb. 6) stellen verschiedene Wildtypen aus dem Ursprungsgebiet Südamerika dar. In der Reihe darunter sind Knollen zu erkennen, die schon rundlich, aber noch nicht sehr groß sind und viele tief sitzende Augen haben. Dies war der Stand der Züchtung in den Jahren von etwa 1920 bis 1960. Zu dieser Zeit mussten die für den menschlichen Verzehr bestimmten Kartoffeln auf Grund der tief sitzenden Augen sehr mühsam geschält werden. Inzwischen sind die Kartoffeln groß und rundoval bis lang, glattschalig und haben flache Augen. Mit dieser Form sind sie viel leichter zu waschen und zu schälen. In der Industrie und in Großküchen geschieht dies maschinell. Die Kartoffel wurde durch Züchtung an die Bedürfnisse des Menschen angepasst. Neben diesen optisch gut erkennbaren Verbesserungen wurden u. a. auch hinsichtlich Geschmack, Widerstandsfähigkeit und Lagerfähigkeit deutliche Verbesserungen erzielt.

Weltweit werden heute 5.000 verschiedene Kartoffelsorten kultiviert, über 200 davon allein in Deutschland.



Abb. 6: Züchtungserfolg bei Kartoffeln

Klassische Sortenzüchtung

Die **Hybridzüchtung** ist eine Weiterentwicklung der Kombinationszüchtung, die z.B. bei Mais und Raps sehr erfolgreich angewendet wird. Durch die Kreuzung zweier Inzuchtlinien, die selbst wenig ertragreich sind, entsteht Saatgut, aus dem sich hochertragreiche Pflanzen entwickeln können (Heterosiseffekt).

Bei Mais ist die Hybridzüchtung Standard. Aktuelles Zuchtziel ist die Entwicklung von Genotypen mit optimalem Methanbildungsvermögen, die zur Biogaserzeugung geeignet sind. Hierzu müssen Gene für späte Abreife, verbesserte Kältetoleranz, Reaktion auf Kurztagsbedingungen und Trockenstresstoleranz in adaptiertes europäisches Genmaterial eingeführt werden, um damit die Biomasseproduktion und die Energieleistung pro Flächeneinheit zu erhöhen.



Abb. 7: Maisanbau für die Erzeugung von Biogas

Ziel der klassischen Züchtung

ist die Entwicklung von Sorten mit:

- Resistenzen gegen Krankheiten und Schädlinge
- hoher Qualität
- hoher Ertragssicherheit und Ertragsleistung
- guter regionaler Anbaueignung

für eine umweltgerechte und nachhaltige Produktion von gesunden und qualitativ hochwertigen Nahrungsmitteln und Rohstoffen für die verarbeitende Industrie.

Erfolgreiche Pflanzenzüchtung in Bayern

Pflanzenzüchtung wird weltweit in großen Konzernen, bei uns aber auch in kleinen und mittelständischen Betrieben durchgeführt.

Seit Beginn der systematischen Pflanzenzüchtung in landwirtschaftlichen Betrieben wird diese in Bayern innovativ durch die angewandte Züchtungsforschung der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL) unterstützt. Aus der seit nahezu 100 Jahren gut funktionierenden Zusammenarbeit mit den mittelständischen Zuchtbetrieben konnte ein äußerst wertvoller Genpool für alle wichtigen landwirtschaftlichen Kulturpflanzen geschaffen werden, aus dem in großer Zahl ertragreiche Qualitätssorten mit vielfachen Resistenzeigenschaften entwickelt wurden und werden.

Heute überlässt die LfL die Ergebnisse der Züchtungsforschung zur weiteren Nutzung der Bayerischen Pflanzenzüchtungsgesellschaft (gegründet 1972), einem Zusammenschluss aller bayerischen Pflanzenzüchtbetriebe. Die schnelle Umsetzung der Forschungsergebnisse in marktgängige Sorten in den mittelständischen bayerischen Zuchtbetrieben unterstützt diese in ihrem Konkurrenzkampf mit den weltweit operierenden Unternehmen. Gleichzeitig werden innovative Arbeitsplätze im ländlichen Raum geschaffen und gesichert.

Neue Züchtungsmethoden

Die Biotechnologie einschließlich der Gentechnik eröffnet neue Möglichkeiten zur Verbesserung der Qualität, Ertragsleistung und Resistenz von Nutzpflanzen und stellt damit eine wichtige Unterstützung und Ergänzung konventioneller Verfahren der klassischen Züchtung dar.

Biotechnologie in der Pflanzenzüchtung

Zell- und Gewebekultur

- Mikrosporenkultur
- Embryokultur
- Gewebekultur
- Protoplastenkultur

Gentechnik

- Genomanalyse
- Gentransfer

Zell- und Gewebekultur

Zell- und Gewebekulturtechniken beruhen auf der einzigartigen Eigenschaft der Pflanzen, dass ihre lebenden Zellen, auch wenn sie bereits ausdifferenziert sind, weiterhin die Fähigkeit besitzen, sich zu teilen und eine komplette neue Pflanze mit identischer Erbinformation zu produzieren (Totipotenz). Das Regenerationsvermögen ist auch Voraussetzung für den Gentransfer.

Gewebekulturtechniken gehören zu den wichtigsten Instrumentarien bei der Erhaltung und Vermehrung identischen Pflanzenmaterials, wie es in der Züchtung häufig benötigt wird.

Prinzip der in vitro-Techniken:

- Totipotenz der Pflanzenzelle
- in vitro = im Glas
- Nährmedium als Wachstumsgrundlage
- sterile Bedingungen

Aus Gewebestücken, wie z. B. Sprosssegmenten oder Blattstückchen, können in mehreren Schritten ganze Pflanzen regeneriert werden. Dazu werden die Gewebestückchen im Reagenzglas (in vitro) auf Nährmedium gelegt und - wenn nötig - mit Wuchsstoffen (= Phytohormonen) in Kontakt gebracht, um die Organdifferenzierung (Wurzel, Stängel, Blatt) durch Wuchsstoffe im Medium regulierend zu beeinflussen.



Abb. 8: Regeneration von Pflanzen in vitro

Meristem-, Sprossspitzen- und Nodienkultur

Meristeme sind 0,2 - 0,5 mm große Gewebsabschnitte der äußersten Spross- und Wurzelspitzen sowie der Achselknospen (Nodien), in denen hohe Zellteilungsaktivität herrscht. Die Meristeme werden unter dem Mikroskop herauspräpariert und auf Nährmedium zu vollständigen Pflanzen regeneriert. Bei der Sprossspitzen- und Nodienkultur werden in vitro, ausgehend von ca. 1 cm großen Gewebeteilen, ebenfalls vollständige Pflanzen entwickelt. Diese Methoden sind an der LfL bei Heil- und Gewürzpflanzen, Hopfen und Kartoffeln etabliert.

Einsatz der Meristem-, Sprossspitzen- und Nodienkultur:

- Virusfreimachung von wertvollem Zuchtmaterial
- Vermehrung genetisch identischer Pflanzen
- in vitro-Langzeitlagerung von Zuchtmaterial ohne Einfluss der Witterung



Abb. 9: Nodienkultur zur Entwicklung von Mikroknollen bei Kartoffel

Neue Züchtungsmethoden

Antheren- und Mikrosporenkultur (Abb. 10)

Die Staubbeutel (Antheren) einer Blüte enthalten Pollenkörner (Mikrosporen), die männlichen Geschlechtszellen. Diese besitzen im Vergleich zu diploiden vegetativen Zellen nur den halben (haploiden) Chromosomensatz. Entnimmt man einer Blüte die Antheren und kultiviert sie auf Nährmedium bis zum 2-3-Blatt-Stadium, so entwickeln sich aus den unreifen Pollenzellen Pflanzen mit halbem Chromosomensatz, die steril sind. Durch Behandlung der Pflanzen mit dem Gift der Herbstzeitlosen (Colchizin) gelingt es, die Chromosomen identisch zu verdoppeln. Es entstehen reinerbige, fortpflanzungsfähige (fertile) Pflanzen. Die Selektion erwünschter Genotypen wird durch die erhaltene Reinerbigkeit wesentlich erleichtert, da rezessive Gene nicht mehr von dominanten Genen in ihrer Ausprägung blockiert werden. Bei Einsatz der Mikrosporenkultur werden aus Antheren isolierte Mikrosporen kultiviert und zu haploiden Pflanzen regeneriert. Pflanzen mit haploidem Erbmaterial werden beispielsweise für die Protoplastenfusion (s. u.) benötigt. Die Mikrosporenkultur wird an der LfL bei Gerste, die Antherenkultur bei Gerste und Weizen eingesetzt.

Vorteile der Antherenkultur:

- schnelle Erzeugung von reinerbigen Pflanzen
- sichere Selektion, da Genotyp = Phänotyp
- Verwendung der reinerbigen Pflanzen als Basiszuchtmaterial für Neuzüchtungen
- Verwendung der reinerbigen Pflanzen zur Genkartierung und Entwicklung von Gensonden
- Verkürzung der Züchtungszeit einer Sorte um 2 bis 4 Jahre



Abb. 10: Mikrosporenkultur



Abb. 11: Embryokultur

Embryokultur (Abb. 11)

Durch die Bestäubung der Eizelle mit Pollen entsteht ein Embryo, der die Erbinformationen beider Eltern in sich vereinigt. Bei Kreuzung von weit entfernt verwandten Pflanzen (z. B. Weizen x Quecke; Weizen x Roggen = Triticale) stirbt der gebildete Embryo aufgrund fehlenden Nährgewebes des Fruchtkörpers meist ab. Wird der Embryo zeitig aus dem Fruchtkörper entnommen, kann er in vitro mit Hilfe geeigneter Nährmedien zur vollständigen Pflanze regenerieren. Die Embryokultur wird auch zur Erzeugung reinerbiger Pflanzen eingesetzt. Zur Erzeugung doppelhaploider Weizenlinien werden Eizellen des Weizens mit Maispollen bestäubt. Während der Entwicklung des Embryos werden die Maischromosomen eliminiert und der Embryo enthält nur noch die Chromosomen (halber Chromosomensatz) des Weizens. Die aus dem Embryo regenerierte Pflanze ist steril und wird erst durch Colchizinbehandlung (s. Antherenkultur) zur reinerbigen, fertilen Pflanze. Die Embryokultur wird an der LfL zur Erzeugung reinerbiger Weizenpflanzen eingesetzt.

Vorteile der Embryokultur:

- Erstellung weiter Kreuzungen aus Wild- und Kulturformen zur Einkreuzung von Resistenz- und Qualitätsgenen aus Wild- in Kulturformen
- Entwicklung neuer Kulturarten (z. B. Triticale)
- Erzeugung von reinerbigen Pflanzen

Protoplastenfusion (Abb. 12)

Protoplasten sind zellwandlose Einzelzellen. In der Regel werden sie aus Blättern mit zellwandabbauenden Enzymen isoliert. Für die Fusion werden Protoplasten von zwei verschiedenen Ausgangslinien gewonnen, gemischt und auf elektrischem Wege miteinander verschmolzen. Nach der Zellfusion erfolgt die spontane Verschmelzung der Zellkerne, wodurch das Erbmateriale beider Fusionspartner vereinigt (addiert) wird. Als Ausgangsmaterial müssen deshalb Pflanzen mit halbem Chromosomensatz zur Verfügung stehen. Sie werden über Antherenkultur oder spezielle Kreuzungen für diese neue Art der Kombinationszüchtung gezielt entwickelt.

Vorteile der Protoplastenfusion:

- Der züchterische Schritt erfolgt nicht über Keimzellen, d. h. die zufallsgemäße Halbierung der Erbinformation während der Keimzellbildung (Meiose) findet nicht statt.
- Die Erbinformation zweier Pflanzen wird nahezu komplett zusammengeführt, d. h. verschiedener Gene, die in Kombination ein Merkmal bestimmen, werden gemeinsam übertragen. Dies ist von besonderer Bedeutung, da die meisten Eigenschaften von der Wirkung mehrerer Gene abhängen.
- Auch nicht kreuzbare Artverwandte können aufgrund der Verwendung von Blattzellen ins Zuchtprogramm aufgenommen werden, wodurch der verfügbare Genpool erweitert wird und neue Genquellen genutzt werden können.
- Durch Aufhebung der für Kreuzungen üblichen mütterlichen Vererbung werden neue Genkombinationen möglich.

Die Protoplastenfusion wird an der LfL seit 1990 zur Erstellung von Basiszuchtmaterial bei Kartoffeln eingesetzt. Jährlich werden über 400 Fusionshybriden im Feldanbau geprüft. Es gelang die gezielte Anreicherung und Kombination von verschiedenen Krankheitsresistenzen, die Nutzung neuer Resistenzgene aus Wildarten, die Entkopplung von männlicher Sterilität und Virusresistenz (PVY) und die Entwicklung von Zuchtstämmen mit sehr hohem Stärkegehalt. Zudem konnten an der LfL die weltweit ersten Hopfenpflanzen aus Protoplasten regeneriert werden.

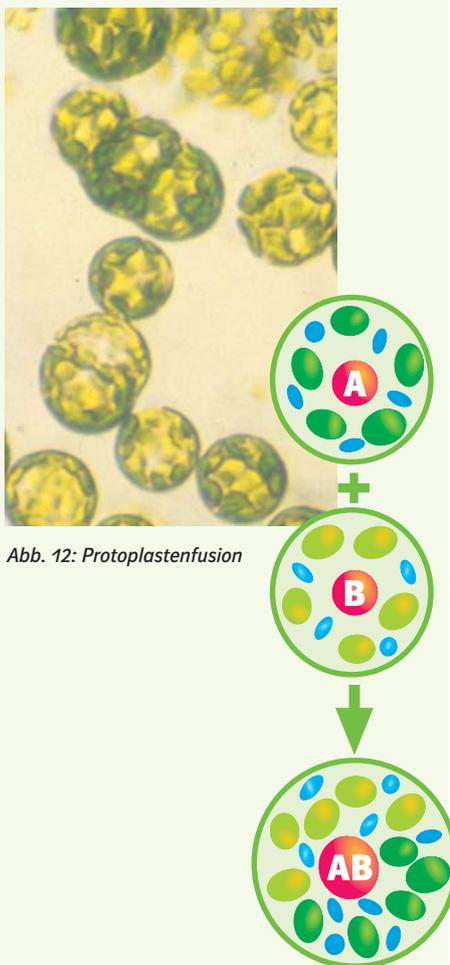


Abb. 12: Protoplastenfusion

Biochemische Marker (Abb. 13)

Die elektrophoretische Auftrennung von Proteinen in spezifische Banden oder Bandenmuster ermöglicht die Unterscheidung von Genotypen und die markergestützte Selektion bei Zuchtlinien, wie sie im Abschnitt Genomanalyse beschrieben wird.

Als biochemische Marker dienen Speicherproteine und entwicklungs- und gewebespezifische Enzyme. Diese sind häufig mit wertvollen Pflanzeigenschaften gekoppelt.

Vorteile biochemischer Marker:

- Analyse und Selektion ohne Umwelteinflüsse
- Nachweis vor der Ernte möglich (Milchreife)
- Selektion in frühen Generationen (F₂-Generation)
- geringe Probenmenge – bei hohem Probendurchsatz
- schnelles und kostengünstiges Nachweisverfahren

Einsatzgebiete der Proteinelektrophorese sind die Qualitätszüchtung, Resistenzzüchtung, Hybridzüchtung und die Nachprüfung von Art und Sorte in der Saatgutuntersuchung. An der LfL wird die Proteinelektrophorese schwerpunktmäßig in der Qualitätsweizenzüchtung sowie in der Saatgutforschung und Saatgutuntersuchung angewandt.

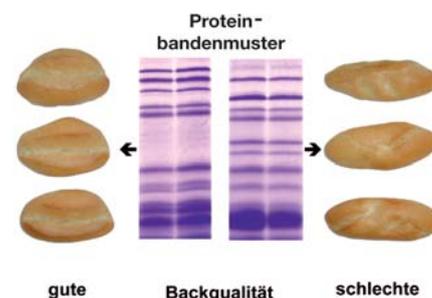


Abb. 13: Proteinelektrophorese zur Bestimmung der Backqualität

Gentechnik

Genomanalyse (Abb. 14)

Die Eigenschaften unserer Kulturpflanzen sind durch ihr Erbmateriale festgelegt. Die Genomanalyse mit den verschiedenen Techniken des genetischen Fingerabdrucks erlaubt einen tiefen Einblick in die Vererbung der Gene, ohne deren genetischen Code zu verändern. Mit ihrer Hilfe lässt sich der genetische Stammbaum und die genetische Variabilität von Kulturpflanzen feststellen, züchtungsrelevante Gene werden kartiert und anschließend mit Hilfe molekularer Marker selektiert. Neue Techniken der Expressionsanalyse erlauben sogar die Feststellung, welche Gene zu welchem Zeitpunkt oder unter welchen Umweltbedingungen aktiv sind. Die Genomanalyse ist ein universelles Werkzeug moderner Züchtungsforschung. Sie beschleunigt den Weg zu schädlingsresistenten, qualitativ hochwertigen Sorten, basierend auf den zur Verfügung stehenden, natürlichen genetischen Ressourcen.

Genomanalyse – mehr als nur eine Methode

Die Pflanzenzüchtung orientiert sich bei der Selektion in der Regel an der sichtbaren Ausprägung der Gene und damit am Phänotyp der Pflanze. Resistenzen gegen Krankheiten werden über aufwendige Infektionsversuche im Zuchtgarten oder durch Biotests im Gewächshaus nachgewiesen. Zuchtziele wie Ertrag und Qualität können erst am Erntegut festgestellt werden. So wird z. B. die Brauqualität von Gerste erst im Malzlabor bestimmt, was sehr teuer und zeitaufwendig ist.

Die Genomanalyse ersetzt aufwendige Tests im Labor und Feld und kann so die Selektion wesentlich beschleunigen und wirtschaftlicher gestalten.

Methodenspektrum der Genomanalyse

Die Genomanalyse hat ein sehr breites Einsatzfeld. Seit Jahren wird diese Technik u. a. in der Kriminalistik sehr erfolgreich eingesetzt. In der Pflanzenzüchtung baut die Genomanalyse auf fünf tragenden Säulen auf:

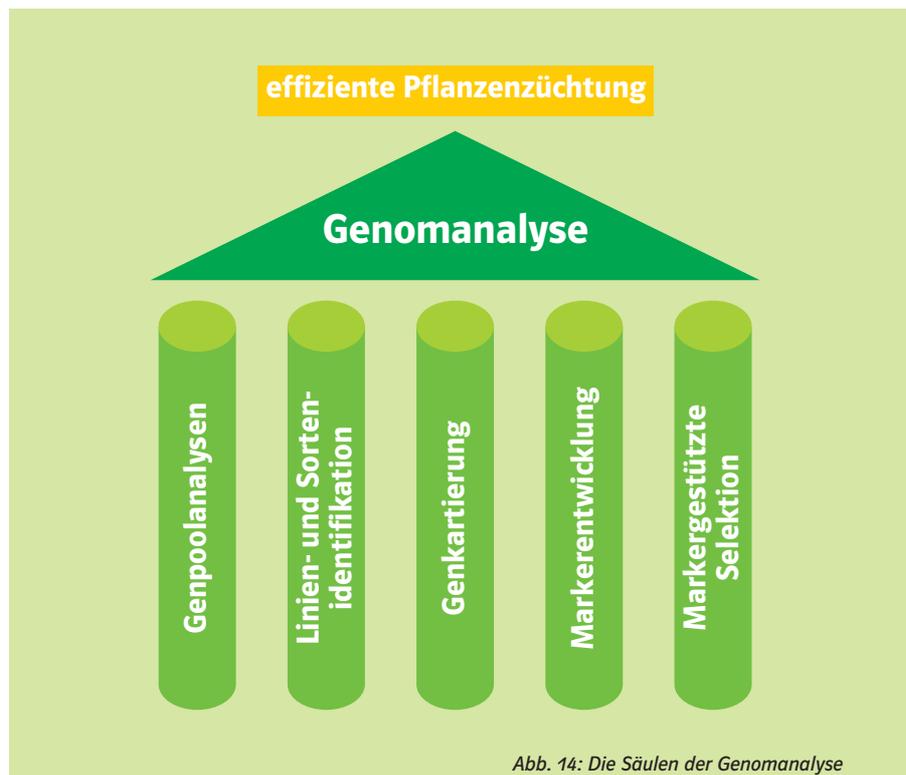


Abb. 14: Die Säulen der Genomanalyse

Das **Genom** eines Organismus ist die Gesamtheit seiner Erbinformation, die im Zellkern aller seiner Körperzellen vorliegt.

Neue Züchtungsmethoden

Genpoolanalyse

Genetische Variabilität ist die Basis für den Züchtungsfortschritt. Selektion ist nur möglich, wenn unterschiedliche Gene und Allele im Genpool vorliegen. Am Anfang steht die Analyse dieses Pools: Je höher die genetische Variabilität im Genpool ist, desto höher ist auch die Wahrscheinlichkeit in den hieraus resultierenden Nachkommenschaften bessere Genotypen selektieren zu können.

Hierzu wird von jeder Pflanze des Genpools ein genetischer Fingerabdruck, ein typisches DNA-Bandenmuster (Abb. 15), erstellt. Jede Bande stellt einen Marker dar. Je ähnlicher die Bandenmuster zwischen den untersuchten Pflanzen sind, desto enger ist deren Verwandtschaft.

So lässt sich aus den Markerdaten mit statistischen Verfahren (Cluster-, Faktorenanalyse) der genetische Stammbaum errechnen.

Das erzeugte Bandenmuster basiert auf „neutralen“ Markerbanden, die zunächst keine Korrelation zu Genen oder Zuchtmerkmalen zeigen. Die zugrunde liegenden Techniken sind u. a. die AFLP- (Amplified Fragment Length Polymorphism), SNP- (Single Nucleotide Polymorphism, Abb. 16) und Mikrosatelliten-Technik.

Linien- und Sortenidentifikation

Die Linien- und Sortenidentifikation beruht auf der Herstellung eines genetischen Fingerabdruckes mit ausgewählten SNP-Markern oder der Kombination entsprechender Mikrosatellitenmarker, welche jeweils ein diagnostisches, sortenspezifisches Bandenmuster erzeugen. In der Regel liegen diese Marker aufgrund ihres hohen Polymorphiegrades außerhalb der kodierenden DNA-Bereiche. Entsprechende Tests werden bereits in der Form von Mikro-DNA-Chips entwickelt.

Genkartierung, Markerentwicklung und markergestützte Selektion

Das Kernstück der Genomanalyse: Die molekulare Erfassung und Beschreibung der genetischen Eigenschaften des Zuchtmaterials ist für den Pflanzenzüchter sehr wertvoll. Mit Hilfe von Markern kann er Kreuzungseltern gezielt auswählen und die Nachkommenschaft schnell und einfach entsprechend des Zuchtziels selektieren.

Die Entwicklung diagnostischer Marker ist wissenschaftlich anspruchsvoll und setzt ein gutes Feldversuchswesen, definiertes Zuchtmaterial und effektive Markertechnologien voraus. Dagegen ist der spätere Einsatz der Marker in der Züchtung einfach und effektiv.



Abb. 15: Erstellung des genetischen Fingerabdrucks mittels Gelelektrophorese

Genetischer Fingerabdruck

Ein genetischer Fingerabdruck ist ein charakteristisches DNA-Bandenmuster, das mit Hilfe der Elektrophoresetechnik auf der Basis von molekularen Markern hergestellt wird.

Genetischer Fingerabdruck einer Kreuzungsnachkommenschaft



Mikrosatelliten

Ein Mikrosatellitenmarker besteht aus einer einfachen DNA-Sequenz (simple sequence repeats z. B. $(GAC)_n$), die jeweils unterschiedlich oft wiederholt ist.

Neue Züchtungsmethoden

Die Genkartierung ermöglicht die genaue Zuordnung eines Zuchtmerkmals (Resistenz, Qualität etc.) zu einem Abschnitt auf der Chromosomenkarte. Für fast alle Kulturpflanzen liegen inzwischen umfangreiche molekulare Chromosomenkarten vor (Abb. 18). Sie bestehen zunächst aus anonymen DNA-Markern, die jeweils einem definierten Chromosomensegment zugeordnet sind. Das Gesamtgenom der Pflanze lässt sich so in kleine, selektierbare Untereinheiten zerlegen.

Molekulare Chromosomenkarte

In einer Chromosomenkarte sind Gene und genetische Marker („Orientierungspunkte“) den Chromosomen eines Individuums wie Perlen einer Kette zugeordnet. Dadurch lassen sich die Distanzen zwischen den einzelnen Genorten (Loci) und deren Anordnung ermitteln.

Die genetische Distanz wird in der Einheit Centimorgan (cM) angegeben, welche die Frequenz beschreibt, mit der es während der Reifeteilung (Meiose) zum Austausch von DNA-Abschnitten zwischen zwei homologen Chromatiden (Rekombination) kommt. Dabei gilt: Je näher zwei Marker auf dem Chromosom benachbart sind, umso seltener kommt es zu einem Austausch. Bei einer Entfernung von nur einem centiMorgan (cM) entspricht dies einer Frequenz von einem Prozent.

Gekoppelte Marker

Aufgabe der Genomanalyse ist es, wichtige Zuchtmerkmale (Ertragssicherheit, Resistenzen; Abb. 20) den DNA-Markern der Chromosomenkarte (Abb. 18) zuzuordnen und für das entsprechende Chromosomensegment einen speziellen Markertest zu entwickeln. Wenn Marker und Zuchtmerkmal auf dem gleichen Chromosomensegment liegen, werden sie gemeinsam, sprich „gekoppelt“ vererbt. Marker und Zuchtmerkmal (Gen) sind zwar gekoppelt, aber nicht identisch.

Allel

Allel (von griech. allélos – gegenseitig, zueinandergehörig) ist die Bezeichnung für die alternative Zustandsform eines Gens auf den paarweise vorhandenen, homologen Chromosomen eines Individuums.

Sind die Allele eines Gens auf beiden Chromosomen identisch, spricht man von Homozygotie, unterscheiden sie sich, von Heterozygotie.

Funktionelle Marker

Funktionelle Marker sind die Weiterführung dieser Technik. Ihre Besonderheit ist, dass diese Marker direkt in einem Gen (Kandidatengen) mit bekannter Funktion lokalisiert sind.

Für die Entwicklung funktioneller Marker muss zunächst das Gen mit seiner DNA-Sequenz bekannt sein. Über den direkten Vergleich der Sequenzinformation dieses Gens bei vielen Sorten lassen sich spezifische, kleinste DNA-Sequenzunterschiede den einzelnen Ausprägungen des Gens (= Allel) zuordnen und als allelspezifische Marker einsetzen.

Gegenwärtig werden an der LfL funktionelle Marker für Krankheitsresistenz, Back-, Brau- und Chipsqualität erarbeitet.

SNP (Single Nucleotide Polymorphism)

Der kleinst mögliche und am häufigsten anzutreffende Unterschied im Genom der Pflanze ist ein einzelner, spezifischer Basenaustausch in deren DNA-Code, der als SNP bezeichnet wird. Mit Hilfe der Technik der Minisequenzierung können solche SNPs schnell und gezielt zur allelspezifischen Selektion eingesetzt werden (Abb. 16).

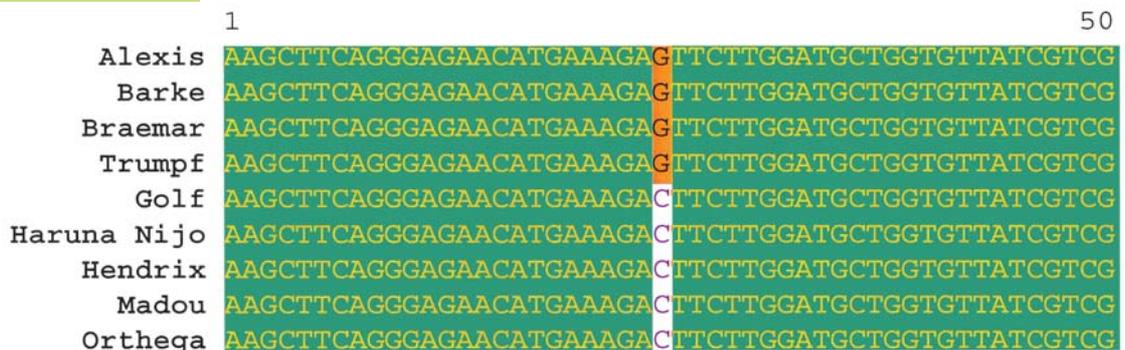


Abb. 16: Beispiele für einen SNP in einem Kandidatengen bei verschiedenen Gerstensorten

Expressionsanalyse

Wie werden die relevanten Gene für die Entwicklung funktioneller Marker gefunden? Der Schlüssel zum Erfolg liegt in der differentiellen oder vergleichenden Expressionsanalyse.

In der Expressionsanalyse werden nur die unter bestimmten Umweltbedingungen oder in bestimmten Entwicklungsstadien tatsächlich aktiven (exprimierten) Gene betrachtet. Nicht aktive Gene bleiben unberücksichtigt. Vergleicht man unter gleichen Anzuchtbedingungen die eingeschalteten (= exprimierten) Gene zweier identischer Pflanzen, wobei eine von beiden z. B. mit einem Mehltaupilz beimpft wurde, die andere aber nicht, so zeigt sich bei der vergleichenden Analyse der aktiven Gene in beiden Pflanzen, dass im einfachsten Fall die Pflanze, die mit Mehltau in Kontakt gekommen war, zur Verteidigung bestimmte Gene neu exprimiert, die bei der anderen Pflanzen inaktiv bleiben. Aus diesem unterschiedlichen Expressionsmuster (Abb. 17) der Gene (differenzielle Genexpression) beider Pflanzen lassen sich funktionelle Marker für Mehltauresistenz entwickeln. Die funktionellen Marker sind damit direkt im relevanten Gen lokalisiert und unmittelbar mit der Merkmalsausprägung (hier im Beispiel: Krankheitsresistenz) assoziiert.

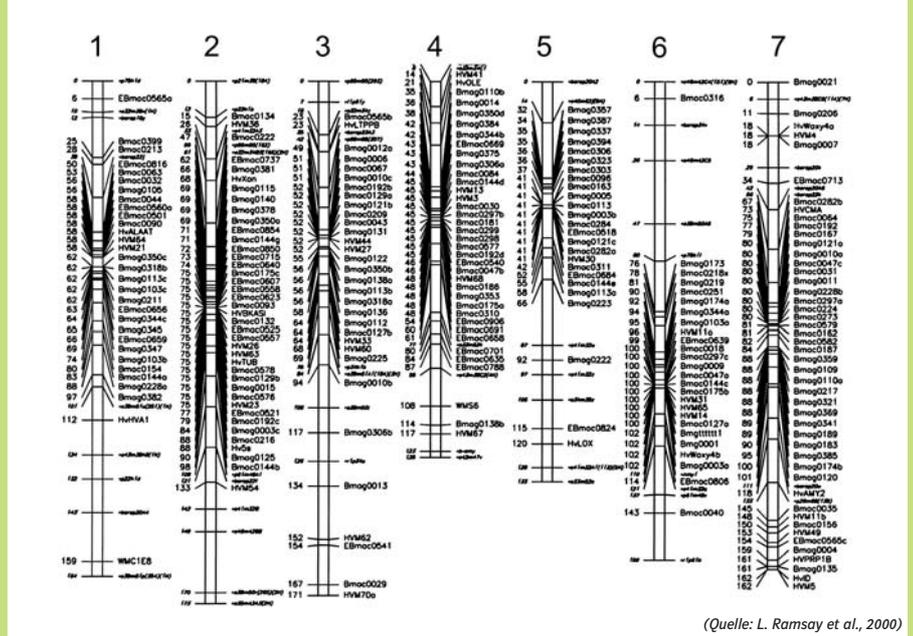
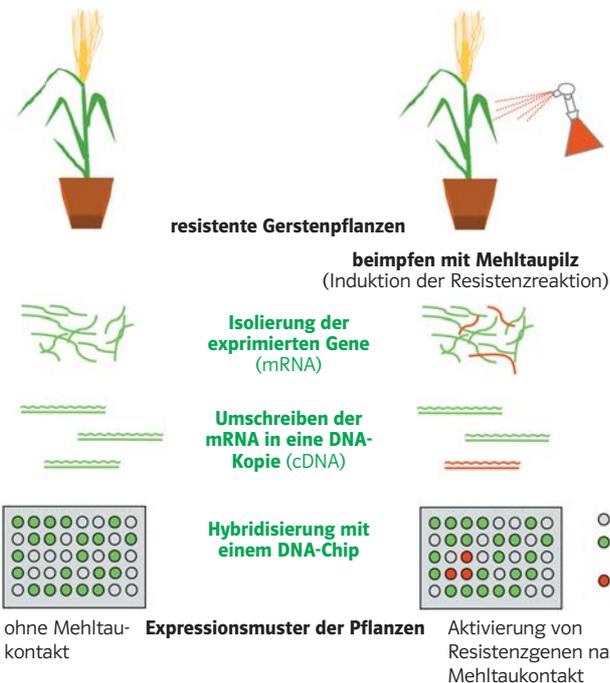


Abb. 18: Karte molekularer Marker der Gerste

Die markergestützte Selektion, kurz „MAS“

Genkartierung und Markerentwicklung sind Voraussetzung für die Nutzung der Genomanalyse in der praktischen Züchtung. Die markergestützte Selektion „MAS“ (Marker Assisted Selection) bietet Züchtern und Züchtungsforschung völlig neue und bislang nicht gekannte Möglichkeiten.

Zunächst kann der Züchter ausgehend von den Markerkarten (siehe Abb. 18) auf jedes für ihn interessante Chromosomensegment selektieren. So kann er den Genpool auf wichtige Genquellen hin analysieren und Kreuzungseltern spezifisch für sein Zuchtziel auswählen, einkreuzen und die Vererbung mit wenig Aufwand über Generationen hinweg verfolgen. Er kann Wildlinien, Exoten-Genotypen (wichtige genetische Ressourcen) als neue Genquellen einkreuzen und mit markergestützten Rückkreuzungsprogrammen deren negative Eigenschaften bezüglich Ertrag und Qualität eliminieren.

Abb. 17: Differentielle Genexpression nach induzierter Resistenzreaktion

- inaktive Gene
- sowohl in induzierten als auch in nicht induzierten Pflanzen aktivierte Gene
- nur in induzierten Pflanzen aktivierte, d. h. differentiell exprimierte Gene

Neue Züchtungsmethoden

Die gezielte Kombination mehrerer unterschiedlicher Resistenzgene ist mit Hilfe molekularer Marker möglich und wird als „Pyramidisierung“ bezeichnet. Diese Kombination von mehreren unterschiedlichen Resistenzgenen sorgt für ein verbessertes und länger wirksames Resistenzniveau neuer Kultursorten.

Im Zuchtgarten und Gewächshaustest kann nur Anfälligkeit oder Resistenz festgestellt werden. Mit Hilfe diagnostischer Marker lässt sich beurteilen, ob Resistenz auf nur einem oder auf einer Kombination mehrerer verschiedener Resistenzgene beruht.

Die Genomanalyse ist ein Werkzeug, um den gesteigerten Anforderungen von Landwirtschaft und Verbrauchern sowie dem Umweltschutz durch gezielte Nutzung des genetischen Potenzials der Pflanzen gerecht zu werden.

An der LfL wird die Genomanalyse bereits in vielen Zucht- und Forschungsprogrammen u. a. bei Getreide, Hopfen und Kartoffeln eingesetzt: zur Erfassung und Nutzung neuer Resistenzquellen gegen Pilze, Bakterien und Viren, zur Verbesserung der Brau-, Back- und Chipsqualität sowie zur Stabilisierung des Ertrags bei veränderten Umwelteinflüssen.

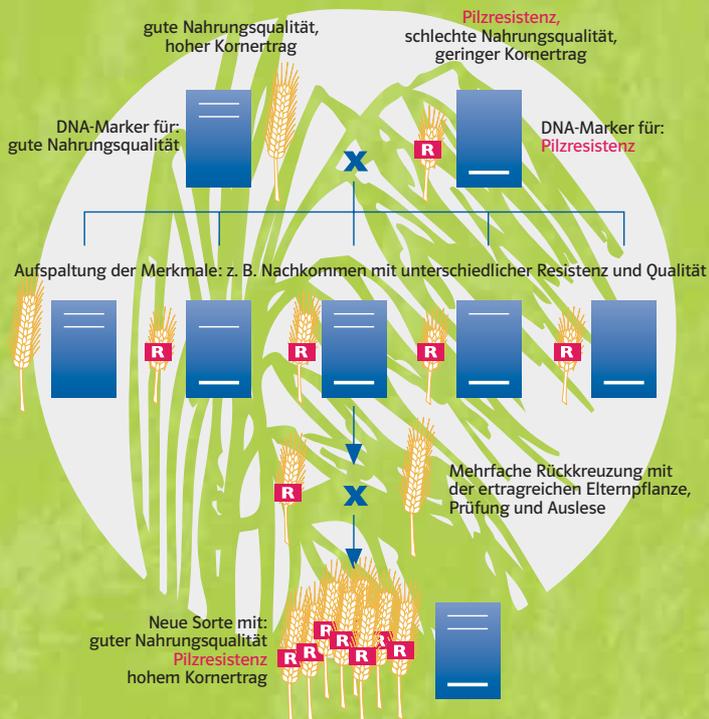


Abb. 19: Markergestützte Selektion

Vorteile der Genomanalyse

- eindeutige Erfassung genetischer Ressourcen
- konsequente Auswahl geeigneter Kreuzungseltern
- schnelle und sichere Selektion des Zuchtmaterials
- gezielte Genkombination (Pyramidisierung)
- umweltunabhängige und frühe Selektion
- Nachweis funktioneller Gene (Expressionsanalyse)
- gleiche Markertechniken für alle Kulturarten

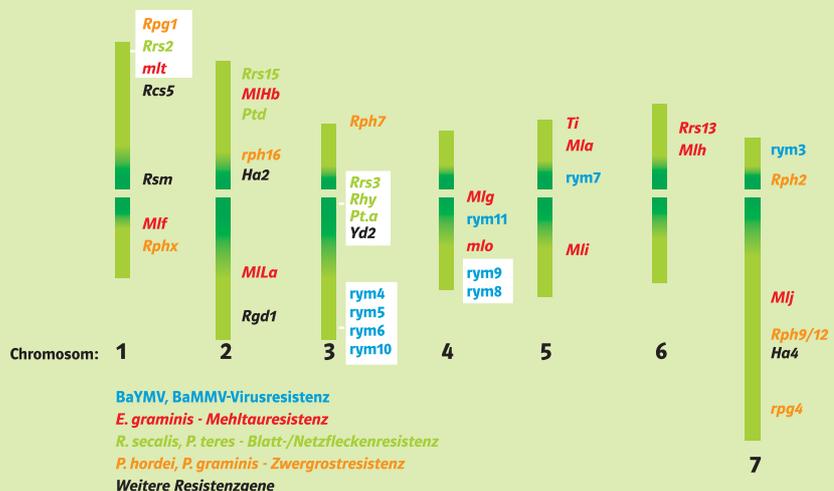


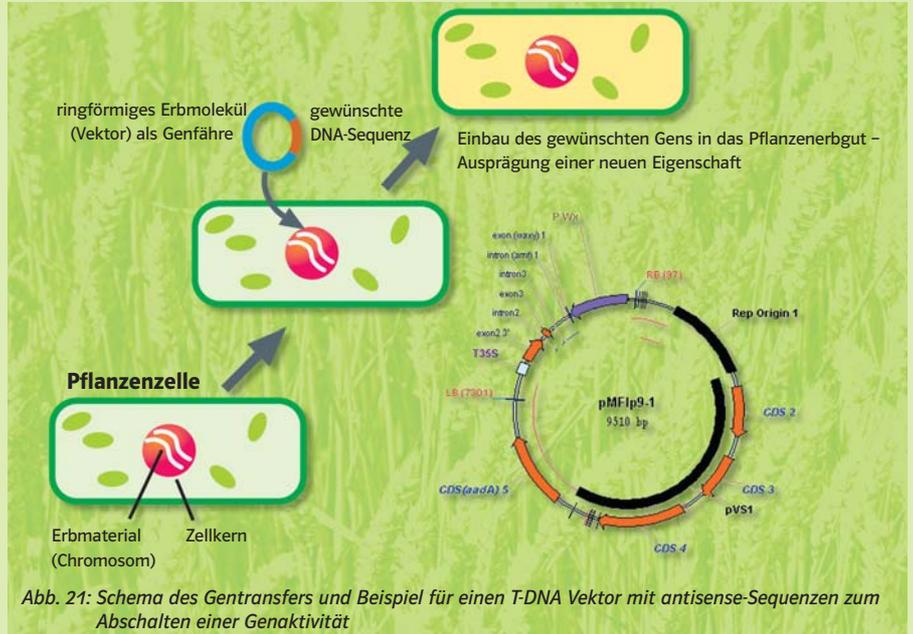
Abb. 20: Chromosomenkarte der Gerste mit kartierten Resistenzgenen aus der Züchtungsforschung nach F. Ordon und A. Graner ergänzt durch LfL

Gentransfer

Die moderne Pflanzenzüchtung kann mit den Techniken des Gentransfers zur Bewältigung klimatischer, wirtschaftlicher und ökologischer Herausforderungen der Landwirtschaft und ihrer nachhaltigen Ausrichtung entscheidend beitragen.

Ausgesuchte Gene werden in Nutzpflanzen eingeführt und so wertvolle Eigenschaften übertragen. Die Modifikationen sind bei einer gentechnisch veränderten Pflanze (GVP) vollständig nachvollziehbar. GVP unterliegen weltweit und besonders in Deutschland strengen Gesetzen und Qualitätskontrollen. Dies garantiert eine hohe Sicherheit für Mensch und Umwelt.

Zurzeit werden Genkonstrukte entwickelt, die eine minimale gentechnische Modifikation mit optimierten Sequenzelementen ermöglichen. Da oftmals nur in bestimmten Organen der GVP die neuen Eigenschaften erforderlich sind, werden gewebespezifische Steuerelemente (Promotoren) für eine bedarfsgerechte Ausprägung der Gensequenzen genutzt.



Zur Übertragung von Genen wird *Agrobacterium tumefaciens* mit seiner Transfer (T)-DNA genutzt. Bewährte Gewebekulturtechniken und neue molekulare Diagnoseverfahren werden eingesetzt, um transgene Pflanzen auszuwählen.

An der LfL werden transgene Pflanzen mit verbesserter Krankheitsresistenz, erhöhtem Gehalt essentieller Aminosäuren und für eine umweltgerechte Produktion von Stärke als nachwachsendem Rohstoff entwickelt. Es werden die Kulturarten Gerste, Hopfen und Kartoffel bearbeitet.

Die gentechnisch optimierte Amylopektin-Kartoffel als nachwachsender Rohstoff

Stärke ist ein aus vielen tausend Glucoseeinheiten zusammengesetztes Makromolekül. Amylose und Amylopektin sind seine beiden Komponenten. Kartoffelstärke besteht zu 20 % aus Amylose und zu 80 % aus

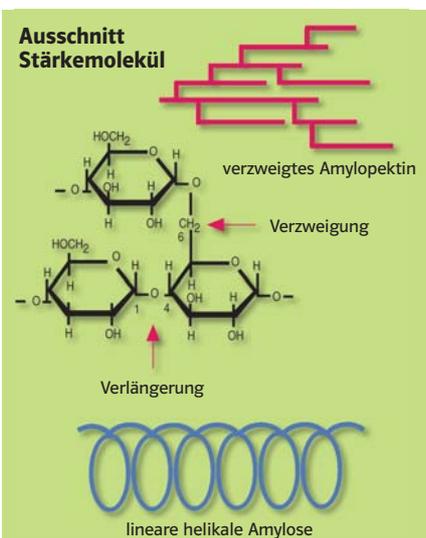


Abb. 22: Amylose-Amylopektin

Amylopektin (Abb. 22). Für die meisten technischen Anwendungen ist eine aufwendige, abwasserbelastende chemische Modifizierung dieses Gemisches Voraussetzung.

Amylose ist als Polymer für den Verpackungsmittelbereich interessant. Amylopektin bietet mit seiner Bindefähigkeit Einsatzmöglichkeiten in der Papier- und Textilindustrie. Gerade bei der Gewinnung reinen Amylopektins konnten mit Hilfe der Gentechnik große Fortschritte erzielt werden. Um die Kartoffel als nachwachsenden Rohstoff attraktiver zu machen, wurde die Synthese der Stärkekomponente Amylopektin optimiert. Dazu wurde mit Hilfe der Antisense-Technik ein für die Amylose-synthese erforderliches Gen (kodiert für die an Stärkekörner gebundene Stärkesynthase, GBSS) unterdrückt. Die Kartoffel produziert dann zu etwa 95 % reines Amylopektin (Abb. 23). Seit 1999 werden die an der LfL erzeugten Amylopektin-Kartoffeln im Freiland angebaut.

Reine Amylopektinstärke aus Kartoffel schafft nicht nur Vorteile für die Landwirtschaft (neue Absatzmärkte) und Industrie

(bessere Produkte auf Stärkebasis, z. B. bessere Kleister für die Papierproduktion), sondern bedeutet auch eine geringere Umweltbelastung durch weniger Industrieabwasser. Eine mittelständische Stärkefabrik könnte bei ihrer Stärkeproduktion unter Verwendung von 10 % amylosefreien Kartoffeln eine Abwassermenge einsparen, die einer Abwasserbelastung durch etwa 15.000 Menschen pro Tag entspricht.

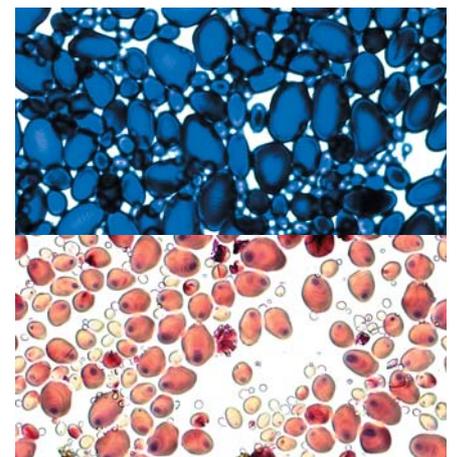


Abb. 23: Stärkekörner mit Amylose (blau) und Stärkekörner der Amylopektin-Kartoffel (rot)

Neue Züchtungsmethoden

Markerfreie Transformation

An der LfL werden verbesserte Transformationsverfahren zur Herstellung von GVP entwickelt. Ziel dabei ist die Vermeidung von jetzt noch technisch notwendigen Markergenen (z. B. Antibiotika-Resistenzgenen). Bevorzugt werden molekulare Werkzeuge zur nachträglichen Entfernung unerwünschter DNA-Abschnitte eingesetzt. Diese sogenannten Rekombinasen können Markergene gezielt entfernen. Damit gelingt die Züchtung einer genetisch veränderten Pflanze mit den gewünschten Gensequenzen, ohne die sonst üblichen Markergene.

Zur Überprüfung der Sicherheit und Praxistauglichkeit von GVP müssen wissenschaftlich begleitete Anbauversuche durchgeführt werden. Dies wird durch das deutsche Gentechnikgesetz und durch EU-Rechtsvorschriften geregelt.

Seit 2004 werden die ersten Amylopektin-Kartoffeln, die an der LfL ohne Einsatz von Markergenen erzeugt wurden, im Freiland geprüft.

Weltweit nimmt der Anbau von gentechnisch optimierten Pflanzen seit 1996 laufend zu. Bis 2005 wurden insgesamt auf mehr als 450 Mio. ha Ackerfläche GVP zur kommerziellen Nutzung angebaut. In 2005 betrug die Ackerfläche mit GVP 90 Mio. ha verteilt auf 21 Länder. Heute werden im

großen Stil Soja, Mais, Baumwolle und Raps mit gentechnisch verbesserten Eigenschaften kommerziell genutzt. Der Anteil an gentechnisch veränderten Pflanzen am Gesamtanbau dieser Fruchtarten ist beachtlich, und so gelangen GVP mit den globalen Warenströmen auch zu uns.

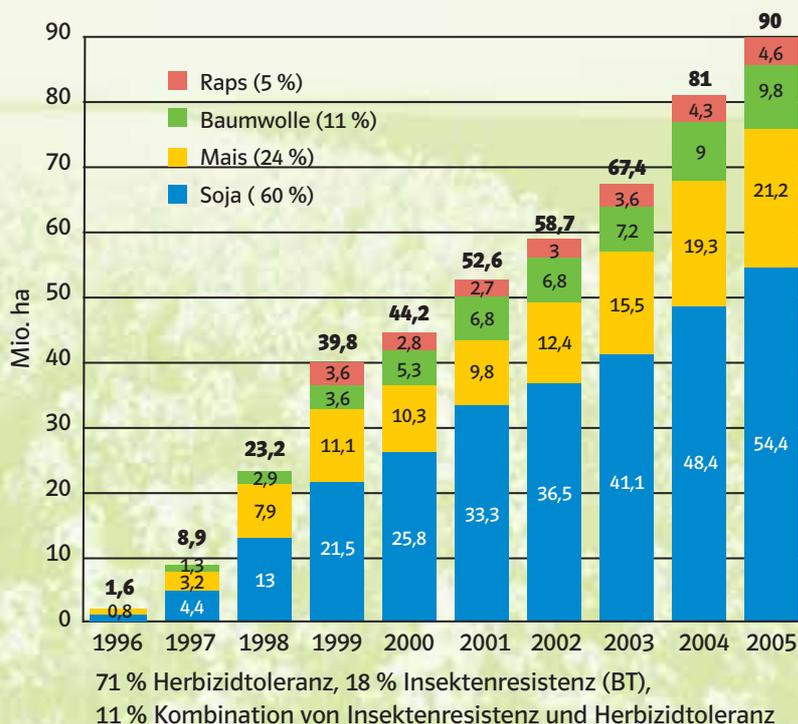


Abb. 24: Zunahme der weltweiten Anbaufläche transgener Pflanzen (nach ISAAA, 2005)



Obwohl die Anwendung der Gentechnik in der Land- und Ernährungswirtschaft international bereits auf eine jahrzehntelange Geschichte zurückblickt, wird sie in Deutschland nach wie vor kontrovers diskutiert.

Im Mittelpunkt der öffentlichen Diskussion stehen beispielsweise:

Allergien

Wie bei den herkömmlichen Sorten kann das Auftreten von Allergie auslösenden Stoffen in transgenen Sorten nicht ausgeschlossen werden, da jedes Eiweißmolekül ein Allergen sein kann. An transgene Pflanzen werden besonders hohe Ansprüche gestellt. Bei Bekanntwerden von allergenen Eigenschaften werden diese aus dem Verkehr gezogen. Dies ist in den USA mit transgenen Sojabohnen geschehen, die ein allergenes Paranussprotein enthielten. Der Gentransfer bietet aber auch die Chance Allergene zu eliminieren. Daran wird bei Reis gearbeitet.

Horizontaler Gentransfer

Gefährdungen durch den Einbau von Erbsubstanz in die Keimbahn anderer Organismen sind nicht bekannt. Dies gilt auch für gentechnisch veränderte Erbsubstanz. Der Mensch nimmt seit seinem Erscheinen auf der Erde laufend über Nahrungsmittel fremde Erbsubstanzen auf.

Vertikaler Gentransfer

Zwischen Pflanzen verwandter Arten (z. B. Raps und Hederich) können Gene über Pollen übertragen werden (Auskreuzung).

Selektionsmarker

Der Einsatz von Antibiotikaresistenzgenen zum Nachweis einer erfolgreichen Transformation führt zu keiner, im Vergleich zur spontanen (= natürlichen) Resistenzbildung, erhöhten Resistenzbildungsrate bei Bakterien. Eine Anreicherung der Erbsubstanz mit Markergenen bei transgenen Pflanzen ist in Zukunft dennoch zu vermeiden. Techniken zur markerfreien Transformation werden entwickelt.

Artenverarmung

Der Mensch hat das ursprüngliche Ökosystem kontinuierlich und grundlegend verändert. Die derzeitigen transgenen Kultursorten haben in natürlichen Pflanzengesellschaften keinen Selektionsvorteil und führen folglich auch zu keiner Verdrängung von Wildarten. Es ist jedoch in jedem Einzelfall zu prüfen, ob durch Gentransfer unvertretbare Standortvorteile vermittelt werden.

Im Sinne eines verantwortungsvollen Umgangs mit der Gentechnik wird dem Schutz von Mensch und Umwelt durch die biologische Sicherheitsforschung und die Gesetzgebung auf nationaler und europäischer Ebene Rechnung getragen. Bereits seit 1987 begleitet die Bundesregierung die Entwicklung der Gentechnik mit besonderen Programmen, aus denen Forschungsprojekte zu Fragen der Biologischen Sicherheit gefördert werden. Bis einschließlich 2001 wurden mehr als 110 Vorhaben zur Sicherheitsbewertung gentechnisch veränderter Pflanzen und Knöllchenbakterien in die Förderung aufgenommen. Seit April

2001 fördert das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) Vorhaben zur Biologischen Sicherheitsforschung auf der Grundlage der Bekanntmachung „Sicherheitsforschung und Monitoring“. Dabei stehen ausschließlich Fragestellungen der Grünen Gentechnik im Mittelpunkt der Untersuchungen.

In Bayern wurde vom Bayerischen Staatsministerium für Umwelt, Gesundheit und Verbraucherschutz (StMUGV) ein Verbundprojekt zur Begleitforschung und Überwachung gentechnisch veränderter Pflanzen (GVP) von 2000 bis 2004 gefördert, an dem auch die LfL mitarbeitete.

Gentechnik in der Diskussion

Als Beitrag zur bundesweiten Begleitforschung wurde in Bayern 2004 und 2005 ein Erprobungsanbau mit Bt-Mais der Linie MON810 durchgeführt. Dieser Mais weist eine auf gentechnischem Weg erzeugte Resistenz gegen den zur Zeit wichtigsten Maisschädling, den Maiszünsler, auf. Insgesamt wurden 2004 ca. 20 ha und 2005 ca. 8 ha mit GV-Mais bestellt.

Ziel des Erprobungsanbaus war es, Erfahrungen zu sammeln, um Richtlinien zur Koexistenz und für eine gute fachliche Praxis im Umgang mit GVO-Mais zu entwickeln.

Ziele des Erprobungsanbaus von Bt-Mais

- Bewertung von Maßnahmen zur Gewährleistung der Koexistenz zwischen landwirtschaftlichen Betrieben, die gentechnisch veränderte Sorten (Bt-Mais) anbauen und solchen, die darauf verzichten
- Untersuchungen über den Eintrag von GVO-Material in konventionelle Maisschläge und Erntepartien von Silo- und Körnermais (durch Pollenflug oder Vermischung in Erntemaschinen)
- Untersuchungen über den Eintrag von GV-Maispollen in Honig und Pollenprodukte (Koexistenz zwischen landwirtschaftlichen Betrieben und Imkern)
- Entwicklung von Empfehlungen zur guten fachlichen Praxis für die Landwirtschaft und für die Imkerei

Mit dem Erprobungsanbau wurden die bereits vorliegenden Erkenntnisse aus internationalen Studien zur Koexistenz, die zu überwiegend ähnlichen Ergebnissen

kommen, im Praxismaßstab wissenschaftlich bestätigt. Die koordinierte Durchführung in verschiedenen Bundesländern ermöglichte es, die Einflüsse der unter-

schiedlichen Agrarstrukturen in Deutschland angemessen zu erfassen und zu bewerten.

Aufgrund der aktuell für den Anbau von GVO-Pflanzen sehr ungünstigen Haftungsregelungen empfiehlt die LfL derzeit in Bayern keinen Bt-Mais anzubauen.

Gentechnik in der Diskussion

Die erste Generation transgener Sorten steht auf den Feldern. Sie ist hauptsächlich geprägt durch eingeführte Herbizidresistenzgene und durch das Insektenresistenzgen Bt. Im Rahmen zahlreicher internatio-

ner Forschungsprojekte wird bereits eine zweite Generation transgener Nutzpflanzen entwickelt, die verstärkt auf qualitätsverbessernde oder gesundheitsfördernde Eigenschaften ausgerichtet ist.

Zukunftsziele bei der Erzeugung gentechnisch veränderter Pflanzen

- Verringerung/Vermeidung von Allergenen und antinutritiven Inhaltsstoffen
- Anreicherung mit lebenswichtigen Vitaminen und Mineralstoffen
- Anreicherung mit essentiellen Aminosäuren, z. B. für den Tierfuttersektor
- Anreicherung mit wertvollen Rohstoffen für die industrielle Nutzung (Stärke, Öle)
- Mehrfachresistenzen gegen Schaderreger (Verlängerung der Nutzungszeit einer Resistenz)
- Erhöhung des Nährstoffaneignungsvermögens und der Nährstoffverteilung durch die Verwendung von Genen für spezielle Transportmoleküle, ermöglicht gute Erträge bei reduzierter Düngung
- Erhöhung der Trockentoleranz – gegebenenfalls durch Einbau von Genen für wasserleitende Proteine (sog. Aquaporine) – könnte Anbau in Trockengebieten ermöglichen
- Herstellung von Medikamenten in essbaren Pflanzen – könnte billige Schutzimpfungen ermöglichen
- Unterstützung der Symbiose von Pflanzen (z. B. Leguminosen) mit Bakterien
- Entwicklung von Getreidesorten mit verringertem Längenwachstum zur ressourcenschonenden Verbesserung des Kornertrags

Antheren

Staubgefäße der Blütenpflanzen

Chromosomen

in jedem Zellkern von höheren Lebewesen vorkommende Strukturen. Sie enthalten u. a. einen DNA-Faden, auf dem die Gene angeordnet sind.

diploid

Zellen, die zwei Chromosomensätze enthalten (einen aus mütterlichem und einen aus väterlichem Erbmateriale).

DNA

desoxyribonucleic acid (deutsch: Desoxyribonukleinsäure), Doppelhelix-Struktur

doppelhaploid

Zellen, die einen einfachen Chromosomensatz identisch verdoppelt enthalten.

Embryo

nach der Befruchtung entstandenes Gebilde, bei Pflanzen erkennbarer Spross- und Wurzelpol, entwickelt sich zur Pflanze.

Enzym

Biokatalysator, ermöglicht oder beschleunigt biochemische Reaktionen, z.B. Spaltung von Stärke in Zucker.

Gen

Abschnitt auf der DNA, der die Information zur Synthese eines Proteins enthält.

Genomanalyse

Untersuchungsmethoden zur Struktur oder Sequenzanalyse der DNA.

Genotyp

Gesamtheit aller Gene eines Organismus (Erbanlagen).

Gensonde

markierte DNA, die sich an ganz bestimmte DNA-Sequenz anlagert.

haploid

Zellen, die den einfachen Chromosomensatz tragen.

heterozygot

mischerbig, verschiedene Allele eines Gens enthaltend.

homozygot

reinerbig, die gleichen Allele eines Gens enthaltend.

Kallus

undifferenzierter und unorganisierter Zellverband.

Marker

bekannte DNA-Sequenz, die es erleichtert das Vererbungsverhalten eines Gens zu untersuchen.

Mutation

spontan auftretende oder herbeigeführte Veränderung des Erbgutes, kommt ständig in der Natur vor.

Phänotyp

Erscheinungsbild eines Organismus wie er aufgrund seiner Erbanlagen und durch die Umwelt bedingt ausgeprägt ist.

Proteine

Eiweißmoleküle, die aus Aminosäuren aufgebaut sind.

Vektor

Transportmolekül für fremde DNA-Segmente.

Zeittafel



Weiterführende Informationsquellen

Bayerisches Staatsministerium für Landwirtschaft und Forsten

www.stmlf.bayern.de

Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL)

www.LfL.bayern.de

Biologische Bundesanstalt für Land- und Forstwirtschaft

www.bba.de

bioSicherheit

www.biosicherheit.de

Bundesamt für Verbraucherschutz und Lebensmittelsicherheit (BVL)

www.bvl.bund.de

Deutsches Agrar-Informationsnetz

www.dainet.de

Grüne Biotechnologie - Informationsportal

im World Wide Web zum Thema Grüne Biotechnologie im Garten- und Weinbau

www.gruene-biotechnologie.de

TransGen - Transparenz für Gentechnik bei Lebensmitteln

www.transgen.de



