

Fachstudie

**Kriterien für die Pflanzenzüchtung unter
besonderer Berücksichtigung des Potentials der
modernen Biotechnologie**

Jürg E. Schmid, Olivier Käser, Boy Feil und Peter Stamp

Eidgenössische Technische Hochschule Zürich (ETHZ)
Institut für Pflanzenwissenschaften, Gruppe Ackerbau / Pflanzenzüchtung
Universitätsstrasse 2, CH-8092 Zürich

September 1999

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Bedeutung der Nachhaltigkeit für den landwirtschaftlichen Pflanzenbau.....	2
2	Züchtungsrelevante Aspekte einer nachhaltigen Landwirtschaft	3
2.1	Grundlagen der Pflanzenzüchtung	3
2.2	Zuchtziele für eine nachhaltige Landwirtschaft.....	4
2.2.1	Stickstoff.....	7
2.2.1.1	Senkung des Stickstoffbedarfs	8
2.2.1.2	Biologische Stickstofffixierung	14
2.2.2	Phosphor.....	18
2.2.2.1	Verbesserung der Phosphoraufnahmeeffizienz.....	19
2.2.2.2	Reduktion des Phosphorexports.....	21
2.2.2.3	Das Phytatproblem	22
2.2.3	Fruchtfolge	24
2.3	Schlussfolgerungen	29
3	Zuchtverfahren	30
4	Fallstudien mit Modellkulturen	32
4.1	Insekten-, Viren- und Pilzresistenz	33
4.2	Herbizidresistenz.....	34
4.3	Diskussion der Fallbeispiele	36
5	Schlussfolgerungen	39
6	Literatur	41

1 Einleitung

Der Landwirtschaft kommt für die nachhaltige Entwicklung generell eine grosse Bedeutung zu. Nebst den naturbelassenen Pflanzenstandorten sind es die landwirtschaftlich genutzten Flächen, welche den Ansprüchen der Nachhaltigkeit zu genügen haben. Die Begriffe "Nachhaltigkeit" oder "nachhaltige Entwicklung", wie wir sie heute als Schlagwörter oft verwenden, sind Erfindungen der frühen siebziger Jahre. Spätestens seit dem Bericht "Our common future" der Weltkommission für Umwelt und Entwicklung ("Brundtlandkommission") im Jahre 1987 ist man sich aber weltweit darüber einig, dass für unseren Planeten "Nachhaltigkeit" eine dringende Notwendigkeit geworden ist. Die Begriffe "Umwelt", "Wirtschaft" und "Gesellschaft" bilden die Eckpfeiler in der Diskussion um die Nachhaltigkeit, und nur bei gleichrangiger Berücksichtigung dieser drei Aspekte können Projekte oder Massnahmen als für unsere Nachwelt verträglich, d.h. nachhaltig, betrachtet werden. (Schulte und Käppeli, 1996,1997; Maeschli, 1999).

Tabelle 1: Eckpfeiler für die fachliche Einordnung der Nachhaltigkeit (nach Callaway und Francis, 1993; Goodland, 1995)

1. Umwelt:	<i>Ressourcen:</i> Grösstmöglicher effizienter Einsatz von erneuerbaren Ressourcen, der Verbrauch sollte innerhalb der Regenerationsfähigkeit des natürlichen Systems liegen, welches sie zur Verfügung stellt. Nicht-erneuerbare Ressourcen nur in dem Masse einsetzen, wie neue Technologien entwickelt werden, um diese durch erneuerbare zu ersetzen (der Verbrauch von nicht-erneuerbaren Ressourcen sollte unterhalb der Rate liegen, zu welcher erneuerbare Ressourcen als Substitute entwickelt werden). <i>Umweltbelastung:</i> minimaler negativer Einfluss, d.h. Emissionen eines Projektes oder einer Handlung sollten innerhalb der Assimilationskapazität der näheren Umwelt liegen, und dies ohne Verminderung der zukünftigen Absorptionskapazität.
2. Wirtschaft:	<i>Rentabilität:</i> kurzzeitig wie langfristig: was nicht rentabel ist, kann nicht nachhaltig sein; stabile Wirtschaftslage
3. Gesellschaft:	<i>Lebensqualität:</i> gleiche Rechte und soziale gerechte Systeme (shared values)

Die Vielfalt der Definitionen und Erklärungen rund um den Begriff Nachhaltigkeit sowie die bestehenden Wissens- und Umsetzungslücken sollen die Realisierung von Massnahmen für eine nachhaltige Entwicklung nicht verzögern (Maeschli, 1999). Dies bedeutet nicht zuletzt die Ausarbeitung von Detailkonzepten, beispielsweise in der Pflanzenzüchtung, welche sich ins Gesamtkonzept der Nachhaltigkeitsstrategie optimal einfügen.

In diesem Arbeitspapier sollen einige Aspekte zur Einschätzung der Nachhaltigkeit von züchteri-

schen Massnahmen dargelegt werden. Die Zielkonflikte sind in einem solch komplexen Umfeld vorgegeben, können jedoch reduziert werden, wenn die grundlegenden Eckpfeiler der Nachhaltigkeit - Umwelt, Wirtschaft und Gesellschaft - gebührend berücksichtigt werden. Die Ausarbeitung von konkreten Entscheidungsgrundlagen für die Pflanzenzüchtung unter den Aspekten der ökonomischen Effizienz, der ökologischen Produktion und der Sozialverträglichkeit (Pezzatti et al., 1996) setzt ein intensives Studium dieser Komponenten und deren Interaktionen voraus.

1.1 Bedeutung der Nachhaltigkeit für den landwirtschaftlichen Pflanzenbau

Die Landwirtschaft hat einen besonderen Stellenwert in der Diskussion um Nachhaltigkeit. Zum einen hat sie die Aufgabe, die gesamte Bevölkerung mit Nahrungsmitteln zu versorgen, zum andern wird sie von vielen als die Ursache von unseren Umwelt- und Finanzproblemen schlechthin angesehen. Auf den ersten Blick scheint es aber auch ein Ding der Unmöglichkeit zu sein, Forderungen wie genügend Nahrungsmittel zu produzieren und dabei der Nachhaltigkeit zu entsprechen gleichzeitig zu erfüllen.

Im Mittelpunkt der Diskussion um Nachhaltige Landwirtschaft in der Schweiz steht der ökologische Aspekt. Dies bedeutet, dass ökologisch unverträglichen Entwicklungen entgegengetreten werden muss. Die damit einhergehenden Anpassungen haben aber der ökonomischen und sozialen Situation der betroffenen landwirtschaftlichen Bevölkerung Rechnung zu tragen. (AP 2002, 1995).

Mit Hilfe von jährlichen Beiträgen wird die Schweizerische Landwirtschaft unterstützt, um so diese ökologischen Ziele zu verwirklichen. Um in den Genuss von solchen Beiträgen zu kommen, muss aber ein ökologischer Leistungsnachweis erbracht werden (Direktzahlungsverordnung, DVZ, AS 1999). Dies sind u.a.:

- ausgeglichene Düngerbilanz (Nährstoffbilanz; Bodenanalysen)
- angemessener Anteil an ökologischen Ausgleichsflächen
- geregelte Fruchtfolge (Maximaler Anteil der Hauptkulturen)
- geeigneter Bodenschutz (Bodenschutzindex, Erosionsschutz)
- Auswahl und gezielte Anwendung von Pflanzenbehandlungsmitteln

Der Biologische Landbau geht in seinen Anforderungen für eine nachhaltige Landwirtschaft noch weiter indem er auch den Einsatz von chemisch-synthetischen Düngemitteln und Pflanzenschutzmitteln verbietet und bei der Herstellung von Bio-Produkten nicht nur auf den Einsatz von gentechnisch veränderte Organismen verzichtet, sondern auch auf deren Folgeprodukte (v.a. Enzyme) (FiBL, 1997).

2 Züchtungsrelevante Aspekte einer nachhaltigen Landwirtschaft

2.1 Grundlagen der Pflanzenzüchtung

Die Pflanzenzüchtung verfolgt das Ziel, Pflanzen genetisch so zu verändern, dass sie optimal an die Bedürfnisse von Mensch, Tier, Umwelt und Industrie angepasst sind (verändert nach Becker, 1993).

Die Pflanzenzüchtung ist keine Erfindung unserer Zeit. Schon vor mehreren tausend Jahren begann der Mensch, aus Wildpflanzenbeständen einzelne Individuen auszuwählen, welche er aufgrund gewisser Eigenschaften für besonders wertvoll hielt. Diese wurden vermehrt und wurden so als erste Kulturpflanzen genutzt. Im Laufe der Zeit wurden die gewünschten Eigenschaften dieser Kulturen immer weiter verbessert und weitere neue Kulturarten kamen dazu. Die Ernährung der heutigen Menschheit wäre undenkbar ohne die züchterischen Arbeiten vergangener Jahrhunderte und Jahrtausende (Becker, 1993). Zum Teil wurden Pflanzenarten im Verlaufe ihrer züchterischen Bearbeitung so stark an menschliche Bedürfnisse angepasst, dass sie heute ohne den Menschen keine Überlebenschancen mehr hätten.

Im Verlauf der Zeit haben sich durch die landwirtschaftliche Praxis und die Essgewohnheiten - einige Kulturen so stark etabliert, dass sich die meisten Zuchtprogramme auf diese zu konzentrieren begannen. Dies führte zum Teil dazu, dass Zuchtprogramme für gewisse Kulturarten ganz gestrichen wurden und so auch die Kultur für den Anbau immer mehr an Bedeutung verlor. Von den etwa 200.000 existierenden Blütenpflanzen nimmt man an, dass etwa 3.000 möglicherweise für menschliche Bedürfnisse brauchbar sind, 100 davon sind heute wichtige Kulturen, und von diesen werden 8 zu den Hauptkulturen für die Ernährung gezählt [major food crops] (Weizen, Mais, Reis, Kartoffeln, Gerste, Süsskartoffeln, Manjok und Sojabohne), Von diesen acht Kulturen machen Weizen, Mais und Reis ca. 50% des Pro-Kopf-Verbrauchs in der direkten menschlichen Ernährung aus (Alexandratos, 1995).

Pflanzenzüchtung ist der Grundstein für wirtschaftliche und umweltschonende Wirtschaftsweisen in der Landwirtschaft, denn die Wahl der Sorte gibt vor, wie beispielsweise Pflanzenschutz und Düngung gehandhabt werden müssen. Pflanzenzüchtung ist somit ein wichtiger Bestandteil des integrierten Pflanzenbaus (Keller, 1997; Rausche, 1993). Nicht zu vergessen ist die grundlegende Bedeutung der Pflanzenzüchtung für eine nachhaltige Landwirtschaft, da der Pflanzenbau ausschliesslich von Saatgut oder anderen Fortpflanzungseinheiten abhängig ist, und dies unabhängig vom Bewirtschaftungssystem (Sleper et al., 1991).

Pflanzen werden mit Hilfe verschiedener Zuchtmethoden verändert. Dadurch werden die gesetzten Zuchtziele realisiert. Das Erreichen der Zuchtziele ist in der Regel zeit- und kostenaufwendig. Der Aufwand variiert je nach Komplexität der Ziele und der zu verändernden Eigenschaften.

Ablauf eines Züchtungsvorgangs:

- Festlegen der Zuchtziele
- Wahl des geeigneten Zuchtmaterials

- Wahl und Durchführung des optimalen Zuchtverfahrens
- Sortenprüfung und Vermehrung der ausgewählten Zuchtlinien

Die züchterische Bearbeitung eines grossen Spektrums an Kulturarten trägt zu einem umfassenden landwirtschaftlichen Unternehmen bei (Coffman und Bates, 1993):

- Ausweitung der landwirtschaftlichen Nutzfläche
- Produktionsintensivierung in einem vorgegebenen Gebiet
- Ausdehnung der Erntesaison, Vermeidung grosser Verluste
- Ökologisch diverse, stabile Habitate in ländlichen Gebieten und mit der daran angepassten Technologie auch in Städten
- Mittel, genetisches Material zu konservieren und den dauernden Zugang dazu zu gewährleisten
- Verminderung des landwirtschaftlichen Inputs durch adaptierte Pflanzen
- Weite Palette von wünschenswerten Nahrungsmitteln nicht nur für den Menschen sondern auch für das Tier
- Möglichkeit finanzieller Einkommen und verbesserte Lebensbedingungen für die ländliche Bevölkerung

2.2 Zuchtziele für eine nachhaltige Landwirtschaft

Die ökonomischen, ökologischen, politischen und sozialen Rahmenbedingungen beeinflussen die Zuchtzielsetzung. Im heutigen Umfeld könnten folgende strategischen Schwerpunkte für eine mittelfristige Zielsetzung in der Pflanzenzüchtung und Züchtungsforschung gelten:

- 1. Züchtung von Pflanzen mit Eignung für eine umweltschonende Erzeugung von qualitativ hochwertigen, gesunden Produkten unter Beibehaltung eines hohen, stabilen Ertragsniveaus*
- 2. Züchterische Bearbeitung von Kultur- und Wildpflanzen zwecks Erschliessung von Märkten mit neuen Produkten*
- 3. Entwicklung von Methoden zur Erhöhung der Geschwindigkeit und Flexibilität in der Realisierung neuer Zuchtziele*
- 4. Erhaltung, Charakterisierung und Schaffung genetischer Vielfalt*

Die Zielsetzungen der Pflanzenzüchtung sind eng verknüpft mit den allgemeinen Zielen der Landwirtschaft (Becker, 1993), dies wird für nachhaltige Landbausysteme in einer Gegenüberstellung deutlich (Tab.2).

Tabelle 2: Gegenüberstellung von Besonderheiten nachhaltiger Landbausysteme und der hieraus erwachsenen Konsequenzen für die Pflanzenzüchtung

Besonderheiten nachhaltiger Landbausysteme	Konsequenz für die Pflanzenzüchtung
Verminderter Einsatz von chemischen Hilfsstoffen wie Pestiziden und Wachstumsregulatoren	Züchtung auf genetische Resistenz und Toleranz Steigerung der Konkurrenzfähigkeit von Kulturarten gegenüber Ackerbegleitflora Züchtung auf Standfestigkeit Züchtung auf geringeren Bedarf von Nährstoffen, insbesondere Stickstoff und Phosphor
Minimalbodenbearbeitung und erhöhte Bodenbedeckung	Steigerung der Konkurrenzfähigkeit von Kulturarten gegenüber Ackerbegleitflora Züchtung auf erhöhte Konkurrenzkraft des Keimlings in Bezug auf Nährstoffe, Wasser und Licht Zucht von Kulturen mit maximalem Bodenbedeckungsgrad bei gleichzeitig hohem Ertrag
Optimierte Fruchtfolgen	Zucht von Sorten und Kulturarten, die an vielfältige Fruchtfolgen angepasste sind Zucht von Sorten und Kulturarten mit verschiedenen Reifezeitpunkten Züchterische Bearbeitung neuer Kulturarten (Nebenkulturarten)
Genauere Kenntnisse über Standortverhältnisse und deren optimale Nutzung	Erfassen von standortspezifischen Schadorganismen Bereitstellen von Sorten, welche an spezifische Standorte angepasst sind genaue Sortenbeschreibungen
Gesteigertes Verlangen nach multifunktionalen Kulturpflanzen	Nebenprodukteigenschaften in Zuchtziele integrieren
Förderung von Mischkulturen, Sortenmischungen und Agroforestry-Systemen	Zucht auf Verträglichkeit unter Mischungspartnern Abstimmen von Abreife und Qualität der verschiedenen Mischungspartner
Förderung von perennierenden Kulturpflanzen	Zucht auf Mehrjährigkeit

Die oben aufgeführten Zuchtziele für eine nachhaltige Landwirtschaft, beziehungsweise die Konsequenzen für die Pflanzenzüchtung sind zwar ein repräsentativer Ausschnitt gegenwärtig diskutierter Themengebiete, können aber im Rahmen dieser Studie nicht vollständig abgehandelt werden.

In den nun folgenden Kapiteln wird zunächst die Bedeutung der Verringerung des Einsatzes von mineralischen Düngemitteln sowie der Nutzung einer vielfältigen Fruchtfolge für eine nachhaltige Landwirtschaft erläutert. Ferner wird untersucht, ob bei den als nachhaltigkeitsrelevant erkannten Eigenschaften der Kulturpflanzen überhaupt nennenswerte genetische Variabilität existiert und ob die Pflanzenzüchtung vielleicht schon in der Vergangenheit substantielle Beiträge zur Realisierung einer nachhaltigeren Landwirtschaft geleistet hat. Darüber hinaus werden einige Resultate aus der physiologischen, pflanzenernährerischen und pflanzenbaulichen Grundlagenforschung der letzten Jahre vorgestellt, welche als Anregungen für weitere züchterische Bemühungen in den jeweiligen Problembereichen zu verstehen sind. Anschliessend wird der Versuch unternommen, aus der Sicht der nachhaltigen Landbewirtschaftung relevante Zuchtziele auf ihre Realisierbarkeit hin zu überprüfen. In einigen Fällen können bereits erste Ergebnisse der Anwendung gentechnischer Methoden präsentiert werden. Die Beurteilung der Möglichkeiten der Pflanzenzüchtung wird häufig schwerpunktmässig unter genetischen und methodischen Aspekten vorgenommen, wobei biologische Limitationen und Zielkonflikte nicht immer angemessen berücksichtigt oder sogar ignoriert werden. Aus diesem Grunde werden die Grenzen und Konsequenzen der Züchtung auf bestimmte Eigenschaften einer kritischen Bewertung unterzogen.

Zuchtziele für eine nachhaltige Landwirtschaft - einige Beispiele

In Tabelle 2 wird eine Übersicht über einige Anforderungen an nachhaltige Landbausysteme und deren Konsequenzen für die Pflanzenzüchtung präsentiert. Zum absoluten Kernbereich nachhaltiger Landbausysteme gehört der verminderte Einsatz von Pestiziden. Der mögliche Beitrag von gentechnisch veränderten krankheits- und schädlingsresistenten Nutzpflanzen zur Verringerung des Aufwandes an Pflanzenschutzmitteln wurde bereits im Rahmen einer früheren Studie abgehandelt (Schulte und Käppeli, 1996, 1997). Eine sehr ausführliche Übersicht über die verschiedenen Aspekte des Anbaus von herbizidresistenten Kulturpflanzensorten wurde kürzlich von Korrell et al. (1997) vorlegt. Als wichtigster Vorteil der HR-Technik wird die Möglichkeit genannt, Herbizide erst im späten Nachauflauf zu applizieren. Dadurch kann auf präventive Spritzungen verzichtet werden; ausserdem werden einige umweltfreundliche Anbausysteme (Mulchsaat im Zuckerrüben- und Maisanbau) besser beherrschbar. Die Autoren konstatieren, dass erst künftige Praxiserfahrungen eine abschliessende Bewertung der HR-Technik in bezug auf eine nachhaltigere Landwirtschaft erlauben werden.

In den nun folgenden Kapiteln wird zunächst die Bedeutung der Verringerung des Einsatzes von mineralischen Düngemitteln (Stickstoff und Phosphor) sowie der Nutzung einer vielfältigen Fruchtfolge für eine nachhaltige Landwirtschaft erläutert. Ferner wird untersucht, ob bei den als nachhaltigkeitsrelevant erkannten Eigenschaften der Kulturpflanzen überhaupt nennenswerte genetische Variabilität existiert und ob die Pflanzenzüchtung vielleicht schon in der

Vergangenheit substantielle Beiträge zur Realisierung einer nachhaltigeren Landwirtschaft geleistet hat. Darüber hinaus werden einige Resultate aus der physiologischen, pflanzenernährerischen und pflanzenbaulichen Grundlagenforschung der letzten Jahre vorgestellt, welche als Anregungen für weitere züchterische Bemühungen in den jeweiligen Problembereichen zu verstehen sind. Anschliessend wird der Versuch unternommen, aus der Sicht der nachhaltigen Landbewirtschaftung relevante Zuchtziele auf ihre Realisierbarkeit hin zu überprüfen. In einigen Fällen können bereits erste Ergebnisse der Anwendung gentechnischer Methoden präsentiert werden. Die Beurteilung der Möglichkeiten der Pflanzenzüchtung wird häufig schwerpunktmässig unter genetischen und methodischen Aspekten vorgenommen, wobei biologische Limitationen und Zielkonflikte nicht immer angemessen berücksichtigt oder sogar ignoriert werden. Aus diesem Grunde werden die Grenzen und Konsequenzen der Züchtung auf bestimmte Eigenschaften einer kritischen Bewertung unterzogen.

2.2.1 Stickstoff

Mit Ausnahme der Leguminosen können unsere Kulturpflanzen nur dann hohe Erträge bilden, wenn viel Stickstoff gedüngt wird. Die Hauptgründe dafür sind:

- Alle Kulturarten nehmen große Mengen an Stickstoff auf
- Stickstoff ist auf den meisten Standorten der meisten ertragslimitierende Wachstumsfaktor.

Stickstoff ist ein essentieller Bestandteil der Aminosäuren. Da Protein aus Aminosäuren zusammengesetzt ist, kann ohne Stickstoff kein Protein gebildet werden. Die Proteinkonzentration ist bei vielen Kulturen eine wichtige Determinante der ernährungsphysiologischen, in einigen Fällen aber auch der technologischen Qualität des Ernteguts. Die Versorgung der Menschheit mit Protein ist folglich in hohem Masse von der ausreichenden Verfügbarkeit von Stickstoff abhängig. Wegen der herausragenden Bedeutung von Stickstoff für Ertrag und Qualität ist Stickstoff weltweit und auch in der Schweiz das am meisten gedüngte Nährelement (FAO, 1992). Aufgrund der Bevölkerungsentwicklung steigt der Verbrauch von stickstoffhaltigen Düngern in den Entwicklungsländern zurzeit steil an, während er in den westlichen Industrieländern abnimmt oder auf hohem Niveau stagniert (Bumb, 1995). Der intensive Einsatz von stickstoffhaltigen Düngemitteln steht in mehrfacher Hinsicht mit dem Konzept einer nachhaltigen Landwirtschaft in Konflikt:

- Auch wenn der Energieaufwand für die Produktion von Stickstoffdüngern in der Vergangenheit deutlich gesenkt werden konnte und in modernen Fabriken nur noch ca. 35 MJ Primärenergie für die Erzeugung von einem kg N benötigt wird (Appl, 1997), ist die Herstellung von mineralischen Stickstoffdüngern nach wie vor recht energieaufwendig. Die Energiebilanz der pflanzlichen Produktion wird daher massgeblich von der Intensität der Stickstoffdüngung beeinflusst. Stickstoffdünger werden unter Verwendung von fossilen Energieträgern erzeugt, deren Vorkommen bekanntlich begrenzt sind. Während der Produktion werden grössere Mengen Kohlendioxid freigesetzt.
- Stickstoff nimmt unter den Nährstoffen eine Sonderstellung ein, weil die meisten Pflanzen Stickstoff sowohl als Anion (Nitrat) als auch als Kation (Ammonium) aufnehmen können und die beiden mineralischen Stickstoffformen in diverse gasförmige Verbindungen (Ammoniak,

Distickstoff und verschiedene Stickoxide) konvertiert werden können. Die dominante pflanzenverfügbare Stickstoffform in landwirtschaftlichen Böden ist Nitrat. Das Nitrat-Ion ist extrem mobil, weil es im Gegensatz zum Ammonium-Ion kaum mit den Bodenkolloiden interagiert. Daher kann Nitrat leicht mit perkolierendem Bodenwasser in den Unterboden verlagert werden. Ammonium ist weit weniger auswaschungsgefährdet und ist daher aus ökologischer Sicht günstiger zu bewerten. Jedoch wird Ammonium sehr schnell von den Bodenmikroorganismen (Nitrosomonas, Nitrobacter) in Nitrat umgewandelt. Die Auswaschung von Nitrat lässt sich also kaum durch die Verwendung von ammoniumhaltigen Düngern verhindern - es sei denn, es werden die in der Schweiz nicht zugelassenen Nitrifikationsinhibitoren (Didin, DCD) zur Verzögerung der Nitrifizierung eingesetzt (Amberger, 1989). Agroökosysteme verlieren Stickstoff nicht nur durch Nitratauswaschung, sondern auch durch Volatilisation von gasförmigen stickstoffhaltigen Verbindungen. Folgende Prozesse sind beteiligt: Verflüchtigung von Ammoniak während der Ausbringung von Düngern oder bei alkalischer Bodenreaktion, Denitrifikation und Emission von Ammoniak durch die Pflanzen (Braun et al., 1994). Alle erwähnten Verlustprozesse sind umweltrelevant: Ammoniak trägt zur Eutrophierung und Versauerung von Waldböden und Gewässern bei, die Auswaschung von Nitrat kann die Qualität des Grundwassers beeinträchtigen und durch Denitrifikation gebildetes Lachgas (N_2O) trägt zum Treibhauseffekt bei und spielt eine wichtige Rolle bei der Ozonzerstörung in der Stratosphäre (Flaig und Mohr, 1996). Selbst unter optimalen Bedingungen wird der in Düngemitteln enthaltene Stickstoff nicht vollständig von den Kulturpflanzen ausgenutzt. Bei mineralischen Stickstoffdüngern wird häufig nur 50-70% des applizierten Stickstoffs von den Pflanzen aufgenommen (Tinker, 1979; Panse et al., 1994; Bertholdsson und Stoy, 1995; Grylls et al., 1997; Sieling und Hanus, 1997). In der Regel sinkt die Ausnutzungsrate von Düngerstickstoff mit zunehmender Intensität der Stickstoffdüngung (Tinker, 1979; Bänziger et al., 1994a), der Rest wird immobilisiert (Einbau in die organische Substanz des Bodens, Fixierung in den Zwischenschichten von Tonmineralen) oder entweicht aus dem Agroökosystem.

Die Pflanzenzüchtung könnte signifikante Beiträge zu einer nachhaltigeren Landwirtschaft liefern, und zwar indem

- der Stickstoffbedarf der Kulturpflanzen gesenkt wird.
- mehr Stickstoff biologisch fixiert wird.

2.2.1.1 Senkung des Stickstoffbedarfs

Weltweit, aber auch in der Schweiz, werden die Ackerflächen überwiegend mit den verschiedenen Getreidearten bepflanzt. Deshalb sollen die Möglichkeiten der Züchtung auf einen niedrigeren Stickstoffbedarf am Beispiel des Getreides dargestellt werden. Der Stickstoffbedarf von Getreide könnte auf mehreren Wegen gesenkt werden:

- Effizientere Ausnutzung der Stickstoffvorräte des Bodens durch höheres Stickstoffaufnahmevermögen.
- Verbesserung der Umsetzung von aufgenommenem Stickstoff in Kornertrag.

- Reduktion der Stickstoffemissionen von Getreidebeständen.
- Verbesserung der Proteinqualität.

Effizientere Ausnutzung der Stickstoffvorräte des Bodens durch höheres Stickstoffaufnahmevermögen

Zahlreiche Versuche dokumentieren die Existenz genotypischer Variation in der Stickstoffaufnahme bei verschiedenen Getreidearten. Auch in der Schweiz wurden Untersuchungen zu diesem Thema durchgeführt (Dubois und Fossati, 1981; Paccaud et al., 1985; Bänziger et al., 1992; Fossati et al., 1993), jedoch liegen keine entsprechenden Daten für die zurzeit in der Schweiz zugelassenen Sorten vor. Nach den bisher vorliegenden Erfahrungen mit anderen Sortimenten ist aber davon auszugehen, dass das aktuelle Sortenspektrum nur relativ geringe Unterschiede in der Stickstoffaufnahme aufweist. Ein Grund für die beschränkte genotypische Variation könnte sein, dass zumindest bei geringer bis moderater Stickstoffdüngung die Stickstoffaufnahme nicht durch pflanzeninterne physiologische Engpässe, sondern durch mangelnde Verfügbarkeit von mineralischem Stickstoff im Boden limitiert wird. In der Tat sind die Restmengen an mineralischem Stickstoff nach der Getreideernte meist sehr gering (Wentzin et al., 1985; Fischbeck et al., 1990; Rüegg, 1984; Göhlich, 1996; Garibay Kuri, 1996; Feil und Bänziger, 1999); offenbar wird der Stickstoff unter durchschnittlichen Bedingungen (keine überzogene Stickstoffdüngung, ausreichende Bodenfeuchtigkeit, normal entwickelte Bestände) fast vollständig aufgebraucht. Nur bei sehr hoher Stickstoffdüngung werden nennenswerte Quantitäten an Reststickstoff vorgefunden (Czuderna, 1992; Engels, 1993; Richards et al., 1996). Weizen reagiert auf zusätzliche Stickstoffdüngung in aller Regel mit einer erhöhten Stickstoffaufnahme. Auch dies weist darauf hin, dass die Verfügbarkeit von Stickstoff die Stickstoffaufnahme begrenzt. Es ist also denkbar, dass bei Einhaltung der heute in der Schweiz üblichen Düngungsrichtlinien eine nennenswerte züchterische Verbesserung des Stickstoffaufnahmevermögens nicht mehr möglich ist, weil kein pflanzenverfügbare Stickstoff mehr im Boden vorhanden ist.

Allerdings sprechen mehrere Beobachtungen gegen diese Annahme. Die scheinbare Ausnutzung von Düngerstickstoff, ermittelt mit der Differenzmethode, schwankt in weiten Grenzen; Werte bis über 100 % sind infolge des sogenannten „Priming effects“ (Jenkinson, 1985) möglich. Allerdings wird - wie oben bereits erwähnt - Düngerstickstoff selbst unter günstigen Bedingungen häufig nur zu etwa 60% ausgenutzt; ein Teil des Stickstoffs entweicht in die Umwelt, ein anderer Teil wird immobilisiert. Die Getreidebestände konkurrieren mit den im Boden ablaufenden Verlust- und Immobilisationsprozessen um mineralischen Stickstoff. Es ist davon auszugehen, dass die Stickstoffverluste um so geringer sind je schneller die Kulturpflanzen den mineralischen Stickstoff aus der Bodenlösung entfernen. Getreidesorten mit einer hohen Stickstoffaufnahme rate sollten also imstande sein, die Verluste von pflanzenverfügbarem Stickstoff durch mikrobielle Immobilisation, Denitrifikation und Nitratauswaschung zu reduzieren (Feil, 1997, 1998).

Trotz der Vielzahl von Arbeiten zur Aufnahme, Verarbeitung und Verteilung von Stickstoff in Pflanzen ist bislang unklar, welche Faktoren die Stickstoffaufnahme limitieren (Engels und Marschner, 1995; Feil, 1997, 1998). Somit fehlen die absolut notwendigen Voraussetzungen für

die Anwendung gentechnischer Methoden zur Verbesserung der Stickstoffaufnahmeeffizienz, denn die Gentechnik kann nur dann Erfolg haben, wenn die limitierenden Parameter, z.B. ein biochemischer Prozess oder eine zelluläre Struktur, und deren genetischer Hintergrund bekannt sind. Es sind also noch umfangreiche Forschungsarbeiten erforderlich, um unser Wissen über die möglichen Engpässe für die Stickstoffaufnahme und deren genetische Basis zu vertiefen. Bei der Beurteilung der Möglichkeiten der Entwicklung von Sorten mit hohem Stickstoffaneignungsvermögen und hohen Proteinerträgen sind einige wichtige Punkte zu berücksichtigen

- Man kann davon ausgehen, dass das System der Nitrat- bzw. Ammoniumassimilation als polygenetisches Funktionssystem bereits derart optimiert ist, dass jeder grobe Eingriff sich als Störung auswirkt. Unter diesen Umständen sind der Gentechnik - zumindest vorläufig - Grenzen gesetzt (Flaig und Mohr, 1996).
- Die Stickstoffaufnahme kann nur dann erhöht werden, wenn die Stickstoffpools im Boden noch nicht vollständig ausgebeutet sind. Die Züchtung von Hochproteinsorten ist notwendigerweise zum Scheitern verurteilt, wenn kein Stickstoff im System Boden-Pflanze mehr vorhanden ist, welcher zur Produktion von Kornprotein verwendet werden könnte. Jedoch weist insbesondere die in der Regel unvollständige Ausnutzung von Düngerstickstoff darauf hin, dass die Stickstoffaufnahmeeffizienz und somit auch der Proteinertrag von Getreide durch Züchtung erhöht werden kann.
- Die Züchtung von Hochproteinsorten mit hohem Stickstoffaneignungsvermögen ist ausschliesslich positiv zu beurteilen, wenn durch deren Anbau Stickstoffverluste durch Nitratauswaschung und Denitrifikation vermieden werden. Die Situation stellt sich jedoch anders dar, wenn durch eine schnelle Stickstoffaufnahme die mikrobielle Immobilisation von Düngerstickstoff reduziert wird, weil immobilisierter Stickstoff nicht definitiv verloren ist. Vielmehr kann der in die organische Substanz des Bodens eingebaute Stickstoff zu einem späteren Zeitpunkt wieder mineralisiert und von den Folgefrüchten genutzt werden. Der Anbau von Hochproteinsorten begünstigt in diesem Falle die Entstehung von negativen Stickstoffbilanzen, wodurch auf lange Sicht die Stickstoffmineralisierungskapazität beeinträchtigt und somit die Fruchtbarkeit des Bodens gefährdet wird (Feil, 1997, 1998). Die durch negative Stickstoffbilanzen verursachte reduzierte Freisetzung von Stickstoff aus der organischen Substanz des Bodens wird die Gesamtertragsleistung der Rotation beeinträchtigen. Um dies zu vermeiden, muss dem Boden im Rahmen der Fruchtfolge mehr Stickstoff zugeführt werden, was durch Düngung (mineralisch oder organisch) oder den verstärkten Anbau von Leguminosen geschehen kann.
- Es gibt verschiedene Hinweise, dass Getreide durch die Exsudation von leicht umsetzbaren kohlenstoffhaltigen Verbindungen Stickstofftransformationsprozesse im wurzelnahen Boden, der Rhizosphäre, beeinflussen kann (Feil, 1997, 1998). Betroffen sind die Freisetzung von Stickstoff aus der organischen Substanz, die Denitrifikation und die Fixierung von Luftstickstoff durch assoziative Stickstoffbinder. Wenn die genetische Verbesserung des Stickstoffaneignungsvermögens durch eine verstärkte Nutzung der letzteren Stickstoffquelle erreicht wird, wird die Stickstoffbilanz natürlich nicht negativ beeinflusst. Das Gegenteil ist zu erwarten, wenn die Mineralisation von Stickstoff stimuliert wird.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die Züchtung auf erhöhte Stickstoffaufnahmeeffizienz den Getreidebau dann nachhaltiger gestaltet, wenn Stickstoffverluste vermieden werden. Dagegen widerspricht die stärkere Inanspruchnahme der Stickstoffvorräte des Bodens im Grunde dem Nachhaltigkeitskonzept. Entscheidend ist also, aus welcher Quelle der für die zusätzliche Bildung von Kornprotein benötigte Stickstoff stammt. Die Möglichkeiten, Grenzen und Konsequenzen der Züchtung auf Protein müssen natürlich neu bewertet werden, wenn es gelingt, Getreide mit der Befähigung zur biologischen Stickstofffixierung im Rahmen von symbiotischen Systemen auszustatten. Dieses Ziel wird nur mit gentechnischen Methoden zu erreichen sein.

Verbesserung der Umsetzung von aufgenommenem Stickstoff in Kornertrag

Bereits kurz nach der Jahrhundertwende wurde spekuliert, dass die seinerzeit aktuellen Zuchtsorten als „Intensivsorten“ zu betrachten seien, weil deren ertragliche Überlegenheit über die alten Landsorten sich angeblich erst bei hohem Nährstoffeinsatz zeigt (Lemmermann et al., 1918). Die bisher vorliegenden vergleichenden Untersuchungen an alten und neuen Sorten unterstützen diese seither häufig wiederholte Behauptung mehrheitlich nicht (Feil, 1992; Canevara et al., 1994). Vielmehr scheint der Züchtungsfortschritt im Kornertrag nur wenig von der Intensität der Stickstoffdüngung abhängig zu sein (Aufhammer und Fischbeck, 1979; Austin et al., 1980), zumindest wenn kein Lager auftritt (Austin et al., 1993). Dies bedeutet, dass durch die Züchtung auf Ertrag die potentielle Umweltbelastung pro Einheit produziertem Getreide unabhängig von der Intensität des Stickstoffeinsatzes abgenommen hat. Aus Studien an Sorten aus unterschiedlichen Abschnitten der Züchtungsgeschichte lässt sich ableiten, dass der Kornertrag im Laufe der Sortenevolution stärker als die Stickstoffaufnahme gesteigert wurde (Austin et al., 1980; Feil, 1987; Bulman et al., 1993). Folglich wurde der aufgenommene Stickstoff effizienter in Kornertrag umgesetzt. Diese Schlussfolgerung wird durch den Vergleich zwischen der alten schweizerischen Winterweizen-Standardsorte Probus und der neueren Sorte Arina bestätigt (Paccaud et al., 1985). Die scheinbare Ausnutzung von Düngerstickstoff, ermittelt mit der Differenzmethode, ist nach Austin et al. (1993) bei Neuzüchtungen Sorten besser als bei alten Sorten.

Wegen der Überproduktion ist man in vielen europäischen Ländern nicht so sehr an weiteren Steigerungen der Flächenerträge interessiert; eine ausreichende Versorgung mit Getreide, welches mit reduziertem Aufwand an Düngern und an anderen Betriebsmitteln erzeugt wird, wird von vielen als erstrebenswerte Alternative angesehen. Aus den oben dargestellten Fakten lässt sich ableiten, dass die heutigen Hohertragssorten mit geringerer Stickstoffdüngung den gleichen Flächenertrag zu produzieren vermögen wie die alten Sorten mit höherer Düngung. Da weniger Dünger für gleich große Erträge benötigt werden, scheint es berechtigt, die modernen Sorten als „Extensivsorten,“ bezeichnen.

Die Pflanzenzüchtung hat durch die Entwicklung von ertragreicheren Sorten also bereits einen sehr wertvollen Beitrag zu einer nachhaltigeren Landwirtschaft geleistet. Es ist jedoch davon auszugehen, dass die physiologischen Grenzen der Züchtung auf Ertrag bei weitem noch nicht erreicht sind. Folglich wird sich der positive Trend - es wird immer mehr Ertrag pro Einheit gedüngtem und aufgenommenen Stickstoff gebildet - aller Voraussicht nach auch in Zukunft fortsetzen. Ob die Gentechnik in absehbarer Zeit einen signifikanten Beitrag zur Verbesserung

der Photosynthesekapazität leisten kann, ist aufgrund der Komplexität der beteiligten Funktionssysteme fraglich (Flaig und Mohr, 1996). Der Anbau von Hohertragsorten bei niedriger Stickstoffdüngung ist zwar ökologisch äusserst sinnvoll, jedoch darf der Effekt von extensiven Produktionsmethoden auf die Qualität, d.h. in diesem Falle die Kornproteinkonzentration, nicht vernachlässigt werden:

- Moderne Hohertragsorten sind zwar imstande, gleiche Erträge wie ältere Sorten mit geringerer Stickstoffdüngung zu bilden, jedoch produzieren sie dann wegen der reduzierten Verfügbarkeit von Stickstoff nur geringe Proteinerträge. Aus der Kombination von hohen Erträgen und niedrigen Proteinerträgen resultieren dann Proteinkonzentrationen, welche signifikant unter denen von intensiver mit Stickstoff gedüngten älteren Sorten liegen.
- Die Bedeutung der Senkung der Kornproteinkonzentration für die Produktqualität hängt vom Verwendungszweck ab (Aufhammer, 1998). Im Falle der Braugerste ist eine niedrige Proteinkonzentration vorteilhaft, während Brotweizen grundsätzlich eine hohe Proteinkonzentration aufweisen sollte. Getreide, welches in der Tierfütterung eingesetzt wird, ist primär als Energie- und weniger als Proteinlieferant zu betrachten; niedrige Proteinkonzentrationen können dann akzeptiert werden, wenn preiswertes Protein aus anderen Quellen zur Verfügung steht. Um dem mit der Extensivierung assoziierten negativen Proteintrend zu begegnen, müsste auf höhere Proteinerträge gezüchtet werden. Da ohne Stickstoff kein Protein gebildet werden kann, kann der Proteinertrag jedoch nicht beliebig erhöht werden - ganz unabhängig von der genetischen Konstitution der Pflanzen und auch davon, ob mit klassischen oder mit gentechnischen Methoden gezüchtet wird.

Reduktion der Stickstoffemissionen von Getreidebeständen

Getreidepflanzen können nach der bisher vorliegenden Literatur beträchtliche Mengen an Stickstoff verlieren (Wetselaar und Farquhar, 1980; Vos et al., 1993), wobei die Verluste mit zunehmender Stickstoffdüngung zu steigen scheinen (Daigger et al. 1976; Francis et al., 1993). Als beteiligte Prozesse wurden Wurzeldeposition (Janzen und Bruinsma, 1993), Blattfall, Auswaschung durch Regen (Wetselaar und Farquhar, 1980) und Emission von stickstoffhaltigen Gasen (Morgan und Parton, 1989) identifiziert. Ökologisch relevant ist insbesondere die Emission von Ammoniak. Ammoniak wird in grossen Mengen während der Photorespiration durch die Umwandlung von Glycin in Serin freigesetzt (Lea et al., 1994), jedoch offenbar nicht immer vollständig reassimiliert. Bisher liegen nur wenige Daten zur quantitativen Bedeutung der Ammoniakemission von Kulturbeständen in Mitteleuropa vor (Nefel et al., 1997; Mannheim et al., 1997). Getreidesorten können sich offenbar in der Höhe der Emission von Ammoniak (Stutte und da Silva, 1981; Husted et al., 1996) bzw. in den gesamten Stickstoffverlusten (Chevalier und Schrader, 1977) unterscheiden. Es somit nicht ausgeschlossen, dass die umweltbelastenden gasförmigen Stickstoffverluste sich durch züchterische Massnahmen reduzieren lassen, wobei zukünftig auch gentechnische Methoden eine Rolle spielen könnten.

Verbesserung der Proteinqualität

Die ernährungsphysiologische Qualität pflanzlichen Proteins ist für Nicht-Wiederkäuer, also auch für den Menschen, selten optimal. So wird bei Getreide die Wertigkeit des Proteins durch den geringen Lysinanteil limitiert; die nächstlimitierende Aminosäure ist bei den meisten

Getreidearten Threonin, beim Mais dagegen Tryptophan. Die drittlimitierenden Aminosäuren sind zumeist Valin und Isoleucin (Eggum und Beames, 1983). Ausser beim Hafer, dessen Protein bereits relativ lysinreich ist (Youngs und Forsberg, 1987), wäre deshalb insbesondere eine Erhöhung der Lysinkonzentration im Protein aus ernährungsphysiologischer Sicht wünschenswert. Mit einer optimierten Aminosäurezusammensetzung des Proteins liesse sich der gleiche Ernährungseffekt mit einer geringeren Proteinkonzentration und damit einer geringeren Stickstoffdüngung erreichen, weil die Kornproteinkonzentration im wesentlichen eine Funktion der Stickstoffverfügbarkeit darstellt (Feil, 1996).

Während bei Gerste (Foster und Prentice, 1987) und Mais (Glover and Mertz, 1987) Mutanten mit hohem Lysinanteil im Protein nachgewiesen wurden, verlief die Suche bei Weizen nach Hochlysin-Typen weitgehend erfolglos (Johnson und Mattern, 1987). Angesichts der hohen Zahl untersuchter Weizenakzessionen darf davon ausgegangen werden, dass die genetische Variation in der Lysinkonzentration im Protein definitiv relativ gering ist und substantielle Verbesserungen der ernährungsphysiologischen Qualität wahrscheinlich nur mit gentechnischen Methoden oder Mutationszüchtung erreichbar sind. Bei der Beurteilung der Möglichkeiten der Züchtung auf Lysin sind folgende Aspekte zu berücksichtigen:

- Wie Arbeiten mit Hochlysin-Mais und Hochlysin-Gerste zeigen, können Hochlysin-Gene den Ertrag und andere agronomische Eigenschaften negativ beeinflussen. So sind beim Mais die Hochlysin-Gene o_2 und fl_2 mit weichem Endosperm, Druschproblemen und schlechter Ausreife assoziiert. Bei Gerste wurde beobachtet, dass die Hochlysin-Gene pleiotrop die Endospermentwicklung behindern (Hoffmann et al., 1985). Die Übertragung von Hochlysin-Genen auf Weizen könnte also ebenfalls Probleme verursachen.
- Die Produktion von Lysin ist im Vergleich zu vielen anderen Aminosäuren energetisch relativ aufwendig (Bhatia und Rabson, 1987). Es ist allerdings fraglich, ob die Verfügbarkeit von Energie wirklich so begrenzt ist, dass die Steigerung der Lysinproduktion den Ertrag senkt (Bhatia und Rabson, 1987; Feil, 1997).
- Die Proteinverwertung kann auch durch die Kombination von Nahrungsmitteln mit unterschiedlicher, sich optimal ergänzender Aminosäurezusammensetzung verbessert werden kann. So bilden Hülsenfrüchte wegen ihrer hohen Lysinkonzentration eine sehr gute Ergänzung zu Getreide. Bei Körnerleguminosen wird nämlich die Wertigkeit des Proteins in der Regel durch die geringen Konzentrationen der schwefelhaltigen Aminosäuren Methionin und Cystin limitiert, Valin und Threonin sind die nächstlimitierenden Aminosäuren (Eggum und Beames, 1983). Umgekehrt macht die von einigen Autoren De Lumen, 1990; De Lumen et al., 1997, Tabe und Higgins, 1998) propagierte Verbesserung des Aminosäurezusammensetzung des Proteins von Hülsenfrüchten durch gentechnische Massnahmen dann relativ wenig Sinn, wenn die Hülsenfrüchte zusammen mit Getreide verzehrt werden. Alternativ könnte die Diet mit reinem Lysin angereichert werden.

Die Möglichkeiten zur Senkung der Stickstoffdüngung durch die Verbesserung der ernährungsphysiologischen Qualität sind somit als eher gering einzuschätzen. Anders stellt sich die Situation bei der Backqualität dar. Die Backqualität des Weizens wird massgeblich von der Konzentration und der Qualität des Speicherproteins (= Kleber) bestimmt. Ein guter Brotweizen

sollte eine Proteinkonzentration von mindestens 12% aufweisen (Chung und Pomeranz, 1985). Um dieses Proteinziel zu erreichen, muss den Beständen ausreichend Stickstoff zur Verfügung gestellt werden. Daher ist es üblich, dem Weizen kurz vor der Blüte eine sogenannte Stickstoff-Spätgabe zu verabreichen. Spät applizierter Stickstoff ist wenig ertragswirksam, fördert jedoch die Bildung von Kornprotein. Da sich die Proteinkonzentration aus dem Verhältnis beider Größen ergibt (Feil, 1996), steigt die Proteinkonzentration infolge der späten Stickstoffapplikation stark an. Wenn bei hohen Erträgen nur wenig Stickstoff gedüngt wird, sinkt die Proteinkonzentration und damit die Backfähigkeit des Mehls auf einen nicht mehr tolerierbaren niedrigen Wert. Bei hervorragender Kleberqualität wären niedrige Proteinkonzentrationen jedoch durchaus akzeptabel. Sorten mit einer exzellenten Kleberqualität können also selbst bei geringer Stickstoffdüngung ein Mehl mit guten Backeigenschaften erzeugen; der Umfang der Stickstoffdüngung könnte folglich drastisch reduziert werden.

Zwar wurde schon in der Vergangenheit erfolgreich auf Backleistung selektiert (z.B. Canevara et al., 1994), im Sinne einer nachhaltigen Landwirtschaft wären jedoch Quantensprünge hinsichtlich der Verbesserung der Kleberqualität erwünscht. Diese lassen sich wahrscheinlich nicht mit herkömmlichen Züchtungsmethoden realisieren. Die Elastizität und Dehnbarkeit von Endosperm-Protein wird massgeblich von der hochmolekulare Gluteninfraktion (high molecular weight glutenin subunits; HMW-GS) beeinflusst. Zurzeit werden verschiedene Anstrengungen unternommen, die Möglichkeiten zur Verbesserung der Qualität und Erhöhung der Quantität der oben erwähnten Proteinfraktion zu erkunden (Altpeter et al., 1996; Blechl und Anderson, 1996; Shewry et al., 1997; Shimoni et al., 1997). Die Resultate dieser Arbeiten sind sehr ermutigend in Hinblick auf die Machbarkeit der gentechnischen Optimierung von Weizenprotein. Es besteht die Aussicht, dass durch die Gentechnik neuartige Verwendungsmöglichkeiten bei der Nahrungsmittelherstellung und als industrieller Rohstoff geschaffen werden (Shewry et al., 1997). Zusammengefasst lässt sich feststellen, dass die gentechnische Verbesserung der Kleberqualität einen substantiellen Beitrag zu einer nachhaltigeren Landwirtschaft liefern kann.

2.2.1.2 Biologische Stickstofffixierung

Zurzeit gelangt weitaus mehr Stickstoff durch biologische Stickstofffixierung als durch Stickstoffdüngung in terrestrische Ökosysteme (Peoples und Craswell, 1992). Grundsätzlich kann Luftstickstoff fixiert werden durch

- Symbiosen zwischen Blütenpflanzen und Mikroorganismen.
- Assoziationen zwischen Blütenpflanzen und Mikroorganismen.
- diazotrophe Endophyten.
- freilebende Mikroorganismen.

Der Beitrag symbiontischer Systeme zur gesamten biologischen Stickstofffixierung wird auf ca. 70% geschätzt (Peoples and Craswell, 1992). Es existieren verschiedene symbiontische Systeme. In Ackerbaugebieten wird am meisten Stickstoff durch die Symbiose zwischen Leguminosen und den Gattungen *Rhizobium* und *Bradyrhizobium* fixiert. Bei den Leguminosenspecies liegt die potentielle biologische Stickstofffixierung häufig bei 200 bis 300 kg/N ha (Peoples et al., 1995).

Das Prinzip der symbiontischen Stickstofffixierung ist, dass von den Knöllchenbakterien synthetisierte stickstoffreiche Verbindungen (Amide, Aminosäuren, Ureide, Proteine) den Leguminosen zur Verfügung gestellt werden, während die Leguminosen die Rhizobien mit Photosyntheseprodukten beliefern (Schubert, 1986).

Bei der assoziativen Stickstofffixierung leben die stickstoffbindenden Mikroorganismen („Diazotrophe“) in der Rhizosphäre der Blütenpflanzen, wobei die Diazotrophen Wurzelexsudate als Energiequelle und zum Aufbau ihrer Körpersubstanz verwenden. Zwar sind Assoziationen im allgemeinen weit weniger effizient als Symbiosen, bei einzelnen Kulturpflanzen kann die assoziative Stickstoffbindung jedoch einen wichtigen Beitrag zur Stickstoffernährung leisten (Boddey et al., 1995a, 1995b). Bei einer Reihe von Arten wurden Assoziationen mit diazotrophen Endophyten entdeckt, welche in Wurzeln, Stengeln und Blättern leben (Boddey et al., 1995a; Döbereiner et al., 1998). Einzelne Zuckerrohrlinien scheinen ihren gesamten Stickstoffbedarf durch die Vergesellschaftung mit diazotrophen Endophyten decken zu können (Boddey et al., 1995a). Freilebende Diazotrophe sind ubiquitär in Böden, ihr Beitrag zur gesamten biologischen Stickstofffixierung ist aber in der Regel unbedeutend (Bothe et al., 1983).

Symbiontische Systeme

Symbiontische Systeme stellen die bedeutendste Alternative zur Düngung mit Mineraldüngern dar. Von den landwirtschaftlichen Nutzpflanzen sind jedoch nur die Leguminosen mit der Befähigung zur symbiontischen Stickstofffixierung ausgestattet. Die heutige Forschung befasst sich aus diesem Grunde intensiv mit der Frage, ob sich stickstofffixierende Bakterien zu einer Symbiose mit Getreide und anderen Nicht-Leguminosen vereinigen lassen. Bereits in den frühen 70er Jahren wurde die Vermutung ausgesprochen, dass die Übertragung des gesamten Pakets der Stickstofffixierungsgene von freilebenden Diazotrophen auf Blütenpflanzen in Reichweite sei. Diese Prophezeiung erwies sich als unzutreffend. Im Zusammenhang mit der Stickstofffixierung in symbiontischen Systemen existieren zahlreiche fundamentale Probleme, welche verstanden und gelöst werden müssen, bevor die symbiontische Stickstofffixierung auch bei Nichtleguminosen etabliert werden kann (De Bruijn et al., 1991, 1995). Trotz des Umfangs der noch zu leistenden Arbeit ist nicht auszuschließen, dass die vielen Probleme irgendwann überwunden sein werden und es mit Hilfe der Gentechnik gelingt, Nichtleguminosen mit der Befähigung zur Fixierung von Luftstickstoff auszustatten.

Der Anbau von Nichtleguminosen, welche durch Symbiose Luftstickstoff zu binden vermögen, hätte weitgehende Konsequenzen für die pflanzliche Produktion. Zunächst ist es natürlich nicht mehr wie bisher notwendig, mineralische Stickstoffdünger direkt zur Kultur zu düngen; folglich würde der Input an fossilen Energieträgern für die Nahrungsmittelerzeugung stark sinken. Dies und die daraus resultierenden Kosteneinsparungen für die Landwirte sind ohne Einschränkung positiv zu bewerten. Einige sehr produktive Leguminosen wie Soja (Giller et al., 1994) und Körnererbsen (Schmidtke, 1996) können eine negative Stickstoffbilanz hinterlassen, d.h. durch die Abfuhr der Ernteprodukte wird dem Boden mehr Stickstoff entzogen als durch die biologische Stickstofffixierung gewonnen wird. Dies muss im Rahmen der Fruchtfolge durch zusätzliche Stickstoffzufuhr ausgeglichen werden. Die Übertragung der Befähigung der biologischen Stickstofffixierung auf alle Kulturarten ist also keine Garantie dafür, dass überhaupt kein mineralischer Stickstoffdünger mehr eingesetzt werden muss. Ferner sind noch einige

Effekte zu erwarten, deren Bedeutung für die Ertragsleistung, Produktqualität, Umwelt und Produktionstechnik sich derzeit noch nicht absehen lässt:

- So ist es wahrscheinlich, dass zur biologischen Stickstofffixierung befähigte Nicht-Leguminosen wie die Leguminosen hohe Stickstoffkonzentrationen im Gewebe aufweisen werden. Die Proteinkonzentration ist eine wichtige Determinante der ernährungsphysiologischen und technologischen Qualität. Bei einigen Kulturen sind hohe Proteinkonzentrationen im Erntegut erwünscht (Brotweizen, Futtergetreide), bei anderen führen diese zu teilweise massiven Beeinträchtigungen der Produktqualität (Braugerste, Brotroggen, Kartoffeln, Zuckerrüben).
- Zu beachten ist ferner, dass die biologische Stickstofffixierung wahrscheinlich auch das C/N-Verhältnis der Erntereste senken wird. Ein enges C/N-Verhältnis kann eine hohe Netto-Stickstoffmineralisierung unmittelbar nach der Ernte verursachen, während die Erntereste der heutigen Getreidesorten aufgrund ihres weiten C/N-Verhältnisses dazu tendieren, Bodenstickstoff zunächst zu immobilisieren. Es ist also damit zu rechnen, dass aus der Leguminosenproduktion bekannte anbautechnische Massnahmen (Untersaaten, Anbau von Zwischenfrüchten) getroffen werden müssen, um die Gefahr der Nitratauswaschung nach der Ernte zu minimieren.
- Das Schlüsselmolekül bei der biologischen Stickstofffixierung ist die Nitrogenase. Der an der Nitrogenase ablaufende Prozess, die Reduktion von Distickstoff zu Ammoniak, erfordert viel Energie. Diese wird aus der Oxidation von Assimilaten gewonnen, welche von der Kulturpflanze stammen (Rigaud, 1981; Raven, 1985). Der hohe Energiebedarf der biologischen Stickstofffixierung bildet wahrscheinlich die Ursache für das niedrige Ertragspotential vieler Leguminosen. Man vermutet, dass der geringe energetische Wirkungsgrad eine Ursache dafür ist, dass die biologische Stickstofffixierung im Verlauf der Evolution auf relativ wenige Taxa beschränkt blieb (Mohr und Schopfer, 1985). Die bei der industriellen Herstellung von synthetischen Stickstoffdüngern entstehenden hohen energetischen Kosten werden also auf das Feld verlagert. Es ist also zu befürchten, dass stickstofffixierende Nicht-Leguminosen aus bioenergetischen Gründen nur relativ geringe Erträge produzieren.
- In mehreren Untersuchungen wurde nachgewiesen, dass Leguminosen Rohphosphat effizienter als Gramineen auszunutzen vermögen (Van Ray und Van Diest 1979; Bekele et al. 1983; Giller und Cadisch, 1995). Diese offenbar für distickstofffixierende symbiontische Systeme charakteristische Eigenschaft (Giller und Cadisch, 1995) ist zumindest zum Teil auf die intensivere Ausscheidung von Protonen in die Rhizosphäre zurückzuführen. Stickstofffixierende Nichtleguminosen könnten also vielleicht diese sonst nur wenig verfügbare Phosphorquelle besser nutzen. Dies ist zwar grundsätzlich zu begrüßen, der Preis dafür ist jedoch, dass der Boden schneller versauert. Der Anbau von stickstofffixierenden Nichtleguminosen beschleunigt also möglicherweise die Azidifizierung unserer Böden.

Die Entwicklung von stickstofffixierenden nichtlegumen Kulturpflanzen bietet also ausserordentlich interessante Perspektiven auch im Hinblick auf die Gestaltung einer nachhaltigeren Landwirtschaft. Jedoch werden sich die Umweltwirkungen und Qualitätseigenschaften dieser

neuartigen Kulturpflanzen wahrscheinlich gravierend von denen des Ausgangsmaterials unterscheiden. Im Grunde handelt sich um vollkommen neue Kulturen, deren Anbau eine noch zu entwickelnde Produktionstechnik erfordert.

Assoziationen

Bei Getreide (Feil, 1997), aber auch anderen Kulturarten (Boddey et al., 1995a) wurden Sortenunterschiede in der Stickstofflieferung durch assoziative Diazotrophe gefunden. Bestimmte brasilianische Zuckerrohrsorten sollen bis über 150 kg N/ha/a aus der Assoziation mit Stickstoffbindern beziehen können (Boddey et al., 1995b). Die assoziative Stickstoffbindung kann also substantielle Beiträge zur Stickstoffernährung von Nutzpflanzen liefern. Bei der Beurteilung der Perspektiven der konventionellen, aber auch der gentechnischen Verbesserung der Effizienz der assoziativen Stickstoffbindung sind jedoch einige Punkte zu berücksichtigen:

- Im Gegensatz zu symbiontischen Systemen wird der fixierte Stickstoff nicht kontinuierlich an die Blütenpflanzen geliefert, sondern er wird erst nach dem Tod der Diazotrophen verfügbar. Die Blütenpflanze konkurriert dabei mit den Mikroorganismen der Rhizosphäre um den freigesetzten Stickstoff. Es besteht ferner die Gefahr, dass der von den Diazotrophen gebundene Luftstickstoff unter bestimmten Bedingungen durch Denitrifikation verloren geht (De Bruijn et al., 1995).
- Einerseits ist das Enzym Nitrogenase, das die Reduktion von Distickstoff zu Ammonium katalysiert, extrem empfindlich gegenüber höheren Sauerstoffkonzentrationen, andererseits erfordert die Erzeugung von ATP für den Reduktionsprozess eine konstante Sauerstoffversorgung. Symbiontische Systeme haben verschiedene Mechanismen zur Überwindung dieses „Sauerstoffparadoxons“ (De Bruijn et al., 1995) entwickelt und scheinen in dieser Hinsicht Assoziationen überlegen zu sein (Marschner, 1995). Es ist daher möglich, dass Assoziationen hinsichtlich ihrer Stickstofffixierungskapazität den symbiontischen Systemen prinzipiell unterlegen sind.
- Die assoziative Stickstofffixierung scheint nur bei C4-Arten unter tropischen Bedingungen, d.h. bei hoher Bodenfeuchtigkeit und hohen Temperaturen, wirklich effizient zu sein (Marschner, 1995). Das bessere Potential der C4-Arten ist wahrscheinlich darauf zurückzuführen, dass diese Kulturen aufgrund ihrer hohen Photosyntheseleistung mehr Exsudate in die Rhizosphäre als C3-Arten auszuschleiden vermögen. Die einzige zurzeit in der Schweiz in nennenswertem Umfang angebaute C4-Art ist Mais, die übrigen Getreidearten und Gräser gehören zu den C3-Arten. Allerdings gibt es einige C3-Arten wie die Sonnenblume, deren Photosyntheseleistung die der C4-Arten fast erreicht (Diepenbrock and Pasda, 1995). Somit ist die Sonnenblume vielleicht besser als C3-Getreidearten als Partner für die assoziative Stickstoffbindung geeignet.
- Da die diazotrophen Bakterien wie auch die Symbionten der Leguminosen auf die Bereitstellung von kohlenstoffhaltigen Substraten angewiesen sind, verursacht die assoziative Stickstoffbindung unvermeidbar bioenergetische Kosten für die Nutzpflanzen. Die Etablierung von leistungsfähigen Assoziationen zwischen Nutzpflanzen und diazotrophen Bakterien könnte daher das Ertragspotential der Kulturpflanzen beeinträchtigen.

Stickstoffbindende Endophyten

Angesichts der enormen noch zu bewältigenden Probleme bei der Etablierung von leistungsfähigen Symbiosen und Assoziationen mit Stickstofffixierern wurde vorgeschlagen, das Potential bakterieller diazotropher Endophyten auszubeuten. Diese existieren nicht nur beim Zuckerrohr, sondern offenbar auch beim Mais und vielen anderen Arten (Upchurch, 1996; Döbereiner et al., 1998). Durch gentechnische Methoden wird es vielleicht möglich, diazotrophe Endophyten auch in anderen, normalerweise nicht infizierten Nutzpflanzen zu etablieren. Jedoch ist es fraglich, ob solche Systeme auch unter den Bedingungen des gemässigten Klimas effizient genug sind, um einen signifikanten Beitrag zur Stickstoffernährung der Kulturpflanzen zu leisten.

Freilebende heterotrophe Stickstoffbinder

Die Effizienz der freilebenden heterotrophen Stickstoffbinder scheint durch die Verfügbarkeit von Kohlenstoff limitiert zu sein (Marschner, 1995). Das in der landwirtschaftlichen Produktion im gemässigten Klima in grossen Mengen anfallende Stroh ist eine potentielle Kohlenstoffquelle für freilebende Diazotrophe, welche von diesen bisher nur wenig genutzt wird. Nur wenige Diazotrophe sind befähigt, Stroh direkt abzubauen; vielmehr erfolgen Strohabbau und Stickstoffbindung in gemischten mikrobiellen Gemeinschaften. Es wurde daher vorgeschlagen, die Effizienz der Stickstofffixierung durch freilebende Diazotrophe durch die Selektion von geeigneten Mikroorganismengemeinschaften zu verbessern (Roper und Ladha, 1995). Weitere Fortschritte könnten dadurch erzielt werden, dass Gene, welche die für den direkten Strohabbau notwendigen Enzyme (Amylase, Cellulose, Pectinase, Xylanase) kodieren, in Diazotrophe integriert werden (Richardson et al., 1991). Zum Strohabbau befähigte freilebende Stickstoffbinder könnten sowohl bei der Kompostbereitung als auch direkt nach der Getreideernte auf dem Feld eingesetzt werden. Die Inokulation wird dort am erfolgreichsten sein, wo sich noch keine Mikroorganismen-populationen etabliert haben; die Effizienz von bodenapplizierten Präparaten kann durch die Konkurrenz der indigenen Mikroflora stark beeinträchtigt werden. Um die Stickstofffixierungsleistung zu verbessern, müssen geeignete pflanzenbauliche Massnahmen getroffen werden, so muss z.B. eventuell die Form der Strohapplikation angepasst werden (Roper und Ladha, 1995). Trotz dieser und weiterer Probleme sind Roper und Ladha (1995) der Ansicht, dass die Förderung der Stickstofffixierung durch freilebende Organismen signifikante Kostenvorteile für den Produzenten bringen und zur Erhaltung der Bodengesundheit beitragen kann.

2.2.2 Phosphor

Nach Stickstoff und Kalium ist Phosphor weltweit, aber auch in der Schweiz das am meisten gedüngte Nährelement (FAO, 1992). Phosphor ist für Pflanzen ein Hauptnährelement und auch für die menschliche und tierische Ernährung essentiell. Naturbelassene Böden enthalten meist nur wenig Phosphor. Wenn Ackerland über längere Zeiträume ohne externe Phosphorzufuhr genutzt wird, kann Phosphor zum am meisten ertragslimitierendem Nährelement avancieren. In Mitteleuropa wurde dieses Problem durch die gegen Ende des letzten Jahrhunderts aufkommende mineralische Phosphordüngung überwunden. Seit einigen Jahrzehnten gelangen zudem große Mengen an Phosphor durch den Import von Futtermitteln in die Schweiz, was zu einem

allgemeinen Phosphorüberschuss führte (Braun et al., 1994). Extrem gut mit Phosphor versorgte Böden findet man daher zumeist an Orten, wo infolge intensiver Schweine- und Broilermast große Mengen an organischen Düngern ausgebracht werden. In Gebieten, in denen die Infrastruktur für die Herstellung und Distribution von Phosphordüngern fehlt oder Phosphordünger im Vergleich zu den Produktpreisen zu teuer sind, sind die Böden dagegen nach wie vor stark phosphordefizient. In vielen afrikanischen Ländern sind die aktuellen Phosphorbilanzen negativ, d.h. es wird mehr Phosphor vom Feld exportiert als importiert (Stoorvogel et al., 1993).

Auf ackerbaulich genutzten Flächen sind die Phosphorverluste generell hoch, weil sehr viel Phosphor durch den Verkauf von Ernteprodukten abgeführt wird. Verluste durch Auswaschung sind dagegen meist unbedeutend, weil das Phosphat-Ion relativ immobil ist. Jedoch kann Phosphor durch Bodenerosion verloren gehen, wobei die Phosphorverluste mit zunehmender Phosphorkonzentration im Boden steigen. Im Sinne einer nachhaltigen Landwirtschaft sollte Phosphordünger aus verschiedenen Gründen so effizient wie möglich genutzt werden:

- die Phosphorvorräte und -reserven sind begrenzt.
- für die Herstellung der (teuren) Phosphordünger muss Energie aufgewendet werden.
- Phosphorverluste aus der Landwirtschaft können die Umwelt schädigen.

Der Pflanzenzüchtung bieten sich mehrere Möglichkeiten, die mit Phosphor verbundenen Umweltprobleme zu reduzieren:

- Verbesserung der Phosphoraufnahmeeffizienz.
- Verminderung des Phosphorexportes durch Abfuhr des Ernteguts.
- Reduktion der Konzentration von Phytat in Futtermitteln.

2.2.2.1 Verbesserung der Phosphoraufnahmeeffizienz

Es liegen viele Beispiele dafür vor, dass sich Arten (Föhse et al. 1988, Van Ray und Van Dienst 1979, Bolland 1997) und Sorten (Römer et al., 1988; Khalil et al., 1994; Manske et al., 1995; Yan et al. 1995, Gahoonia und Nielsen 1997; Gahoonia et al., 1997; Schulthess et al., 1998; Ma et al., 1998) in der Phosphoraufnahmeeffizienz unterscheiden können. Verschiedene Faktoren können zu der Variabilität in der Phosphoraufnahmeeffizienz beitragen (Marschner 1995, 1998):

- Unterschiede in der Wurzelmorphologie (Barber, 1984; Römer et al. 1988; Gahoonia et al., 1997; Ma et al. 1998; Gahoonia und Nielsen 1997; Gahoonia et al., 1997).
- Unterschiede in der Symbiose mit Mycorrhizen (Yost und Fox, 1979; Khalil et al. 1994; Manske et al., 1995; Bryla und Koide, 1998).
- Unterschiede in den chemischen Merkmalen der Wurzelumwelt (Gill et al., 1994; Dinkelaker et al., 1995; Li et al., 1997).

Da die Böden zu Beginn der systematischen Nutzpflanzenzüchtung sehr phosphorarm waren und die Phosphorgehalte der Böden erst im Laufe der Jahrzehnte auf die heutigen sehr hohen Werte stiegen, könnte man vermuten, dass alte Sorten besser an Phosphormangel adaptiert sind. In Untersuchungen mit Weizen wurde diese Hypothese jedoch nicht bestätigt (Horst und Wiesler,

1993); alte und neue Weizensorten unterscheiden sich offenbar auch nicht hinsichtlich des Grades der Mycorrhizierung (Stöppler, 1988). Angesichts der grundsätzlichen Möglichkeiten zur effizienteren Erschließung der Bodenphosphorvorräte und der bereits nachgewiesenen genotypischen Variation kann davon ausgegangen werden, dass eine Züchtung auf höhere Phosphoraufnahme erfolgreich sein könnte. Bei der Beurteilung der Möglichkeiten zur Verbesserung des Phosphoraneignungsvermögens unserer Kulturpflanzen sind mehrere Aspekte zu berücksichtigen:

- Die Pflanzenzüchtung scheint bisher den Beitrag von Mycorrhizen zur Phosphorernährung ignoriert zu haben. Daher befürchten Smith et al. (1993) einen Verlust an genetischer Variabilität. Bisher sind offenbar keine Assoziationen von Cruciferen und Chenopodiaceen mit Mycorrhizen bekannt worden (Harley und Harley, 1987). Dieser mutmassliche Nachteil kann möglicherweise durch Gentechnik beseitigt werden, indem die Befähigung zur Mycorrhizierung von anderen Arten übernommen wird. Auch Proteoidwurzeln bildende Arten sind offenbar selten mit Mycorrhizen vergesellschaftet (Brundett und Abbott, 1991). Diese Arten besitzen jedoch bereits einen anderen, äusserst effizienten Mechanismus zur Erschließung der Bodenphosphorvorräte (s.u.). Die Assoziierung dieser Arten mit Mycorrhizen würde wahrscheinlich keine Vorteile bringen.
- Bei der Erschließung von schwer löslichen anorganische Phosphorverbindungen sind vor allem organische Säuren und phenolische Verbindungen, welche in die Rhizosphäre ausgeschieden werden, involviert (Marschner, 1995). Mehrere Prozesse (Senkung des pH-Werts in der unmittelbaren Wurzelumwelt, Desorption durch Ionenaustausch, Chelatisierung) können an der Phosphatmobilisierung beteiligt sein. Wahrscheinlich ist es auch mit konventionellen Züchtungsmethoden möglich, die Eigenschaften der Rhizosphäre so zu verändern, dass die Bodenphosphorvorräte besser erschlossen werden. Jedoch gibt es bereits Überlegungen, hohe Ausscheidung von Zitronensäure kodierende Gene aus Bodenbakterien zu isolieren und in Nutzpflanzen zu integrieren (Stevens, 1997). Manche Arten wie die Weisse Lupine (*Lupinus albus*) vermögen schlecht verfügbare Phosphorverbindungen zu nutzen, indem sie Proteoidwurzeln bilden, welche große Mengen von Zitronensäure in die Rhizosphäre freisetzen. Die Befähigung zur Bildung von zitronensäureausscheidenden Proteoidwurzeln könnte durch gentechnische Verfahren auf andere Nutzpflanzen übertragen werden. Als Zielkulturen kämen vielleicht in erster Linie die relativ phosphatbedürftigen Leguminosen in Frage.
- Unabhängig von der Art und Weise, wie das Phosphoraneignungsvermögen verbessert wird, sind bioenergetische Aspekte zu beachten. Der Aufbau und die Unterhaltung eines umfangreichen Wurzelsystems beanspruchen die Assimilat- und Nährstoffressourcen der Pflanzen in Anspruch und können daher die Ertragsleistung beeinträchtigen (de Willigen und van Noordwijk, 1987). Bei Pflanzen, deren Wurzeln mit Mycorrhizen infiziert sind, werden weitaus grössere Mengen an Photosyntheseprodukten in die Wurzeln alloziert und dann dort veratmet als bei Pflanzen, deren Wurzeln mycorrhizafrei sind (Baas et al., 1989). Die erhöhte Respiration wird durch das Wachstum und den Unterhalt der Mycorrhiza verursacht (Marschner, 1995). Bei stark infizierten Pflanzen kann die Mycorrhizabiomasse bis zu 20% der Wurzelbiomasse erreichen, Werte von 10% sind jedoch häufiger (Fitter, 1991). Eine

starke Mycorrhizierung verursacht also erhebliche energetische Kosten für die infizierten Pflanzen. Die Neigung zur Proteoidwurzelbildung und auch der Umfang der Ausscheidung von organischen Säuren geht in der Regel zurück, wenn die Phosphorversorgung des Bodens ausreichend ist. Dies kann als sinnvolle Reaktion auf die hohen energetischen Kosten der Exsudation von organischen Säuren zur Phosphatmobilisierung interpretiert werden. Bei Lupinen wurde zum Beispiel festgestellt, dass für die Ausscheidung von Zitronensäure in die Rhizosphäre insgesamt 23% der Nettophotosyntheseleistung verbraucht wurden (Marschner, 1995).

Es bestehen also mehrere Optionen, die Bodenphosphatvorräte effizienter zu erschliessen. Alle für eine bessere Ausnutzung des Bodenphosphats relevanten Merkmale sind höchstwahrscheinlich der genetischen Manipulation zugänglich. Wenn das Phosphoraneignungsvermögen unserer Kulturpflanzen verbessert wird, können die heute für die optimale Phosphornahrung erforderlichen Phosphorgehaltsstufen des Bodens abgesenkt werden. Dies ist aus ökologischer Sicht ausserordentlich wünschenswert, weil dadurch das Ausmass der Gewässereutrophierung durch Phosphorverluste infolge Bodenerosion reduziert wird. Zu bedenken ist jedoch, dass unabhängig vom Mechanismus, welcher der verbesserten Phosphoraufnahme zugrunde liegt, in jedem Falle der Aufwand an Energie für die Phosphataquisition steigt. Die Züchtung auf besseres Phosphataneignungsvermögen könnte daher tendenziell die Erträge senken oder zumindest den genetischen Ertragsfortschritt hemmen. Dieser ungünstige Nebeneffekt der Selektion auf effizientere Phosphoraufnahme wird jedoch nur dann eintreten, wenn die Verfügbarkeit von Assimilaten ertragslimitierend ist.

2.2.2.2 Reduktion des Phosphorexports

Wenn der Bodenphosphorvorrat durch phosphoraufnahmeeffiziente Neuzüchtungen besser erschlossen wird, kann die Phosphordüngung über viele Jahre reduziert werden. Wenn dem Boden mehr Phosphor entnommen als durch Düngung zugeführt wird, werden sich langfristig die Phosphorvorräte des Bodens erschöpfen. Im Sinne einer nachhaltigen Landwirtschaft wäre es daher günstig, die Abfuhr von Phosphor vom Ackerland zu reduzieren. Dies könnte durch Züchtung auf eine geringere Phosphorkonzentration im Erntegut erreicht werden (Lipsett und Dann, 1983). Bei allen Getreidearten, aber auch bei Leguminosen wurde eine teilweise beträchtliche sortenspezifische Variabilität in der Kornphosphorkonzentration nachgewiesen (Batten, 1986; Raboy et al., 1984, 1989, 1991; Feil und Fossati, 1995; Schulthess et al., 1997). Ein Teil der Variation lässt sich auf die Existenz einer negativen Korrelation zwischen Ertrag und Kornphosphorkonzentration zurückführen, d.h. die Phosphorkonzentration im Produkt nimmt mit zunehmender Ertragsleistung der Sorte ab (Peterson et al., 1983; Feil und Bänziger, 1999). In Übereinstimmung damit wurden in vergleichenden Untersuchungen an alten und neuen Weizensorten gefunden, dass die Kornphosphorkonzentration im Laufe der Sortenevolution absank (Calderini et al., 1995; Manske et al., 1998). Eine Konsequenz der inversen Beziehung zwischen Ertrag und Kornphosphorkonzentration ist, dass beim Anbau von Hohertragsorten dem Boden vergleichsweise weniger Phosphor pro Einheit Ertrag entzogen wird (Feil und Bänziger, 1999). Neben dieser ertragsabhängigen Variation in der Kornphosphorkonzentration existiert noch eine ertragsunabhängige Komponente, d.h. Sorten mit ähnlichen Kernerträgen

können sich in der Kornphosphorkonzentration und damit im Phosphorentzug unterscheiden (Feil et al., 1993; Feil und Fossati, 1995; Schulthess et al., 1997). Die bisherigen Forschungsergebnisse lassen sich also wie folgt zusammenfassen:

- Die Züchtung auf Ertrag scheint vielfach eine effizientere Umsetzung des entzogenen Phosphors in Ertrag zu bewirken
- Die Existenz einer ertragsunabhängigen genotypischen Variation in der Phosphorkonzentration des Korns weist darauf hin, dass Selektion auf geringere Phosphorentzüge grundsätzlich möglich ist

Es kann angenommen werden, dass sich die Phosphorentzüge von unseren Feldern durch die konventionelle Züchtung auf niedrige Phosphorkonzentration im Erntegut senken lassen. Weitere Verbesserungen lassen vielleicht durch die Gentechnologie erreichen. Der Anbau von Sorten mit geringen Phosphorentzügen schont zwar die Bodenphosphorvorräte und stellt deshalb einen wichtigen Beitrag zu einer nachhaltigen Landwirtschaft dar, jedoch dürfen die Auswirkungen der Züchtung auf niedrige Phosphorkonzentration im Erntegut auf die Produktqualität nicht unberücksichtigt bleiben:

- Wenn das Ernteprodukt als nachwachsender Rohstoff verwendet wird, spielt die Kornphosphorkonzentration keine Rolle.
- Eine moderate Senkung der Phosphorkonzentration in der menschlichen Nahrung ist sicherlich zu vertreten, weil Phosphormangel bei gesunden Menschen praktisch nicht vorkommt (Hazell, 1985).
- Dagegen ist der Phosphorbedarf von hochproduktiven Nutztieren häufig so hoch, dass der Diät noch Phosphor hinzugefügt wird. Dies geschieht jedoch nicht, weil das Futter zu wenig Phosphor enthält, sondern weil Phytat, die Hauptspeicherform des Phosphors in Getreide, Leguminosen und Raps, von Nicht-Wiederkäuern wie Schweinen und Hühnern nur schlecht verwertet werden kann (Lantzsch et al., 1992; Usayran und Balnave, 1995).

2.2.2.3 Das Phytatproblem

Bei zahlreichen Kulturarten ist Phytat, ein Salz der Phytinsäure (Myo-Inositol 1, 2, 3, 4, 5, 6-Hexakisdihydrogenphosphat) die Hauptspeicherform für Phosphor (Lolas et al., 1976; Griffiths und Thomas, 1981; Raboy et al., 1984, 1989, 1991; Farinu und Ingraio, 1991; Bell und Rakow, 1996; Feil und Fossati, 1997; Matthäus, 1997). Aus verschiedenen Gründen sind hohe Phytatkonzentrationen in der Nahrung unerwünscht. Wie bereits erwähnt, können Monogastriden wie Schweine, Hühner und auch Menschen Phytat-Phosphor nur schlecht verwerten. Deshalb scheiden mit Getreide und Leguminosen ernährte Nicht-Wiederkäuer Phytat-Phosphor in grossen Mengen aus. Die tierischen Exkremamente werden als Dünger auf den Feldern ausgebracht, wo sich bei hohem Tierbesatz Phytat-Phosphor anreichert. Phytat-Phosphor ist zwar relativ immobil, kann aber durch Bodenerosion und Abschwemmung in Gewässer gelangen und diese eutrophieren. Phytat wird gelegentlich als toxisch wirkender Stoff bezeichnet, weil es Spurennährelemente wie Eisen, Kupfer und Zink im Verdauungstrakt von Nicht-Wiederkäuern chelatisieren und somit deren Verfügbarkeit reduzieren kann (Reddy et al., 1982; Zhou und Erdmann, 1995). Dies muss

bei der Zusammenstellung der Diät von monogastrischen Nutztieren berücksichtigt werden. Bei menschlicher Nahrung wird häufig ein grosser Teil des Phytats während des Zubereitungsprozesses abgebaut (Harland und Harland, 1980; Marfo et al., 1990; Lorri und Svanberg, 1995). Dennoch soll der Konsum von phytatreichen Produkten die Entstehung von Mineralstoffmangel auch beim Menschen begünstigen. So wurde der in einigen ländlichen Regionen des Irans auftretender Zwergwuchs bei Jugendlichen mit dem Verzehr phytatreicher Nahrung und dem daraus resultierenden Zinkmangel in Verbindung gebracht (Hambidge and Walravens, 1976). Die Präsenz von Phytat verursacht Probleme bei der Nassvermahlung von Mais für die Gewinnung von verschiedenen Fraktionen wie Stärke, Protein und Öl (Caransa et al., 1988). Die Senkung des Anteils des Phytat-Phosphors an der gesamten Phosphormenge im Erntegut bietet somit diese Vorteile:

- Weniger Umweltprobleme infolge verringerter Ausscheidung von Phytat-Phosphor durch monogastrische Nutztiere (Pen et al., 1993; Feil und Fossati, 1997).
- Verbesserte Verfügbarkeit von Spurennährelementen bei Mensch und Tier (Pallauf und Rimbach, 1997).
- Reduzierter Bedarf an Phosphor- und Spurennährelementsupplementen in der Tierernährung (Pallauf und Rimbach, 1997).
- Bessere Resultate bei der Nassvermahlung von Mais (Caransa et al., 1988).

Es wurden verschiedene Möglichkeiten zur Lösung der Phytat-Problematik vorgeschlagen:

- Züchtung auf niedrigere Phytatkonzentration (Bassiri und Nahapetian, 1979; Raboy et al., 1991; Feil und Fossati, 1997).
- Hinzufügung von mikrobieller Phytase zur Diät (Lei et al., 1993; Dünghoef et al., 1994; Pallauf et al., 1994).
- Hinzufügung von gentechnisch veränderten, phytasereichen Komponenten zur Diät von Nutztieren (Pen et al., 1993; Pen, 1996).
- Verwendung von phytasereichem Mais für die Nassvermahlung (Caransa et al., 1988).

Untersuchungen an Soja (Lolas et al., 1976; Raboy et al., 1984), Fababohnen (Griffiths und Thomas, 1981), Weizen (Lolas et al., 1976; Raboy et al., 1991), Hafer (Lolas et al., 1976), Gerste (Lolas et al., 1976) und Triticale (Feil und Fossati, 1997) weisen darauf hin, dass bei Sorten

- die Konzentrationen von Phytat-Phosphor und Gesamtphosphor hoch und positiv korreliert sind und
- der Anteil von Phytat-Phosphor am Gesamtphosphor nur wenig variiert.

Das Enzym Phytase katalysiert die Hydrolyse der Phytinsäure. Futtermittel, welche mikrobielle Phytase enthalten, werden zwar bereits erfolgreich in der Praxis eingesetzt, befriedigen im Hinblick auf das Phytatproblem jedoch noch nicht vollständig, weil die Phytase nicht ausreichend stabil ist. Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die Ausscheidung von grossen Mengen von Phytat durch Nicht-Wiederkäuer eine wesentliche Ursache für Eutrophierung unserer Gewässer darstellt. Die Pflanzenzüchtung kann durch ihren Beitrag zur Lösung des

Phytatprobleme einen wesentlichen Beitrag zu einer nachhaltigeren Landwirtschaft leisten:

- Es ist durch Mutationszüchtung gelungen, Mais mit um 65% reduzierten Phytatgehalten (lpa1-1) bei gleichzeitig unveränderten Gehalten an Gesamtphosphor zu erzeugen. Allerdings traten zum Teil Ertragseinbußen auf, deren Ursache noch weiter analysiert werden muss (Ertl et al., 1998). An Menschen durchgeführte Versuche weisen darauf hin, dass der Konsum von lpa1-1-Mais im Vergleich zum Wildtyp die Eisenverfügbarkeit verbessert (Mendoza et al., 1998). Es wäre natürlich interessant, die lpa-Eigenschaft auf andere Getreidearten, vornehmlich Futtergetreide, zu übertragen.
- Von grosser ökologischer und ernährungsphysiologischer Relevanz ist die Entwicklung von phytasereichen Futterkomponenten. Pen et al. (1993) transferierten ein Phytase kodierendes DNA-Fragment von *Aspergillum niger* auf die Modellpflanze Tabak. Samen des gentechnisch veränderten Tabaks wurden einer phytathaltigen Diät für Broiler beigemischt. Die mit dem transgenem Tabak gefütterten Broiler wuchsen signifikant schneller als die Tiere, welche keine Phytase in ihrer Nahrung hatten. Die Phytase erwies sich als erstaunlich stabil unter verschiedenen Lagerbedingungen. Nach diesen sehr ermutigenden Resultaten kann die Entwicklung wie folgt verlaufen: Das Merkmal „hohe Phytaseaktivität“ wird von *Aspergillus niger* auf einige produktive Kulturarten, z.B. Raps und Mais, transferiert. Die transgenen Sorten werden auf einigen wenigen 1000 Hektaren angebaut; das Erntegut wird als gentechnisch veränderte Komponente mit hoher Phytaseaktivität den Nutztierdiäten beigemischt. Aber es ist natürlich auch möglich, in der Tierernährung relevanten Getreide- und Leguminosenarten (Denbow et al., 1998) grundsätzlich mit einer hohen Phytaseaktivität auszustatten. Dieses Konzept lässt sich auf zellwandauflösende Enzyme übertragen, mit dem Ziel, die Verdauung von Zellwänden und damit die Futterverwertung zu verbessern (Pen et al., 1993).
- Ein weiterer Anwendungsbereich von phytasereichem Mais ist die Nassvermahlung. Durch die Hinzufügung von Phytase bzw. die Verwendung von gentechnisch verändertem, phytasereichem Mais könnte die Stärkeausbeute erhöht und gleichzeitig der Energieverbrauch gesenkt werden (Caransa et al., 1988).

Die ökologischen, ökonomischen und ernährungsphysiologischen Vorteile der erwähnten gentechnisch veränderten Produkte sind gravierend. Bei der Beurteilung der ernährungsphysiologischen Qualität aus der Sicht des Menschen ist zu berücksichtigen, dass neuere Untersuchungen andeuten, dass extrem phytatarne Nahrung das Auftreten von Zivilisationskrankheiten fördern kann (Zhou und Erdman, 1995; Pallauf und Rimbach, 1997; Shamsuddin et al., 1997).

2.2.3 Fruchtfolge

In Mitteleuropa ist es üblich, mehrere Früchte in einer geregelten zeitlichen Aufeinanderfolge anzubauen. Einige Grundlagen der Fruchtfolgegestaltung waren bereits im 16. Jahrhundert bekannt (Tusser, 1580). Letztlich wird die Fruchtfolge von ökonomischen Faktoren bestimmt, wobei die monetäre Leistungen der Kulturen und die Faktorausstattung (Verfügbarkeit von Arbeit, Maschinen, Gebäude, Kontingenten) berücksichtigt werden. Der Bauer wird im

allgemeinen versuchen, die wirtschaftlich attraktivsten Früchte möglichst häufig anzubauen. Bei geringen Anbauabständen können jedoch verschiedene Probleme auftreten:

- Verstärkter Befall der Pflanzen mit Krankheiten und Schädlingen. Der einseitige Anbau bestimmter Kulturen und häufig auch verwandter Arten begünstigt das Auftreten von Schädlingen und Krankheiten (Beispiele: der Pilz *Gaeumomyces graminis* bei Weizen und anderen Getreidearten; die Zystennematodenarten *Globodera rostochiensis* und *G. pallida*). Bei der Planung der Fruchtfolge ist zu berücksichtigen, dass in manchen Fällen sogar nicht verwandte Arten von den selben Krankheiten befallen werden können (Beispiel: *Heterodera schachtii* bei Betarüben und Raps).
- Verstärktes Auftreten von Unkräutern und Ungräsern. Kulturpflanzenbestände weisen spezifische Umweltverhältnisse auf, welche adaptierten Unkräutern und Ungräsern Wachstum und Vermehrung gestatten. Selbstfolge und einseitige Fruchtfolgen (Beispiele: nur Getreide, nur Hackfrüchte, nur Winter - oder Sommerkulturen) fördern die massenhafte Ausbreitung von spezialisierten Unkräutern.
- Verschlechterung der Nährstoffverfügbarkeit und der Bodenstruktur. Einseitige oder falsch konzipierte Fruchtfolgen können die Verarmung des Bodens an bestimmten Nährstoffen und den Abbau des Humusvorrates verursachen und zum Verlust von wertvollem Mutterboden durch Erosion beitragen (Beispiel: schlechte Bodenstruktur und Erosion durch häufigen Silomaisanbau).

Diese Probleme werden zwar nicht vollständig gelöst, aber immerhin deutlich reduziert, wenn in einer Rotation zu etwa gleichen Teilen Getreide, Hackfrüchten und Leguminosen angebaut werden und noch einige weitere Regeln befolgt werden. Die bereits vor Jahrzehnten gewonnenen Erkenntnisse über die optimale Fruchtfolgegestaltung und das optimale Anbauverhältnis sind für die Biolandbau noch weitgehend aktuell. Vielfältige Fruchtfolgen und strenge Fruchtfolgeregeln, wie sie in einigen Lehrbüchern beschrieben werden (Lütke Entrup, 1986) haben dagegen im konventionellen Anbau aus verschiedenen Gründen stark an Bedeutung verloren:

- Heute stehen zum Teil Sorten zur Verfügung, die gegen Krankheiten und Schädlinge resistent sind (Beispiel: Resistenzen gegen *Globodera rostochiensis* und *Synchytrium endobioticum*).
- Viele Schädlinge, Krankheiten, Unkräuter und Ungräser sind zufriedenstellend mit Pestiziden bekämpfbar.
- Handelsdünger sind aufgrund der zurzeit niedrigen Preise für fossile Energieträger relativ billig.
- Handelsdünger sind aufgrund der günstigen politischen Konstellation in unbegrenzten Mengen und zu jeder Zeit verfügbar, so dass der Anbau von Leguminosen nicht mehr zwingend erforderlich ist.
- Fortschritte in der Landtechnik in Kombination mit geeigneten Herbiziden gestatten auch im hügeligen Gelände den verstärkten Anbau von erosionsfördernden Früchten (Beispiel: Mulch- und Direktsaat im Maisanbau).

- Schlagkräftigere Maschinen machen es möglich, sich auf einige wenige Kulturen zu beschränken.
- Inzwischen gibt es viehlos wirtschaftende Betriebe, in denen der Anbau von Futterpflanzen nicht mehr sinnvoll ist (Beispiele: Klee gras, Luzernegras).

Die Konzentration der Betriebe auf einige wenige Früchte kann also einen höheren Einsatz von Pestiziden und Handelsdüngern zur Folge haben. Es gibt jedoch noch weitere Argumente für den Anbau möglichst vieler Arten. Häufig ist eine regionale Spezialisierung auf bestimmte Früchte zu beobachten, deren Anbau aufgrund der Bodeneigenschaften, der klimatischen Bedingungen oder aus infrastrukturellen Gründen besonders rentabel ist. Hohe Anbaukonzentrationen bestimmter Kulturen in einer Region erhöhen den lokalen Krankheits- und Schädlingsdruck, wodurch der Aufwand an Pflanzenschutzmitteln steigen kann (Beispiel: *Phytophthora infestans* im Kartoffelanbau). Es ist zu erwarten, dass vereinfachte Fruchtfolgen die Artenvielfalt bei Unkräutern und tierischen Organismen senken; die zunehmende Eintönigkeit der Agrarlandschaft vermindert den Freizeitwert des ländlichen Raums für den Menschen. Der Trend zu immer artenärmeren Fruchtfolgen steht also nicht im Einklang mit dem Nachhaltigkeitsprinzip, das einen möglichst geringen Einsatz von Agrochemikalien und die Erhaltung der Artenvielfalt fordert. Um die Landwirtschaft nachhaltiger zu gestalten, müssen Anreize für den Landwirt geschaffen werden, ökonomisch bislang wenig interessante Kulturen zu integrieren. Dies kann geschehen, indem

- die Leistung von Direktzahlungen an die Einhaltung von genau festgelegten Fruchtfolgeregeln und Anbauverhältnissen gebunden wird. Das schweizerische IP-Programm verlangt, dass auf einem Betrieb jährlich mindestens vier Früchte angebaut werden; der Getreideanteil an der Ackerfläche darf 66 % nicht überschreiten, der maximale Leguminosenanteil ist auf 33 % beschränkt (Wirz, 1998).
- der Anbau bisher unrentabler Früchte gezielt subventioniert wird.
- die monetäre Leistung von bisher wenig rentablen Kulturen durch Züchtung so verbessert wird, dass sich deren Anbau auch ohne Zwang und Subventionen lohnt.

Die zuletzt genannte Möglichkeit ist sicherlich die beste. Die monetäre Leistung von alternativen Kulturen lässt sich erhöhen, indem der Ertrag gesteigert wird oder Qualitätsmerkmale verändert werden. Durch Züchtung kann

- die Konkurrenzfähigkeit von klimatisch adaptierten, aber bislang unbedeutenden Früchten verbessern, indem die Massenerträge gesteigert werden.
- die Anbauwürdigkeit von Arten verbessern, welche aufgrund ihrer hohen Temperaturansprüche bislang wenig berücksichtigt wurden. Wie das Beispiel des Mais zeigt, ist so etwas durchaus möglich. Während der Mais, eine Kulturpflanze tropischer Herkunft, bis vor ca. 20 Jahren nur in klimatisch begünstigten Regionen erfolgreich angebaut werden konnte, nimmt er zurzeit ca. 20 % der gesamten Ackerfläche in der Schweiz ein.
- bislang nicht oder wenig konkurrenzfähige Arten mit besseren oder neuartigen Qualitätseigenschaften auszustatten. Dieses Ziel kann zwar grundsätzlich durch konventionelle Züchtung erreicht werden (Beispiel: die erucasäurefreien und glucosinolatarmen Doppelnull-

Sorten bei Raps), gentechnische Methoden bieten aber weitaus mehr Optionen, weil Qualitätseigenschaften von exotischen Pflanzen auf klimatisch adaptierte Arten übertragen werden können.

Diese Überlegungen betreffen u.a. die zurzeit nur wenig oder überhaupt nicht angebauten Arten Leindotter, Mohn, Koriander, Weisser Senf, Brauner Senf, Saflor, Ölkürbis, Krambe, Lein, Buchweizen, Amaranth, Quinoa, Topinambur, Chinaschilf, Hanf, und Kenaf. Im Sinne des Nachhaltigkeitskonzepts wäre die intensive züchterische Bearbeitung dieser Arten sehr wünschenswert. Zu berücksichtigen ist allerdings, dass die Eingliederung einiger der genannten Spezies in die Fruchtfolgen dann keine Vorteile aus phytosanitärer Sicht bringt, wenn Unverträglichkeiten mit bereits angebauten Früchten bestehen. Eine wichtige Komponente der Bemühungen um eine nachhaltige Landwirtschaft ist die Erhöhung des Anteils von Leguminosen in der Fruchtfolge, weil dadurch die heute sehr getreidelastigen Fruchtfolgen aufgelockert werden und Leguminosen ohne Stickstoffdüngung angebaut werden können. Aus Sicht der nachhaltigen Landwirtschaft könnte es also lohnend sein, die Wettbewerbsfähigkeit der klimatisch adaptierten Leguminosen Ackerbohne, Erbse und Lupine zu verbessern. Diese Arten stehen aus verschiedenen Gründen zurzeit im Schatten der sehr leistungsfähigen Sojabohne, die infolge intensiver züchterischer Bemühungen zwar auch in der Schweiz anbauwürdig ist, deren Anbaufläche aus handelspolitischen Gründen aber nicht weiter ausgedehnt werden kann. Körnerleguminosen werden primär zur menschlichen und tierischen Ernährung genutzt, wobei insbesondere der im Vergleich zu Getreide hohe Proteingehalt der Körner von Bedeutung ist. Durch Züchtung unter Einschliessung gentechnischer Methoden könnte der Proteinерtrag erhöht, die Qualität des Proteins verbessert (De Lumen, 1990; De Lumen et al., 1997, Tabe und Higgins, 1998) und die Konzentrationen der in den meisten Leguminosen vorhandenen antinutritiven Substanzen (Aufhammer, 1998) gesenkt werden. Körnerleguminosen können auch als Industriepflanzen, z.B. zur Erzeugung von Amylose (Beispiel: Markerbsen), verwendet werden. Allerdings ist bei der Markerbse der Kleinkornanteil in der Stärke hoch und die Stärkegewinnung wegen der problematischen Stärke-Protein-Matrix sehr aufwendig (Menge-Hartmann, 1997). Ziel der Pflanzenzüchtung sollte daher sein, Markerbsensorten mit hohen Erträgen und besseren technologischen Eigenschaften zu entwickeln. In der Papier-, Holz, Textil- und chemischen Industrie werden große Mengen an Eiweissstoffen benötigt. Diese könnten ausser von der Sojabohne auch von Ackerbohnen, Erbsen und Lupinen geliefert werden, wobei das Leguminosenprotein allerdings in Konkurrenz mit Getreideprotein (Weizengluten, Maiszein) steht (Rühl, 1997).

Die konventionelle Züchtung als auch die Gentechnologie können also durchaus dazu beitragen, dass die Fruchtfolgen wieder vielfältiger werden. Es muss allerdings darauf hingewiesen werden, dass zumindest kommerzielle Züchter dazu tendieren, prioritär die heute ertraglich leistungsfähigsten Arten, in unserem Klimabereich also Weizen, Mais, Raps, Kartoffeln, Zuckerrüben, qualitativ zu verbessern bzw. mit neuartigen Qualitätsmerkmalen zu versehen oder mit besseren Resistenzeigenschaften auszustatten. Dadurch verschlechtern sich die Chancen alternativer Kulturen weiter. Im Extremfall könnte durch Anwendung gentechnischer Verfahren eine einzige Kulturart mit sehr hohem Ertragspotential, z.B. Mais, so variiert werden, dass durch den Anbau entsprechender Sorten alle nur denkbaren Qualitätsanforderungen abgedeckt werden. Dann wären Sorten verfügbar, deren Inhaltsstoffspektrum auf die Anforderungen der

Tierernährung zugeschnitten ist, andere Sorten würden spezifische Stärke- oder Ölfractionen für die Nahrungsmittelindustrie und den Nonfood-Bereich produzieren, wiederum andere Sorten wären für die Erzeugung von Protein vorgesehen oder dienen zur Herstellung von Brot. Die Konsequenz daraus wäre die zunehmende Dominanz einer einzigen Kulturart in der Agrarlandschaft - eine Entwicklung, welche dem Prinzipien einer nachhaltigen Landwirtschaft eindeutig widerspricht.

Schlussfolgerungen

Schlussfolgerungen für die Prioritätensetzung in Pflanzenzüchtungsprogrammen im Hinblick auf die Produktion von Pflanzensorten mit Eignung für deren Verwendung in nachhaltigen Landbausystemen.

In der Schweizerischen Getreidezüchtung (Eidgenössische Forschungsanstalten FAL, RAC) ist bereits seit Jahrzehnten zielgerichtet in Richtung nachhaltige Landwirtschaft gearbeitet worden, wobei die Entwicklung von Sorten mit guten Resistenzeigenschaften und hervorragender Qualität im Mittelpunkt stand. Gerade die Kombination dieser beiden Eigenschaften konnte nur mit grossem Aufwand durch eine sehr zielgerichtete Zuchtarbeit realisiert werden.

Dennoch sind für nachhaltige Landbauverfahren weitere zentrale Eigenschaftskomplexe in die Zuchtanstrengungen zu integrieren, deren Kombination mit einer hohen Ertragsleistung zwar die Marktchancen solcher Sorten wesentlich erhöhen würde, jedoch mit einem zusätzlichen, erheblichen Arbeitsaufwand verbunden wäre:

- Nährstoffaneignungsvermögen /Nährstoffeffizienz
- Konkurrenzkraft gegenüber Ackerbegleitflora
- Optimaler Habitus (Bodenbedeckung, Bewurzelung, ev. Mehrjährigkeit)
- Anpassung an pedoklimatische Bedingungen (optimale Anpassung an Anbaustandorte)
- Züchtung nicht nur auf Haupt- sondern auch auf Nebenprodukte (z.B. Körner und Fasergewinnung aus dem Halm)

Die Züchtung wird eine Optimierung von Nutzpflanzen für die nachhaltige Landwirtschaft durch bewusste Förderung der Pflanze als multifunktionales System realisieren können. Unter Pflanze als multifunktionalem System kann u.a folgendes verstanden werden:

- Träger verschiedener Ernteprodukte (z.B. Körner, Knollen, Stroh, Blätter, Wurzeln)
- Pflanze als Teil des Oekosystems (z.B. Lieferant organischer Substanz, Bodenbedecker, Bodenentseuchung, Wasserhaushalt und Struktur des Bodens, Erosionsschutz, Interaktionen mit Rhizosphäre).

Der Stellenwert der Multifunktionalität der Pflanzen als Rohstofflieferant für verschiedenste Produkte (z.B. Nahrungsmittel, Futtermittel, Energie, Fasern) muss im Hinblick auf die Nachhaltigkeit wie auch hinsichtlich des züchterischen Aufwandes gesehen werden. Es wird sich die Frage stellen, ob mehrere Eigenschaften auf einer Pflanze vereint oder verschiedene Nutzpflanzenarten mit nur einer Haupteigenschaft innerhalb einer Fruchtfolge eingegliedert werden sollten. Zur Diskussion stehen die Züchtung von perennierenden Sorten mit mehreren Eigenschaften und der Einsatz von Mischkulturen (Sorten- und Linienmischungen, Agrarforstwirtschaft, etc.).

3 Zuchtverfahren

Der Erfolg eines Zuchtprogramms für die Erzeugung von Sorten für nachhaltige Landwirtschaft hängt von vielen Faktoren ab. Die Kenntnisse und die Verfügbarkeit genetischer Ressourcen ist für die Realisierung der gesetzten Zuchtziele von primärer Bedeutung. Die Suche nach den passenden Spendern der gewünschten Eigenschaften umfasst das gesamte Spektrum der auf klassische Weise (Einkreuzung) kombinierbaren Pflanzenpartner. Die gentechnischen Verfahren verfügen theoretisch über die gesamten genetischen Ressourcen der Lebewesen, was sich insbesondere als Vorteil für Zuchtprogramme mit spezifischen Anforderungen erweist. Als Beispiel könnte die Übertragung der Fähigkeit zur biologischen Stickstofffixierung (BNF) auf Getreide genannt werden, welche für nachhaltige Systeme von grossem Interesse ist. Dieses Zuchtziel könnte auf Grund der zahlreich hierfür beteiligten Gene nur durch gentechnische Methoden gelöst werden.

Wie am obigen Beispiel ausgeführt stellt sich die Frage, ob die bisherigen Zuchtverfahren genügen oder ob neue Methoden erforderlich sind, um die Bemühungen um eine nachhaltige Landwirtschaft durch die Entwicklung von Sorten optimal zu unterstützen. Die prioritären Kriterien sind die Eigenschaften einer Sorte bzw. deren Eignung für die nachhaltigen Systeme. Die Zuchtmethodik an sich besitzt nur zweite Priorität, sie ist nur der Weg zum Produkt. Falls Gleichwertigkeit der klassischen und gentechnischen Methoden aus ökologischer, ökonomischer und gesellschaftlicher Sicht besteht, müssten weitere Kriterien, beispielsweise politische oder ethische zu einer Entscheidung herangezogen werden. Die aktuelle Diskussion zeigt, dass viele Faktoren in solchen Entscheidungsprozessen eine Rolle spielen, deren Konsequenzen oft erst später erkannt werden können. Undifferenzierte Ablehnung wie auch uneingeschränkte Akzeptanz sind unbrauchbare Verhaltensmuster für die sorgfältige, verantwortungsbewusste Einführung neuer Zuchtmethoden.

Für die Evaluierung der verschiedenen klassischen Zuchtmethoden (Auslese-, Kreuzungs-, Hybrid- und Mutationszüchtung) im Vergleich zu biotechnischen Verfahren (v.a. Gentechnik) hinsichtlich ihrer Bonität für nachhaltige Landwirtschaft sollten Kriterien auf experimenteller Basis erarbeitet werden. Die Einschätzung möglicher Risiken beruht vorderhand eher auf spekulativem Hintergrund und sollte durch Monitoring von Freilandexperimenten mit gentechnischen und klassisch-züchterisch erzeugtem Zuchtmaterial erfolgen. Der Anspruch an solche vergleichenden Freilandexperimente ist hoch, jedoch unumgänglich.

Die molekularbiologischen und gentechnischen Verfahren können die klassischen Zuchtverfahren in den folgenden Bereichen ergänzen:

1. Molekulare Charakterisierung der Ausgangslinien und des Zuchtmaterials. Die visuellen und biochemischen Marker werden durch die, in den letzten Jahren entwickelten molekularen Marker wesentlich ergänzt. Der Erforschung und Entwicklung molekularer Marker für die Identifikation von wertvollen Eigenschaften (z.B. für nachhaltige Landwirtschaft) wird hohe Priorität eingeräumt. In einigen Zuchtprogrammen werden Marker für monogen wie auch für polygen vererbte Eigenschaften eingesetzt und dadurch die Wahl von Kreuzungskombinationen verbessert und die Effizienz in der Selektion gesteigert. Die Analyse kann mit einer äusserst geringen Probenmengen auskommen und ist nicht destruktiv, das heisst, dass mit den

untersuchten Pflanzen weiter gezüchtet werden kann. Insbesondere für die Erfassung von Wurzeigenschaften, welche für die ökologisch ausgerichtete Züchtung wichtig sind, kann mit molekularen Methoden erfolgen. Klassische Zuchtverfahren können den Aufwand zur Wurzelanalyse und zur Selektion auf Wurzelparameter nicht rechtfertigen. Es ist zuerst die Aufgabe der Züchtungsforschung, solche Marker zu entwickeln, was ebenfalls sehr aufwendig ist. Die molekularen Analysemethoden zur Identifizierung von Genen bzw. deren Produkten stellen einen grossen Fortschritt dar und werden in Zukunft zu unentbehrlichen Routinemethoden in der Züchtung werden. Die Effizienz, Einfachheit in der Anwendung und die Preise pro Analyse müssen noch verbessert werden, damit auch mittlere und kleinere Zuchtbetriebe diese Verfahren auch anwenden können.

2. Die Züchtung mit Hilfe gentechnischer Verfahren erweitert die genetische Basis für die Kreation von Neukombinationen durch Gene, welche nicht durch konventionelle Kreuzung übertragen werden können oder nicht an unerwünschte Gene gekoppelt sind. Die optimale Integration von Genen im Akzeptorgenom, die stabile Expression und die unveränderte Weitergabe an die nächsten Generationen sind wichtige Forderungen an die gentechnischen Verfahren. Selbstverständlich müssen auch alle wichtigen agronomischen Eigenschaften erhalten bleiben. Die erwähnten Eckpfeiler der Nachhaltigkeit müssen auch für die gentechnischen Verfahren an sich beachtet und deren Bedingungen erfüllt werden. Das Potential einer gezielten Unterstützung der Sortenproduktion für die nachhaltige Landwirtschaft durch die Gentechnik ist gross, doch bedarf deren Anwendung einer sorgfältigen Begleitung mit entsprechenden Entscheidungsgrundlagen, welche die geforderten Kriterien erfüllen.
3. In der Züchtung und Züchtungsforschung werden schon seit vielen Jahren biotechnische Verfahren eingesetzt. Sie ergänzen die klassischen Zuchtverfahren oder sind schon voll integriert in die Programme, so dass sie vielfach nicht mehr als speziell biotechnische Verfahren ausgewiesen werden (Schmid und Büter, 1997). Dabei handelt es sich beispielsweise um Meristemkulturen, Doppelhaploide aus der Antheren- oder Mikrosporenkultur, Embryokultur, Protoplasten- und Einzelzellkultur, Zellfusionen und Somaklone. Bei diesen Methoden handelt es sich um nicht-gentechnische Verfahren, welche aber auf ihre Weise zu genetischer Veränderung führen. Einige dieser Verfahren sind sehr geeignet, die Sorten für den ökologischen Landbau zu erzeugen.

4 Fallstudien mit Modellkulturen

In dieser Studie sollen fünf Hauptkulturen genauer untersucht werden, und zwar im Hinblick auf bestimmte Zuchtziele, welche zum Teil schon durch die moderne Biotechnologie realisiert wurden oder in absehbarer Zeit als realisierbar betrachtet werden. Tabelle (3) zeigt eine Übersicht über die Kulturen mit den entsprechenden Zuchtzielen.

Tabelle 3: Spezifische Zuchtziele bei ausgewählten Kulturpflanzen

	Insektenresistenz	Virenresistenz	Pilzresistenz	Herbizidresistenz
Raps				Verschiedene Herbizide ¹
Körner- und Silomais	Maiszünsler <i>Ostrinia nubilalis</i>			Verschiedene Herbizide ²
Zuckerrüben		Erreger der Rizomania ³		Verschiedene Herbizide ¹
Kartoffeln	Kartoffelkäfer <i>Leptinotarsa decemlineata</i>	verschiedene Viren	Kraut- und Knollenfäule <i>Phytophthora infestans</i>	
Weizen			verschiedene Pilze (z.B. Braunrost)	

¹ z.B. Bastaresistenz; ² Herbizid in Streifenfrässaart; ³ Aderngelbfleckigkeitsvirus (*BNYVV*, *Beet necrotic yellow vein virus*)

Grundsätzlich müssen bei den ausgewählten Zuchtzielen zwei verschiedene Grundprinzipien unterschieden werden: zum einen geht es bei Insekten-, Viren- und Pilzresistenz um die Kontrolle durch die Natur hervorgerufener Schäden, zum andern bei Herbizidresistenz um den Schutz der Kulturpflanzen gegen ein durch den Menschen eingesetztes Pflanzenschutzmittel. Zum Teil überschneiden sich die Vor- und Nachteile dieser beiden Grundprinzipien, hin und wieder können aber die beiden Mechanismen nicht direkt miteinander verglichen werden. Im Rahmen dieser Studie sollen deshalb diese beiden Resistenzarten getrennt voneinander behandelt werden.

4.1 Insekten-, Viren- und Pilzresistenz

Resistenz kann als eine Eigenschaft angesehen werden, die eine Pflanze veranlasst, weniger Krankheiten, weniger Insektenschaden oder allgemein weniger Verluste als andere Pflanzen zu haben (Schafer, 1974). Resistenz ist demzufolge ein relativer Begriff und wird immer in Bezug auf bekannte anfällige Pflanzen gemessen. Resistente Pflanzen bieten gegenüber anderen Kontrollmassnahmen wie Anbautechnik, chemische Pflanzenschutzmittel oder biologische Kontrolle folgende *Vorteile* (abgeändert nach Hoffmann et al. 1993):

- sie sind sehr spezifisch und zeigen selten negative Auswirkungen auf nützliche Organismen
- sie werden gerne von den Bauern eingesetzt, da keine Änderungen von gängigen Anbaupraktiken nötig werden
- sie sind meist verträglich mit anderen Bekämpfungsmassnahmen
- sie sind rentabler, da der Mehrpreis für solches Saatgut selten über dem finanziellen Mehraufwand für andere Kontrollmassnahmen liegt
- falls eine Kulturart einen tiefen Marktwert besitzt und entsprechende Pestizide teuer sind, ist es die einzige Lösung, wirtschaftlich zu produzieren
- sie sind umweltfreundlich, da keine oder zumindest weniger Pestizide eingesetzt werden müssen
- Entwicklung einer resistenten Pflanze ist oft billiger als die Entwicklung eines Pestizids

Nachteile:

- die Züchtung ist aufwendig
- relativ teuer
- Resistenzen können durchbrochen werden

Natürlich ist sich jedermann bewusst, dass sich das Zuchtziel Resistenz gegen Schädlinge und Pflanzenpathogene von anderen Zuchtzielen in einem Punkt unterscheidet: es handelt sich um Pflanzeigenschaften, welche „verloren,“ gehen können. So ist Züchtung auf Resistenz ein ständiger Wettlauf gegen die Natur, welche bestrebt ist, Züchterfolge auf diesem Gebiet zu schmälern. Nachhaltige Systeme bevorzugen Sorten mit dauerhaften Resistenzen. Vielfach besteht die Gefahr, dass eine eingebaute Resistenz schneller durchbrochen wird als erwartet - dies kann oft auf ein ungenügendes Resistenzmanagement zurückgeführt werden.

Insektenresistenz

Entomologen verwenden oft die Begriffe Nichtpräferenz, Antibiosis und Toleranz (Hoffmann et al., 1993) bei Insekten: Verhindern, dass Pflanze gefunden wird (Hereinzüchten von Allomonen oder Herauszüchten von Kairomonen), physikalische Barrieren (Saftigkeit, Zähigkeit, Epidermishaare oder Wachse), Insektentoxine (=Antibiosis). Ein Vorteil physikalischer Barrieren ist, dass ein Resistenzdurchbruch eher selten ist, da die Resistenz auf morphologischen

Merkmale beruht, welche nicht leicht verändert werden können. Die genetische Varianz für solche Merkmale ist relativ gut verfügbar und leicht zu finden. Oft sind es jedoch an diese Eigenschaften gekoppelte Gene, welche die Vorteile dieser Resistenzzuchtverfahren etwas schmälern.

Im Falle des Einsatzes von gentechnisch veränderten Pflanzen (Insektenresistenz: Bt) ist abzuklären wie gross die Wahrscheinlichkeit einer Resistenzbildung von Insekten gegen Bt ist. Theoretisch ist die Resistenzbildung nicht zu unterschätzen, da Insekten ständig dem Selektionsdruck ausgesetzt sind. Mit einer entsprechenden Anbaustrategie (Mischung von resistenten und anfälligen Linien/Sorten) und durch Expressierung der toxinkodierenden Gene nur bei stärkerem Befall kann sie zumindest hinausgezögert werden. Das nachhaltige Resistenzmanagement verlangt, dass die Resistenzzüchtung als prioritäres, aber nicht alleiniges Mittel zur Insektenkontrolle angewandt wird; die Resistenzzüchtung muss Bestandteil sein von integrierten Pflanzenschutzmassnahmen.

Virenresistenz

Sowohl chemische Bekämpfung von Pflanzenviren wie auch chemische Bekämpfung von Vektoren sind bislang noch wenig erfolgversprechend. Man muss annehmen, dass Pflanzenviren unter hohem Selektionsdruck möglicherweise in anderen Wirten besonders virulente Stämme erzeugen; RNA-Viren weisen eine hohe Mutationsrate auf. (Schütte, 1995)

Das Risiko der Entstehung neuer Viren bzw. Ausbreitung von Viren auf bisher nicht betroffene Wirte ist grundsätzlich bei der gentechnischen Nutzung viraler Hüllproteine nicht ausgeschlossen werden und muss entsprechend untersucht werden. (Schütte, 1995)

Pilzresistenz

Für den Züchter sind es vor allem Resistenzgene, welche es zu identifizieren und optimal zu kombinieren gilt. Die Reaktionskaskaden, die zur Resistenzbildung führen, sind in der Regel komplex. Der Züchter muss über die Informationen verfügen, welche es ihm ermöglichen, die züchterische Strategie zu optimieren und Verfahren zu wählen, welche die Abwehr der Pflanze gegen pathogene Pilze ermöglichen.

4.2 Herbizidresistenz

Zuerst stellt sich die Frage, was sind die Merkmale eines Unkrautes beinhalten. Schütte, (1995) nennt 14 Merkmale, die anzeigen, ob eine Pflanze zum Unkraut wird; die Abhängigkeit von der Komplexität der betroffenen Lebensgemeinschaft ist erwiesenermassen gross. Als Unkraut bezeichnen wir in dieser Studie eine Pflanze, welche auf einer Kulturfläche von ihrem Bewirtschafter als unerwünscht angesehen wird, sei dies nun eine krautige Pflanze im eigentlichen Sinne oder ein Ungras. Auf die Gründe, weshalb eine solche Pflanze als unerwünscht angesehen wird, ist nicht Gegenstand dieser Studie (vgl. dazu Börner, 1995).

Die Anforderungen an ein Herbizid sind: grosse Wirkung, geringe Toxizität, geringe Mobilität im Boden, kurze Persistenz in der Umwelt und gleichzeitige Wirksamkeit gegen ein breites Spektrum von Unkrautarten. (Singh et al., 1993).

Die möglichen Vorteile von herbizidresistenten Nutzpflanzen und deren potentieller Nutzen (abgeändert nach versch. Autoren zitiert in Powles et al., 1997):

- Kontrolle von Problemunkräutern
- Möglichkeit zur Entwicklung und zum Einsatz von „umweltverträglichen,, Herbiziden
- Gezielter Herbizideinsatz (nach dem Prinzip der Schadschwelle im Nachauflauf)
- Zusätzliche Möglichkeit für den Landwirten, Unkräuter zu kontrollieren
- Weniger zeitabhängige Unkrautkontrolle (flexiblere Terminplanung)
- Möglichkeit zur Verminderung der Erosionsgefahr (z.B. Maiswiese)
- Möglichkeit zur Kontrolle von herbizidresistenten Unkräutern
- Einsatz in Kulturpflanzen, für die sich die Entwicklung eines spezifischen Herbizides nicht lohnt, wie z.B. Industrie- und Medizinalpflanzen
- Möglichkeit zur Senkung der landwirtschaftlichen Produktionskosten

weitere Vorteile nach von Broock (1993):

- Die Anwendung eines Wirkstoffes statt mehrerer selektive Mittel (Tankmischungen)
- Die Anwendung als Blattherbiziden statt Bodenherbiziden
- Eine flexiblere Nachauflaufbehandlung wird möglich, das Applikationsfenster wird erweitert
- Tendenziell werden weniger Behandlungen/Kultur/Vegetationsperiode notwendig (die Anwendung erfolgt nach Bedarf, nicht vorbeugend)
- Ersatz ökologisch sehr bedenklicher Wirkstoffe durch verträglichere Mittel
- Anwendungen teilweise auch in Wasserschutzgebieten möglich (Bsp. Basta®)

Risiken:

- Anwendungslücken entstehen durch:
 1. Verstärkter Selektionsdruck auf die Unkrautflora
 2. Durchwuchs herbizidresistenter Kulturpflanzen
- Diese Anwendungslücken erfordern Folgespritzungen mit konventionellen (selektiven) Herbiziden (Ausbringen erheblicher Mengen, Kostenanstieg)
- Eine mögliche Steigerung der Anwendungshäufigkeit/Kultur/Jahr durch den schnellen Abbau der Wirkstoffe kann notwendig sein

Alternativen zum Anbau herbizidresistenter Pflanzen:

- Vorbeugende Massnahmen: Fruchtfolge, Vermeiden von Zufuhr unerwünschter Samen und vegetativen Pflanzen-teilen, Bodenbearbeitung, Saat- und Ernteverfahren, Sortenwahl
- Direkte Massnahmen: Mechanische, thermische und manuelle Bekämpfung, biologische Unkrautkontrolle (ev. mittels Mycoherbiziden), selektive Herbizide

Alternativen für die Pflanzenzüchtung:

- Pflanzen, welche höhere Unkrautdichte tolerieren und eine generelle Toleranz gegenüber der Begleitflora aufweisen.

Grundlagen von Resistenzmechanismen

Es gibt vier mögliche Wege, Pflanzen herbizidresistent zu machen (Singh et al., 1993):

- Reduktion der Aufnahme und/oder der Translokation des Herbizides zu seinem Wirkungsort
- Steigerung der Detoxifizierung des Herbizides
- Überproduktion des Zielmoleküls des Herbizides
- Veränderung des Angriffsortes des Herbizides

Nachteile der klassischen Herbizid-Resistenzzüchtung betreffend Unkrauttoleranz (Abraham et al., 1993):

- Die Züchtung dauert mehrere Jahre und beansprucht grosse Flächen, wegen tiefem Selektionsdruck unter Feldbedingungen. Die Übertragung von Resistenzen von Unkräutern auf Kulturpflanzen ist nur bei verwandten Arten möglich.
- Die in vitro - Selektion mittels Zell- und Gewebekulturen braucht weniger Zeit und weniger Platz. Nachteil: gewisse Herbizidresistenzen werden nur in der Ganzpflanze und nicht auf der Zellebene exprimiert (Abraham et al., 1993)
- Die Änderung des Angriffsortes verursacht vermindertes Wachstum der Pflanze, während die Einführung eines herbizidabbauenden Proteins diese Probleme nicht zeigt (Abraham et al., 1993).

4.3 Diskussion der Fallbeispiele

Maiszünslerresistenz

Der Maiszünsler (*Ostrinia nubilalis*), welcher in Mais einen Schaden von 10-30% verursachen kann, ist im frühen Larvenstadium auf B.t.-Toxin empfindlich. Da sich die Larven aber nach der zweiten Häutung in den Stengel oder Kolben einboren, können sie mittels Spritzungen nur schlecht bekämpft werden. Dieses Problem lässt sich umgehen, wenn sich das B.t.-Toxin (transgener Bt-Mais) im Innern der Pflanze befindet. Wegen der Lebensweise der Maiszünslerlarven ist der Einsatz von B.t.-Spritzmitteln kaum möglich.

Der Einsatz von Trichogramma-Schlupfwespen (Fried et al., 1993) sowie indirekte Verfahren durch sauberes Unterpflügen des Strohs, wodurch ein Teil der Raupen vernichtet werden (Häni et al. 1992), gelten als nachhaltige Massnahmen. Solange diese Massnahmen einen wirtschaftlich-ökologischen Anbau ermöglichen, besteht keine dringende Notwendigkeit des Einsatzes von transgenem Bt-Mais.

Kartoffelkäferresistenz

Obschon der wichtigste Schädling der Kartoffel weltweit und in der Schweiz der Kartoffelkäfer ist, hat er bei uns nur noch geringe Bedeutung. Die geregelte Fruchtfolge verhindert ein

Überleben des Kartoffelkäfers und damit wichtigste Massnahme im Rahmen der nachhaltigen Produktion. Es wurde festgestellt, dass der Kartoffelkäfer bisher gegen alle grösseren Insektiziden-Gruppen z.T. innert kurzer Zeit Resistenzen entwickelte. Erste Erfahrungen zeigen, dass dies beim Einsatz der Insektenresistenz ähnlich einzuschätzen ist.

Rizomaniaresistenz bei der Zuckerrübe

Das Rizomania-Virus trat zum ersten Mal bedeutend in den 50er Jahren in Norditalien auf, wurde aber erst in den 70er Jahren als Viruskrankheit beschrieben. Ertragsverluste von 30 - 100% v.a. in neu befallenen Regionen machen Rizomania zu einemen der wichtigsten phytopathologischen Probleme im Zuckerrübenanbau.

Als Vektor dient dem Virus der bodenbürtige Pilz *Polymyxa betae*, für welchen keine chemischen Bekämpfungsmethoden bekannt sind. Durch geeignete Kulturmassnahmen (ungünstige Verhältnisse für den Pilz) lässt sich eine Infektion durch das Virus abschwächen. Bis anhin erreichen rizomania-resistente Sorten bei Nichtbefall einen um 15% tieferen Ertrag (Schütte, 1995)

Beta vulgaris ist frei kreuzbar mit der Wildrübe *Beta vulgaris* subsp. *maritima*, aber auch mit den kulturverwandten Mangold, Rote Beete (Randen) und Futterrübe. So ist weniger die Erfassung der Wahrscheinlichkeit als vielmehr die Abschätzung der Konsequenz eines Gentransfers in die Umwelt von besonderer Bedeutung, da von einer natürlichen Verbreitung der neuen Gene innerhalb der Art *B. vulgaris* ausgegangen werden kann. Es darf jedoch nicht vergessen werden, dass die Zuckerrübe im Praxisanbau nur in Ausnahmefällen (Schosserrüben) zur Blütenbildung kommt und eine freie Auskreuzung unter diesem Aspekt beurteilt werden muss (Bartsch, 1995).

Es existieren Standorte, die mit Rizomania verseucht sind, aber klimatisch für den Zuckerrübenanbau sehr geeignet wären. Mittels resistenter Sorten können an diesen Standorten Zuckerrüben angebaut und damit ungeeignete Standorte entlastet werden.

Einen anderen Selektionsvorteil als die Resistenz gegen Rizomania, ist für die Zuckerrübe kaum zu erwarten. Die Resistenz gegen Rizomania, auch wenn sie zum Beispiel auf die als Unkraut vorkommende Wildrübe *Beta maritima* übertragen werden könnte, birgt kaum eine Gefahr der Zunahme dieses Unkrautproblems in sich, da ausserhalb der Agrarfläche beide Arten konkurrenzschwach sind. Wildrüben mit natürlicher Resistenz sind bislang nicht zu einem Problem geworden. Die anderen mit der Zuckerrübe kreuzbaren und gegen Rizomania anfälligen Pflanzenarten haben bis heute keine Bedeutung als Unkraut (Schütte, 1995).

Kartoffel mit allgemeiner Virusresistenz

Betreffend die PVY und PVX - Viren besteht das Problem nicht im Fehlen von Resistenzquellen, vielmehr in der Schwierigkeit der Kombination von Virusresistenz mit den wichtigen Qualitätsparametern. Die Akzeptanz von Neuzüchtungen ist bei Kartoffeln recht schwierig, weshalb eine gezielte Verbesserung der Resistenzeigenschaften ohne Veränderung der Qualitätseigenschaften gefragt ist. Diese Anforderungen sind mit der gezielten Genübertragung erfüllt, bei klassischen Kreuzungsverfahren besteht jedoch die Gefahr, dass mit der Neukombination gewisse Qualitätseigenschaften negativ verändert werden oder verloren gehen. Bei der Produktion von Saatkartoffeln wäre die Virusresistenz von Vorteil, da die Kontrollen auf

Virusfreiheit und die Bekämpfung der Vektoren reduziert werden könnten oder sogar ganz entfallen würden.

Kartoffel mit Kraut- und Knollenfäule-Resistenz

Als wichtigste Krankheit der Kartoffel in der Schweiz gilt der Oomycet *Phytophthora infestans*, der Erreger der Kraut- und Knollenfäule. Die wichtigste Bekämpfungsmethode ist der Einsatz von Fungiziden; es besteht erwiesenermassen Handlungsbedarf für die für die Erzeugung von resistenten Kartoffelsorten. Aus Mexiko und den Anden stammen zahlreiche Wildarten, welche eine hohe unspezifische, polygene Resistenz aufweisen. Es wurden bisher über zehn verschiedene R-Gene identifiziert, wobei wahrscheinlich noch weitere existieren. Da aber in Mexiko Rassen des Pathogens mit allen elf Virulenzfaktoren und auch in Europa mit neun Virulenzen gefunden werden, scheint eine Pyramidisierung keine Aussicht auf eine dauerhafte Resistenz zu bringen, selbst wenn alle bisher bekannten Gene in eine Sorte eingebaut würden (Turkensteen 1993). Da die Gene dieser Feldresistenz (r-Gene) noch nicht identifiziert und charakterisiert sind, ist der Erzeugung transgener, resistenter Sorten noch nicht gelungen; es werden auch andere Abwehrmechanismen der Pflanze gegen *Phytophthora* untersucht und gentechnische wie auch konventionelle Ansätze verfolgt. Der Einsatz von resistenten Sorten bleibt ein wichtiges Ziel für die nachhaltige Produktion von Kartoffeln.

Weizen mit Pilzresistenz

Krankheiten wie Roste, Mehltau und Septoria können durch Kulturmassnahmen nur ungenügend bekämpft werden (Fried, 1993). Im Weizenanbau werden die Krankheiten Halmbruch (*Pseudocercospora herpotrichoides*), Braunrost (*Puccinia recondita*), Gelbrost (*Puccinia striiformis*), Spelzenbräune (*Septoria nodorum*), und Mehltau (*Erysiphe graminis*) mit Fungiziden bekämpft, da übliche Kulturmassnahmen nur ungenügende Wirkung zeigen. Die wichtigste Bekämpfungsmöglichkeit besteht jedoch im Einsatz resistenter Sorten. Als weitere Bekämpfungsmöglichkeit von *E. graminis* steht in Zukunft auch der Aktivator CGA 245704 zur Verfügung (Aktivator der systemischen Resistenz).

Ein Hauptschwierigkeit der Resistenzzüchtung liegt in der Identifizierung von Genen (phänotypische Merkmale, molekulare Marker), welche die Auswahl der Kreuzungspartner und die effiziente Selektion auf die resistenten Linien ermöglicht. Die molekulare Analyse (molekulare Marker) bietet eine wesentliche Hilfe, insbesondere wenn mehrere Resistenzgene pyramidiert werden sollen, welche phänotypisch nicht identifiziert werden können. Der Erzeugung von gentechnisch veränderten, resistenten Pflanzen wird forciert; erste Feldversuche mit transgenen Sorte wurden in den USA durchgeführt. Der Anbauwert dieser transgenen Sorte muss fallweise anhand von Nachhaltigkeitskriterien eingeschätzt werden.

Raps, Mais und Zuckerrübe mit Herbizidresistenz

Die bislang produzierten und in mehreren Ländern (nicht in der Schweiz) angebauten herbizidresistenten (HR) Sorten verfügen mehrheitlich über die Resistenz gegen nicht- selektive Herbizide, Glyphosat (Handelsname: „Roundup,“) und Glufosinat (Handelsname: „Basta,“). Bei der Beurteilung des Nachhaltigkeitswertes von HR-Sorten darf nicht vergessen werden, dass auch einige Kulturpflanzen herbizidresistent gemacht wurden durch konventionelle Zuchtverfahren. Die Sommerrapsorte OAC Triton wurde durch das Einkreuzen einer cytoplasmatischen

Triazinresistenz von *Brassica campestris* zur HR-Sorte und nicht mittels Gentechnologie. Der Ertrag dieser Sorte erreichte jedoch nur 69 - 80% von herkömmlichen Rapssorten, da das Photosystem II nicht mehr so effizient arbeiten konnte (Singh et al., 1993). Die meisten HR-Sorten sind transgene Sorten, welche insgesamt Vorteile gegenüber der konventionellen Erzeugung zeigen. Im weiteren ist es noch sehr schwierig, überhaupt kreuzbare HR-Spendersorten für die verschiedenen Kulturpflanzen zu finden.

Der Nutzen von HR-Sorten für die nachhaltige Landwirtschaft wird kontrovers diskutiert. Die Kriterien zur Einschätzung des Nutzen/Schaden-Profiles stützen sich auf die jeweiligen Zielvorgaben der Auftraggeber der verschiedensten Studien. Korell et al. (1997) beurteilten die HR-Sorten in bezug auf Nachhaltigkeit anhand der Kriterien Bodenbearbeitung, Anbau und Bodennutzung sowie Pflanzenschutz. Bezüglich dieser Kriterien kommen sie zu Schluss, dass sich umweltschonende Anbauverfahren besser etablieren lassen. Ein Einsatz auf Problemschlägen zur Bekämpfung von Problemunkräutern wird positiv beurteilt. Nicht so ein permanenter Einsatz einzelner nicht-selektiver Herbizide, da sonst durch frühzeitige Resistenzbildung verschiedener Begleitpflanzen die positiven Optionen der HR-Technik verloren gehen könnten.

5 Schlussfolgerungen

Die Züchtung von Kulturpflanzensorten ist, unabhängig von ihrem späteren Einsatz in Anbausystemen (konventionell, IP, biologisch oder gentechnisch) und Produktverwendung (Mensch, Tier, Industrie), auf die Ziele der nachhaltigen Landwirtschaft auszurichten. Diese Ziele basieren auf den Eckpfeilern Ökologie, Ökonomie und Gesellschaft. Die Kriterien für die Erreichung der ökologischen Ziele in der schweizerischen Landwirtschaft (u.a. Ökologischer Leistungsnachweis, technische Regeln) konzentrieren sich vor allem auf Anbau, Bodennutzung, Bodenschutz, Pflanzenschutz und Anteil an ökologischen Ausgleichsflächen. Für die Züchtung von transgenen und nichttransgenen Pflanzensorten gilt das Ziel einer kostengünstigen Produktion von qualitativ hochwertigen, gesunden Nahrungsmittel und technologisch einwandfreien Rohstoffen. Gefährdungen jeglicher Art sollen ausgeschlossen werden. Die Prüfungen der geforderten Qualität in der Produktion und der Verwertung haben den heutigen Erkenntnissen und Möglichkeiten zu entsprechen. Dadurch soll nicht nur das Gefährdungspotential von Sorten und deren Produkten, sondern auch deren Eignung für den nachhaltigen ökologischen Anbau geprüft werden. Diese Grundsatzforderung müsste alle Sorten umfassen, unabhängig davon wie sie gezüchtet worden sind (klassisch oder gentechnisch). Es ist jedoch festzuhalten, dass diese Massnahmen der Verbesserung von Sorten dienen sollen und nicht durch sachlich ungerechtfertigte, übertriebene Forderungen das Potential der Züchtung grundsätzlich geschwächt wird. Die Einschätzung der Eignung von Pflanzensorten (transgen oder nicht transgen) für die nachhaltige Landwirtschaft soll flexibel und fallbezogen vorgenommen werden, damit veränderten Rahmenbedingungen (z.B. Preisgestaltung, Auftreten neuer Krankheiten und Schädlinge) Rechnung getragen werden kann. In einigen Studien wurde bereits eine Einschätzung der Möglichkeiten für die nachhaltige Nutzung transgener Sorten vorgenommen (z.B. Korell et al., 1997), welche als Entscheidungsgrundlage in ähnlich gelagerten Fällen dienen kann. Da sich die Vorgaben relativ schnell ändern können, empfiehlt es sich, ein

Gremium einzusetzen, das die konkrete Einschätzung für die eingereichten Gesuche laufend prüft und die Entscheidungsgrundlagen liefert. Dabei ist eine möglichst frühzeitige Problemerkennung wichtig, d.h. eine Begleitung der Züchter in Fragen der Zuchtzielsetzung und der Prüfung von Ausgangsmaterial für die Züchtung, beispielsweise in Hinblick auf die Frage, ob transgene Linien im Pedigree der Elternlinien enthalten sind. Im weiteren sollten die Freilandversuche mit transgenen Sorten unter dem Aspekt der Nachhaltigkeit begleitet und geprüft werden. Die wichtigste Stufe vor der Zulassung zum Praxisanbau ist die Sortenprüfung. Die Verordnungen und Reglemente zur Sortenprüfung sollten im Hinblick auf die konkrete Einschätzung der Nachhaltigkeit von Sorten (transgen oder nicht transgen) aktualisiert werden. Insbesondere bei einer wesentlichen Erweiterung des Sortenspektrums, beispielsweise durch die Akzeptanz der europäischen Sortenliste, sind die Kriterien der Nachhaltigkeit auch in den Sortenlisten mit „empfehlendem Charakter,“ aufzuführen und entsprechend zu gewichten.

Die Kriterien für die Erzeugung von Pflanzensorten für die nachhaltige Landwirtschaft sind grundsätzlich definiert und bedürfen nun der fallweisen Interpretation. Es gilt das Potential der modernen Biotechnologie sinnvoll zu nutzen und eine kompetente wissenschaftliche Begleitung zu gewährleisten. In der Prüfung erster transgener Sorten ist diesem Umstand besonders Rechnung zu tragen. Die alleinige Fokussierung der Nachhaltigkeitsprüfung auf transgene Sorten wäre nicht angebracht, da alle für den Markt vorgesehenen Sorten, auch konventionell gezüchtete Sorten, die für eine nachhaltige Landwirtschaft gesetzten Ziele zu erfüllen haben. Es wird sich zeigen, mit welchen agrarwirtschaftlichen und politischen Massnahmen diese Ziele am besten erreicht werden. Fest steht, dass diese Massnahmen nur dann zum Ziel führen können, wenn entsprechende Sorten zur rechten Zeit überhaupt zur Verfügung stehen. Angesichts der wichtigen Aufgaben und globaler Probleme in der nachhaltigen Erzeugung von Nahrungsmitteln sollte der modernen Pflanzenzüchtung der entsprechende Stellenwert zugestanden werden.

6 Literatur

- Abraham, C. T.; Sarin, N. B., and Jain, M. Application of biotechnology for weed management. Integrated weed management for sustainable agriculture. Proceedings of an Indian Society of Weed Science International Symposium.; 1993 Nov 18-1993 Nov 20; Hisar, India. Hisar, Haryana; India : Indian Society of Weed Science; 1993: 209-219.
- Alexandratos, N. World agriculture : towards 2010 : an FAO study. [Rome, Italy]: Food and Agriculture Organization of the United Nations; 1995. xxvi, 488 .
- Altpeter, F., V. Vasil, V. Srivastava und I.K. Vasil, 1996: Integration and expression of the high-molecular-weight-glutenin subunit 1Ax1 gene into wheat. *Nature Biotechn.* 14, 1155-1159.
- Amberger, A., 1989: Research on dicyanamide as a nitrifikation inhibitor and future outlook. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 20, 1933-1955.
- AP2002, Zweite Etappe der Agrarreform Agrarpolitik 2002. Eidg. Volkswirtschaftsdepartement, Bundesamt für Landwirtschaft, Vernehmlassungsunterlage; Bern, 1995
- Appl, M., 1997: Modern production technologies - a review. *Nitrogen - The Journal of the World Nitrogen and Methanol Industries*, 4-56.
- Aufhammer, W., G. Fischbeck, 1970: Vergleichende Untersuchungen zur Ertragsbildung bei einer Sommergersten-Landsorte und der Zuchtsorte UNION. *Z. Acker- und Pflanzenbau* 131, 57-69.
- Aufhammer, W., 1998: Getreide- und andere Körnerfruchtarten. Verlag Eugen Ulmer, Stuttgart.
- Austin, R.B., M.A. Ford, C.L. Morgan und D. Yeoman, 1993: Old and modern wheat cultivars compared on the Broadbalk wheat experiment. *Eur. J. Agron.* 2, 141-147.
- Austin, R. B., J. Bingham, R. D. Blackwell, L. T. Evans, M. A. Ford, C. L. Morgan und M. Taylor, 1980: Genetic improvement in winter wheat yields since 1900 and associated physiological changes. *J. Agric. Sci., Camb.* 94, 675-689.
- Baas, R.A., A. van der Werf und H. Lambers, 1989: Root respiration and growth in *Plantago major* as affected by vesicular-arbuscular mycorrhizal infection. *Plant Physiol.* 91, 227-232.
- Bänziger, M., B. Feil, J. E. Schmid und P. Stamp, 1992: Genotypic variation in grain N content of wheat as affected by mineral N supply in the soil. *Eur. J. Agron.* 1, 155-162.
- Bänziger, M., B. Feil, J. E. Schmid und P. Stamp, 1994: Utilization of late-applied nitrogen by spring wheat genotypes. *Eur. J. Agron.* 3, 63-69.
- Bartsch, D. Ökologische Begleitforschung zu rizomania-resistenten Zuckerrüben. In: Albrecht, S. and Beusmann, V., Hrsg. *Ökologie transgener Nutzpflanzen*. Frankfurt / New York: Campus Verlag; 1995; pp. 81-98. 235(Gentechnologie - Chancen und Risiken, v. Band 31).
- Bassiri, A. und A. Nahapetian, 1979: Influences of irrigation regimes on phytate and mineral contents of wheat grain and estimates of genetic parameters. *J. Agric. Food Chem.* 27, 984-989.

- Barber S.A., 1984: Soil nutrient bioavailability. A mechanistic approach. John Wiley & Sons, New York.
- Batten, G.D., 1986: Phosphorus fractions in the grain of diploid, tetraploid, and hexaploid wheat grown with contrasting phosphorus supplies. *Cereal Chem.* 63, 384-387.
- Becker, H. C. Pflanzenzüchtung. Stuttgart: E. Ulmer; 1993, 327
- Bekele, T., Cino, J., Ehlert, P.A.I., van der Maas, A.A. und van Diest, A., 1983. An evaluation of plant-borne factors promoting the solubilization of alkaline rock phosphates. *Plant and Soil*, 75: 361-378.
- Bell, J.M. und G. Rakow, 1996: Trypsin inhibitors and phytic acid in oil-extracted meals from seeds of several *Brassica* species and of *Sinapis alba*. *Can. J. Anim. Sci.* 76, 423-425.
- Bertholdsson, N.-O. und V. Stoy, 1995: Yields of dry matter and nitrogen in highly diverging genotypes of winter wheat in relation to N-uptake and N-utilization. *J. Agron. Crop Sci.* 175, 285-295.
- Bhatia und Rabson, 1987: Relationship between yield and nutritional quality. - In: Olson, R.A. und K.J. Frey (Hrsg.) *Nutritional Quality of Cereal Grains: Genetic and Agronomic Improvement - Agronomy Monograph no. 28, ASA-CSSSA-SSSA, Madison, WI, pp. 11-43.*
- Blechl, A.E. und O.D. Anderson, 1996: Expression of a novel high-molecular-weight-glutenin subunit gene in transgenic wheat. *Nature Biotechn.* 14, 875-879.
- Boddey, R.M., J. Döbereiner und N. Ahmad, 1995a: Nitrogen fixation associated with grasses and cereals: recent progress and perspectives for the future. *Fert. Res.* 42, 1-3.
- Boddey, R.M., O.C. de Oliveira, S. Urquiaga, V.M. Reis, F.L. de Olivares, V.L.D.
- Baldani und J. Döbereiner, 1995b: Biological nitrogen fixation associated with sugar cane and rice: Contributions and prospects for improvement. *Plant and Soil* 174, 195-209.
- Bolland, M.D.A., 1997: Comparative phosphorus requirement of four lupin species. *J. Plant Nutr.* 20, 1239-1253.
- Börner, H. Unkrautbekämpfung. Jena, Stuttgart, New York: Gustav Fischer Verlag; 1995.
- Bothe, H., M.G. Yates und F.C. Cannon, 1983: Physiology, biochemistry and genetic dinitrogen fixation. - In: Läuchli, A. und R.L. Bielski (Hrsg.) *Encyclopedia of Plant Physiology, New Series, Vol. 15A, Springer Verlag, Berlin, New York, pp. 241-285.*
- Braun, M., P. Hurni und E. Spiess, 1994: Phosphor- und Stickstoffüberschüsse in der Landwirtschaft und Para-Landwirtschaft. Eidgenössische Forschungsanstalt für Agrikulturchemie und Umwelthygiene, CH-3097 Liebefeld-Bern (Hrsg.).
- Brundett, M.C. und L.K. Abbot, 1991: Roots of jarrah forest plants. I. Mycorrhizal associations of shrubs and herbaceous plants. *Aust. J. Bot.* 39, 445-457.
- Bryla, D.R. und R.T. Koide, 1998: Mycorrhizal response of two tomato genotypes relates to their ability to acquire and utilize phosphorus. *Ann. Bot.* 82, 849-857.

- Bulman, P., D.E. Mather und D.L. Smith, 1993: Genetic improvement of spring barley cultivars in eastern Canada from 1910 to 1988. *Euphytica* 71, 35-48.
- Bumb, B.L., 1995: World nitrogen supply and demand: an overview. In: *Nitrogen Fertilization in the Environment* (Ed. P.E. Bacon). Marcel Dekker, New York, Basel, Hong Kong, pp. 1-40.
- Callaway, M. B. and Francis, C. A. *Crop improvement for sustainable agriculture*. Lincoln: University of Nebraska Press; 1993. xiv, 261 ill.
- Calderini, D.F., S. Torres-Léon und G.A. Slafer, 1995: Consequences of wheat breeding on nitrogen and phosphorus yield, grain nitrogen and phosphorus concentration and associated traits. *Ann. Bot.* 76, 315-322.
- Canevara, M.G., M. Romani, M. Corbellini, M. Perenzin und B. Borghi, 1994: Evolutionary trends in morphological, physiological, agronomical and qualitative traits of *Triticum aestivum* L. cultivars bred in Italy since 1900. *Eur. J. Agron.* 3, 175-185.
- Caransa, A., M. Simell, A. Lehmussaari, M. Vaara und T. Vaara, 1988: A novel enzyme application for corn wet milling. *Starch/Stärke* 40, 409-411.
- Chevalier, P. und L. E. Schrader, 1977: Genotypic differences in nitrate absorption and partitioning of N among plant parts in maize. *Crop Sci.* 17, 897-901.
- Chung, O.K. und Y. Pomeranz, 1985: Functional and nutritional characteristics of cereal proteins. - In: Finley, J.W. und D.T. Hopkins (Hrsg.) *Digestibility and Amino Acid Availability in Cereals and Oilseeds*. American Association of Cereal Chemists, Inc., St. Paul, MI, pp. 169-231.
- Coffman, W. R. and Bates, D. M. History of crop improvement in sustainable agriculture. In: Callaway, M. B. and Francis, C. A., Hrsg. *Crop improvement for sustainable agriculture*. Lincoln: University of Nebraska Press; 1993; pp. 19-32. xiv, 261.
- Czauderna, R., 1992: Ertragsbildung und Ertragsstruktur von Winterweizen unter besonderer Berücksichtigung des Stickstoffhaushaltes und der Nährstoffaneignung. Diss. Kiel.
- Daigger, L. A., D. H. Sander und G. A. Peterson, 1976: Nitrogen content of winter wheat during growth and maturation. *Agron. J.* 68, 815-818.
- De Bruijn, F.J. und J.A. Downie, 1991: Biochemical and molecular studies of symbiotic nitrogen fixation. *Curr. Op. Biotech.* 2, 184-192.
- De Bruijn, F.J., Y. Jing und F.B. Dazzo, 1995: Potential and pitfalls of trying to extend symbiotic interactions of nitrogen-fixing organisms to presently non-nodulated plants, such as rice. *Plant and Soil* 174, 225-240.
- De Lumen, B.O., 1990: Molecular approaches to improving the nutritional and functional properties of plant seeds as food sources: developments and comments. *J. Agric. Food Chem.* 38, 1779-1788.
- De Lumen, B.O., D.C. Krenz und M.J. Revilleza, 1997: Molecular strategies to improve the protein quality of legumes. *Food Technol. Chicago* 51, 67-70.
- Denbow, D.M. E.A. Grabau, G.H. Lacy, E.T. Kornegay, D.R. Russell und P.F.

- Umbeck, 1998: Soybeans transformed with a fungal phytase gene improve phosphorus availability for broilers. *Poultry Sci.* 77, 878-881.
- De Willigen, P. und M. van Noordwijk, 1987: Roots, plant production and nutrient use efficiency. Ph D thesis, Wageningen, Niederlande
- Diepenbrock, W. und Pasda, G., 1995: Sunflower (*Helianthus annuus* L.). - In: Diepenbrock, W. und H.C. Becker (Hrsg.) Physiological potentials for yield improvement of annual oil and protein crops. Blackwell Wissenschafts-Verlag, Berlin-Wien, pp. 91-148.
- Dinkelaker, B. C. Hengeler und H. Marschner, 1995: Distribution and function of proteoid roots and other root clusters. *Botanica Acta.* 108, 183-200.
- Döbereiner, J., V.L.D. Baldini und J.K. Ladha, 1998: Biological nitrogen fixation by endophytic diazotrophs in non-leguminous crops in the tropics. - In: Malik, K.A. und M.S. Mirza (Hrsg.) Nitrogen fixation with non-legumes. Proceedings of the 7th International Symposium on Nitrogen fixation with Non-legumes. Faisalabad, Pakistan, 16-21 October 1996, pp. 3-7.
- Dubois, J.-B. und A. Fossati, 1981: Influence of nitrogen uptake and nitrogen partitioning efficiency on grain yield and grain protein concentration of twelve winter wheat genotypes (*Triticum aestivum* L.). *Z. Pflanzenzüchtg.* 86, 41-49.
- Düngelhof, M., M. Rodehutschord, H. Spiekers und E. Pfeffer, 1994: Effects of supplemental microbial phytase on availability of phosphorus contained in maize, wheat and triticale to pigs. *Anim. Feed Sci. Techn.* 49, 1-10.
- Eggum, B.O. und R.M. Beames, 1983: The nutritive value of seed proteins. - In: Gottschalk, W. und H.P. Müller (Hrsg.) Seed Proteins. Biochemistry, Genetics, Nutritive Value. Nijhoff/Junk, 499-531.
- Engels, C. und H. Marschner, 1995: Plant uptake and utilization of nitrogen. - In: Bacon, P. E. (Hrsg.) Nitrogen Fertilization in the Environment. Marcel Dekker, 41-81.
- Engels, T., 1993: Nitratauswaschung aus Getreide- und Zuckerrübenflächen bei unterschiedlichem N-Angebot. Diss. Hannover.
- Ertl, D.S., K.A. Young und V. Raboy, 1998: Plant genetic approaches to phosphorus management in agricultural production. *J. Environm. Quality* 27, 299-304.
- FAO, 1992: FAO fertilizer yearbook. Vol. 41.
- Farinu, G.O. und G. Ingraio, 1991: Gross composition, amino acid, phytic acid and trace element contents of thirteen cowpea cultivars and their nutritional significance. *J. Sci. Food Agric.* 55, 401-410.
- Feil, B., 1987: Untersuchungen zur Physiologie und Morphologie alter und neuer Weizensorten (*Triticum aestivum* L.) unter besonderer Berücksichtigung des Stickstoffhaushalts. Diss. Kiel.
- Feil, B., 1992: Breeding progress in small grain cereals - a comparison of old and modern cultivars. *Plant Breeding* 108, 1-11.
- Feil, B., 1996: Extensivierung der Stickstoffdüngung im Getreidebau. *Agrarforsch.* 3, 271-274.

- Feil, B., 1997: The inverse yield-protein relationship in cereals: possibilities and limitations for genetically improving the grain protein yield. *Trends in Agron.* 1, 103-119.
- Feil, B., 1998: Physiologische und pflanzenbauliche Aspekte der inversen Beziehung zwischen Ertrag und Proteinkonzentration bei Getreidesorten: Eine Übersicht. *Pflanzenbauwiss.* 2, 37-46.
- Feil, B. und D. Fossati, 1995: Mineral composition of triticale grains as related to grain yield and grain protein. *Crop Sci.* 35, 1426-1431.
- Feil, B. und D. Fossati, 1997: Phytic acid in triticale grains as affected by cultivar and environment. *Crop Sci.* 37, 916-921.
- Feil, B. und M. Bänziger, 1999: Beziehungen zwischen dem Kornertrag und den Konzentrationen von Protein, Phosphor und Kalium in den Körnern von Sommerweizensorten. *Pflanzenbauwiss.* 3, 1-8.
- Feil B., R. Thiraporn und H.R. Lafitte, 1993: Accumulation of nitrogen and phosphorus in the grain of tropical maize cultivars. *Maydica* 38, 291-300
- Fischbeck, G., J. Dennert und R. Müller, 1990: N-Dynamik des Bodens, Ertragsbildung und Stickstoffzug von Winterweizen bei unterschiedlicher Höhe und Verteilung der mineralischer N-Düngung. *J. Agron. Crop Sci.* 164, 297-311.
- Fitter, A.H., 1991: Cost and benefits of mycorrhizas: Implications for functioning under natural conditions. *Experientia* 47, 350-355.
- Flaig, H. und H. Mohr, 1996: Der überlastete Stickstoffkreislauf. Strategien einer Korrektur. Akademie für Technikfolgenabschätzung in Baden-Württemberg in Zusammenarbeit mit der deutschen Akademie der Naturforscher Leopoldina. Deutsche Akademie der Naturforscher Leopoldina, Halle (Saale).
- Föhse, D., N. Claasen und A. Jungk, 1988: Phosphorus efficiency of plants. *Plant and Soil* 110, 101-109.
- Fossati, D., A. Fossati und B. Feil, 1993: Relationship between grain yield and grain nitrogen concentration in winter triticale. *Euphytica* 71, 115-123.
- Foster, E. und N. Prentice, 1987: Barley. - In: Olson, R.A. und K.J. Frey (Hrsg.) *Nutritional Quality of Cereal Grains: Genetic and Agronomic Improvement - Agronomy Monograph no. 28*, ASA-CSSSA-SSSA, Madison, WI, pp. 337-396.
- Francis, D. D., J. S. Schepers und M. F. Vigil, 1993: Post-anthesis nitrogen losses from corn. *Agron. J.* 85, 659-663.
- Fried, M. P.; Barben, H.; Keller, S.; Müller, M. D.; Winzeler, H.; Winzeler, M., and Weisskopf, P. Expertise betreffend Möglichkeiten des Einsatzes biotechnologischer Methoden zur Erhöhung der Resistenz gegen Krankheiten und Schädlinge wichtiger Kulturpflanzen der Schweiz. Bern: Schweiz. Nationalfonds, Schwerpunktprogramm Biotechnologie; 1993.
- Gahoonia, T.S. und N.E. Nielsen, 1997: Variation in root hairs of barley cultivars doubled soil phosphorus uptake. *Euphytica.* 98, 177-182.

- Gahoonia, T.S., D. Care-D und N.E. Nielsen, 1997: Root hairs and phosphorus acquisition of wheat and barley cultivars. *Plant and Soil*.191, 181-188.
- Garibay Kuri, S.V., 1996: Maize production in living mulches in a humid temperate climate. Diss. ETH Zurich No. 11655.
- Gill, M.A., Rahmatullah und M. Salim, 1994: Growth responses of twelve wheat cultivars and their phosphorus utilization from rock phosphate. *J. Agron. Crop Sc.* 173, 204-209.
- Giller, K.E. und G. Cadisch, 1995: Future benefits from biological nitrogen fixation: an ecological approach to agriculture. *Plant and Soil* 174, 255-277.
- Giller, K.E., J.F. McDonagh und G. Cadisch. 1994. Can biological nitrogen fixation sustain agriculture in the tropics? In: Syers, J.K. und D.L. Rimmer (Hrsg.) *Soil Science and Sustainable Land Management in the Tropics*, pp. 173-191.
- Glover, D.V. und E.T. Mertz, 1987: Corn. - In: Olson, R.A. und K.J. Frey (Hrsg.) *Nutritional Quality of Cereal Grains: Genetic and Agronomic Improvement - Agronomy Monograph no. 28*, ASA-CSSSA-SSSA, Madison, WI, pp. 183-336.
- Göhlich, F., 1996: Stickstoffeffizienz von Sommerweizen (*Triticum aestivum* L.) während der frühen Vegetationsphase in Abhängigkeit von der Stickstoffverfügbarkeit und der Saatstärke. Diss. ETH Zürich 11801.
- Goodland, R. The concept of environmental sustainability. *Annual Review of Ecology and Systematics*. 1995; 261-24.
- Griffiths, D.W. und T.A. Thomas, 1981: Phytate and total phosphorus content of fieldbeans (*Vicia faba* L.). *J. Sci. Food Agric.* 32, 187-192
- Grylls, J. P., J. Webb und C. J. Dyer, 1997: Seasonal variation in response of winter cereals to nitrogen fertilizer and apparent recovery of fertilizer nitrogen on chalk soils in southern England. *J. Agric. Sci.* 128, 251-262.
- Häni, F.; Popow, G.; Reinhard, H.; Schwarz, A.; Tanner, K., and Vorlet, M. *Pflanzenschutz im Integrierten Ackerbau - Krankheiten, Schädlinge, Nützlinge*. 3., überarbeitete Auflage ed. Zollikofen: Verlag LmZ; 1992. 335 Seiten.
- Hambidge, K.M. und P.A. Walravens, 1976: Zinc deficiency in infants and preadolescent children. - In: Prasad, A.S. und D. Overleas (Hrsg.) *Trace Elements in Human Health and Disease*. Vol. 1, Chapter 2, Academic Press, New York, pp. 21-32.
- Harland, B.F. und J. Harland, 1980: Fermentative reduction of phytate in rye, white, and whole wheat breads. *Cereal Chem.* 57, 226-229.
- Harley J.L. und E.L. Harley, 1987: A check-list of mycorrhiza in the British flora. *New Phytol.* (Suppl.) 105, 1-102.
- Hazell, T., 1985: Minerals in foods: Dietary sources, chemical forms, interactions, bioavailability. *Wld Rev. Nutr. Diet.* 46, 1-123.
- Hoffmann, W., A. Mudra und W. Plarre, 1985: *Lehrbuch der Züchtung landwirtschaftlicher Kulturpflanzen*. 2. Aufl., Verlag Paul Parey, Berlin und Hamburg.

- Hoffmann, M. P.; Thurston, H. D., and Smith, M. E. Breeding for resistance to insects and plant pathogens. In: Callaway, M. B. and Francis, C. A., Hrsg. Crop improvement for sustainable agriculture. Lincoln: University of Nebraska Press; 1993; pp. 79-99. xiv, 261.
- Horst, W.J., M. Abdou und F. Wiesler, 1993: Genotypic differences in phosphorus efficiency of wheat. *Plant and Soil* 155/156, 293-296.
- Husted, S., M. Mattson und J. K. Schjoerring, 1996: Ammonia compensation points in two cultivars of *Hordeum vulgare* L. during vegetative and generative growth. *Plant, Cell, Environm.* 19, 1299-1306.
- Janzen, H.H. und Y. Bruinsma, 1993: Rhizosphere N deposition by wheat under varied water stress. *Soil Biol. Biochem.* 25, 631-632.
- Jenkinson, D.S., R.H. Fox und J.H. Rayner, 1985: Interactions between fertilizer nitrogen and soil nitrogen - the so-called "priming" effect. *J. Soil Sci.* 36, 425-444.
- Johnson, V.A. und P.J. Mattern, 1987: Wheat, rye, and triticale. - In: Olson, R.A. und K.J. Frey (Hrsg.) *Nutritional Quality of Cereal Grains: Genetic and Agronomic Improvement - Agronomy Monograph no. 28*, ASA-CSSSA-SSSA, Madison, WI, pp. 133-182.
- Keller E.R. Ökologischer Landbau: Pflanzenzüchtung und Sortenwesen. In: Keller, E. R.; Hanus, H., und Heyland, K.-U., Hrsg. *Handbuch des Pflanzenbaus: 1. Grundlagen der landwirtschaftlichen Pflanzenproduktion*. Stuttgart (Hohenheim): Ulmer; 1997; pp. 170-186. 860.
- Khalil, S., T.E. Loynachan und M.A. Tabataba, 1994: Mycorrhizal dependency and nutrient uptake by improved and unimproved corn and soybean cultivars. *Agron. J.* 86, 949-958.
- Korell, M., S. Schittenhelm und H.-J. Weigel, 1997: Austellen von Kriterien für die nachhaltig umweltgerechte Nutzung gentechnisch veränderter Kulturpflanzenarten. Umweltforschungsplan des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit - Gentechnik -. Forschungsbericht 112 01 029, UBA-FB 98-008.
- Lantzsch, H.-J., S. Hillenbrand, S.E. Scheuermann und K.H. Menke, 1992: Comparative study of phosphorus utilization from wheat, barley and corn diets by young rats and pigs. *J. Anim. Physiol. Anim. Nutr.* 67, 123-132.
- Lea, P.J., L. Dever, M. Lacuesta, L.A. Onek, R.E. Häusler und R.C. Leegood, 1994: Ammonia assimilation. *Nova Acta Leopoldina NF 70*, Nr. 299, 91-112.
- Lei X.G., P.K. Kuo, E.R. Miller und M.T. Yokoyama, 1993: Supplementing corn-soybean meal diets with microbial phytase linearly improves phytate phosphorus utilization by weanling pigs. *J. Anim. Sci.* 71, 3359-3367.
- Lemmermann, O., U. Einicke und M. Adamczyk 1918: Vergleichende Untersuchungen über die Wirkung verschieden starker Düngungen auf Landsorten und hochgezüchtete Getreidesorten *Frühlings Landwirtsch. Zeit.* 67, 324-335

- Li, M.G., M. Osaki, I.M. Rao, T. Tadano und M.G. Li, 1997: Secretion of phytase from the roots of several plant species under phosphorus-deficient conditions. *Plant and Soil*. 1997 195, 161-169.
- Lipsett, J. und P.R. Dann, 1983: Wheat: Australia's hidden mineral export. *J. Austr. Inst. Agric. Sci.* 49, 81-89.
- Lolas, G.M., N. Palamidis und P. Markakis, 1976: The phytic acid - total phosphorus relationship in barley, oats, soybeans, and wheat. *Cereal Chem.* 53, 867-871.
- Lorri, W. und U. Svanberg, 1994: An overview of the use of fermented foods for child feeding in Tanzania. *Ecol. Food Nutr.* 34, 65-81.
- Lütke Entrup, N., 1986: Fruchtfolge als Grundlage der Pflanzenproduktion. - In: Oehmichen, J. (Hrsg.) *Pflanzenproduktion. Band 2: Produktionstechnik.* Verlag Paul Parey, Berlin und Hamburg, pp. 11-44.
- Ma, J., T.S. Gahoonia und N.E. Nielsen, 1998: Phosphorus uptake from rhizosphere soil by two wheat cultivars. *Pedosphere* 4, 325-330.
- Mannheim, T., J. Braschkat und H. Marschner, 1997: Ammoniakemissionen aus alternden Pflanzen und bei der Zersetzung von Ernterückständen. *Z. Pflanzenernähr. Bodenkd.* 160, 125-132.
- Manske, G.G.B., A.B.Luttger, R.K. Behl und P.L.G. Vlek, 1995: Nutrient efficiency based on VA mycorrhizae (VAM) and total root length of wheat cultivars grown in India. *Angew. Bot.* 69, 108-110.
- Manske, G.G.B., I. Ortiz-Monasterio, M. Van Ginkel, S. Rajaram und P.L.G. Vlek, 1998: Development of phosphorus use efficiency in bread wheat released by the International Maize and Wheat Improvement Center (CIMMYT) over the last five decades. *Mitt. Ges. Pflanzenbauwiss.* 11, 247-248.
- Marfo, E.K., B.K. Simpson, J.S. Idowu und O.L. Oke, 1990: Effect of local food processing on phytate levels in cassava, cocoyam, yam, maize, sorghum, rice, cowpea and soybean. *J. Agric. Food Chem.* 38, 1580-1585.
- Marschner H., 1995: *Mineral nutrition of higher plants. Second Edition.* Academic Press, London.
- Marschner, H: Role of root growth, arbuscular mycorrhiza, and root exudates for the efficiency in nutrient acquisition. *Field Crops Res.* 56, 203-207.
- Maeschli, C. *Das Leitbild Nachhaltigkeit - Eine Einführung.* TA-Projekt Nachhaltige Landwirtschaft, Fachstudie 1/6, BATS, Basel 1998 (Abschlussbericht in Vorbereitung)
- Matthäus, B., 1997: Antinutritive compounds in different oilseeds. *Fett/Lipid* 99, 170-174.
- Mendoza, C., F.E. Viteri, B. Lonnerdal, K.A. Young, V. Raboy und K.H. Brown, 1998: Effect of genetically modified, low-phytic acid maize on absorption of iron from tortillas. *Am. J. Clin. Nutr.* 68, 1123-1127.

- Menge-Hartmann, U., 1997: Stärke. - In: Keller, E.R., H. Hanus und K.-U. Heyland (Hrsg.) Handbuch des Pflanzenbaus. Band 1: Grundlagen der landwirtschaftlichen Pflanzenproduktion, Verlag Eugen Ulmer, Stuttgart, pp. 520-526.
- Mohr, H. und P. Schopfer, 1985: Lehrbuch der Pflanzenphysiologie. 3. Aufl., Springer Verlag, Berlin, Heidelberg.
- Morgan, J. A. und W. J. Parton, 1989: Characteristics of ammonia volatilization from spring wheat. *Crop Sci.* 29, 726-731.
- Neftel, A., A. Blatter, A. Gut, M. Fahrni, M. und T. Staffelbach, 1997: Gasförmiger Austausch von Stickstoffverbindungen. *Agrarforsch.* 4, 324-327.
- Paccaud, F. X., A. Fossati und S. C. Hong, 1985: Breeding for yield and quality in winter wheat: Consequences for nitrogen uptake and partitioning efficiency. *Z. Pflanzenzüchtg.* 94, 89-100.
- Pallauf, J. and G. Rimbach, 1997: Nutritional significance of phytic acid and phytase. *Arch. Anim. Nutr.* 50, 301-319.
- Panse, A., F.-X. Maidl, J. Dennert, R. Müller und G. Fischbeck, 1995: Ertragsbildung, Bestandesaufbau und Stickstoffverwertung von Winterweizen bei kombinierter Gülle- und Mineraldüngung. *Z. Pflanzenernähr. Bodenkd.* 158, 221-229.
- Pen, J., 1996: Phytase produced in transgenic plants for use as a novel feed additive. In: Verwoerd, T.C, J. Pen und M.R.L. Owen (Hrsg.) *Transgenic Plants: a Production System for Industrial and Pharmaceutical Proteins.* 1996, John Wiley & Sons, Chichester, 213-225.
- Pen, J., T.C. Verwoerd, P.A. van Paridon, R.F. Beudeker, P.J.M. van den Elzen, K. Geerse, J.D. van der Klis, H.A.J. Versteegh, A.J.J. van Ooyen und A. Hoekema, 1993: Phytase-containing transgenic seeds as a novel feed additive for improved phosphorus utilization. *Bio/Technology* 11, 811-814.
- Peoples, M.B. und E.T. Craswell, 1992: Biological fixation: Investments, expectations and actual contributions to agriculture. *Plant and Soil* 141, 13-39.
- Peoples, M.B., D.F. Herridge und J.K. Ladha, 1995: Biological nitrogen fixation: An efficient source for sustainable agricultural production? *Plant and Soil* 174, 3-28.
- Peterson, C.J., V.A. Johnson und P.J. Mattern, 1983: Evaluation of variation in mineral element concentrations in wheat flour and bran of different cultivars. *Cereal Chem.* 60, 450-455.
- Pezzatti, M.-G., S. Anwanger Phan-huy, P. Rieder und B. Lehmann. Ökonomische Auswirkungen eines Einsatzes von Nutzpflanzen mit gentechnisch erzeugten Resistenzen gegen Krankheiten und Schädlinge. In: Schulte, E. und Käppeli, O. (Hrsg.) *Gentechnisch veränderte krankheits- und schädlingsresistente Nutzpflanzen: eine Option für die Landwirtschaft?* Bern: Schweiz. Nationalfonds, Schwerpunktprogramm Biotechnologie; 1996; Band I.
- Powles, S. B.; Preston, C.; Bryan, I. B., and Jutsum, A. R. Herbicide resistance: impact and management. *Advances-in-Agronomy.* 1997; 5857-93.

- Raboy, V., D.B. Dickinson und F.E. Below, 1984: Variation in seed total phosphorus, phytic acid, zinc, calcium, magnesium, and protein among lines of *Glycine max* and *G. soja*. *Crop Sci.* 24, 431-434.
- Raboy, V., F.E. Below, and D.B. Dickinson, 1989: Alteration of maize kernel phytic acid levels by recurrent selection for protein and oil. *J. Heredity* 80, 311-315.
- Raboy, V., M.H. Noaman, G.A. Taylor und S.G. Pickett, 1991: Grain phytic acid and protein are highly correlated in winter wheat. *Crop Sci.* 31, 631-635.
- Rausche, B. Alternativen im Pflanzenschutz: biologische/biotechnische Verfahren und Resistenzzüchtung: Tagungsbericht; 1992 Nov 6; Bonn-Bad Godesberg. Bonn: Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten; 1993:140.
- Raven, J.A., 1985: Regulation of pH and generation of osmolarity in vascular plants: a cost benefit analysis in relation to efficiency of use of energy, nitrogen and water. *New Phytol.* 101, 25-77.
- Reddy, N.R., S.K. Sathe und D.K. Salunkhe, 1982: Phytates in legumes and cereals. *Adv. Food Res.* 28, 1-91.
- Richards, I. R., P. A. Wallace und G. A. Paulson, 1996: Effects of applied nitrogen on soil nitrate-nitrogen content after harvest of winter barley. *Fertil. Res.* 45, 61-67.
- Richardson, A.E., L.R. Connell, D.M. Halsall, A.H. Gibson und J.M. Watson, 1991: Towards the development of cellulolytic diazotrophs. - In: Richardson, A.E. und M.B. Peoples (Hrsg.) *Proceedings of the 9th Australian Nitrogen Fixation Conference*, pp. 11-12.
- Rigaud, J., 1981: Comparison of the efficiency of nitrate and nitrogen fixation in crop yield. - In: Bewley, J.D (Hrsg.) *Nitrogen and Carbon Metabolism*. Marinus Nijhoff/Dr. W. Junk Publishers. The Hague, Boston, London, pp. 17-48.
- Römer, W. J. Augustin und G. Schilling, 1988: The relationship between phosphate absorption and root length in nine wheat cultivars. *Plant and Soil.* 1988, 111: 2, 199-201.
- Roper, M.M. und J.K. Ladha, 1995: Biological N₂ fixation by heterotrophic and phototrophic bacteria in association with straw. *Plant and Soil* 174, 211-224.
- Rüegg, W., 1994: Verfügbarkeit von Stickstoff für Silomais bei Mulchsaat in abgestorbene Zwischenfruchtbestände. Diss. ETH Zürich Nr. 10708.
- Rühl, G., 1997: Proteine - In: Keller, E.R., H. Hanus und K.-U. Heyland (Hrsg.) *Handbuch des Pflanzenbaus*. Band 1: Grundlagen der landwirtschaftlichen Pflanzenproduktion, Verlag Eugen Ulmer, Stuttgart, pp. 533-535.
- Schafer, J. F. Host plant [inherent] resistance to plant pathogens and insects: history, current status, and future outlook. [Biological control]. In: Maxwell, F. G. and Harris, F. A., Hrsg. *Proceedings of the Summer Institute on Biological Control of Plant Insects & Diseases*. Mississippi State University, MS: Miss. Agric. Expt. Sta.; 1974: 238-247.

- Schmid, J. E. und Büter, B. Einführung in die moderne Züchtungsmethodik. In: Keller, E. R.; Hanus, H., und Heyland, K.-U., Hrsg. Handbuch des Pflanzenbaus: 1. Grundlagen der landwirtschaftlichen Pflanzenproduktion. Stuttgart (Hohenheim): Ulmer; 1997; pp. 170-186. 860.
- Schmid, J. E.; Carrel, K., and Stamp, P. Bedeutung gentechnisch veränderter krankheits- und schädlingsresistenter Nutzpflanzen für Pflanzenbau und Pflanzenzüchtung. In: Schulte, E. und Käppeli, O., (Hrsg.) Gentechnisch veränderte krankheits- und schädlingsresistente Nutzpflanzen: eine Option für die Landwirtschaft? Bern: Schweiz. Nationalfonds, Schwerpunktprogramm Biotechnologie; 1996; Band I, Materialien pp. 373-456.
- Schmidtke, K., 1996: Methodik der Ermittlung der N-Flächenbilanz beim Anbau von Leguminosen. Mitt. Ges. Pflanzenbauwiss. 9, 43-44.
- Schubert, K.R., 1986: Products of biological nitrogen fixation in higher plants: symbiosis, transport, and metabolism. Ann. Rev. Plant Physiol. 37, 359-574.
- Schulthess, U., B. Feil und S.C. Jutzi, 1997: Yield-independant variation in grain nitrogen and phosphorus concentration among Ethiopian wheats. Agron. J. 89, 497-506.
- Schulte, E. und O. Käppeli 1996 (Hrsg.): Gentechnisch veränderte krankheits- und schädlingsresistente Nutzpflanzen. Eine Option für die Landwirtschaft? Band 1, 637 Seiten, BATS, Basel.
- Schulte, E. und O. Käppeli 1997: Gentechnisch veränderte krankheits- und schädlingsresistente Nutzpflanzen. Eine Option für die Landwirtschaft? Band 2, 45 Seiten, BATS, Basel.
- Schütte, G. Pflanzenschutz mit Hilfe der Gentechnik am Beispiel einer virusresisten Zuckerrübensorte. Denkbare Folgen, Risiken und offene Fragen. In: Albrecht, S. and Beusmann, V., Hrsg. Ökologie transgener Nutzpflanzen. Frankfurt / New York: Campus Verlag; 1995; pp. 183-213. 235(Gentechnologie - Chancen und Risiken, v. Band 31).
- Shamsuddin A.M., I. Vucenik und K.E. Cole, 1997: $\text{p}6$: A novel anti-cancer agent. Life Sci. 61, 343-354.
- Shewry, P.R., A.S. Tatham und P. Lazzeri, 1997: Biotechnology and wheat quality. J. Sci. Food Agric. 73, 397-406.
- Shimoni, Y., A.E. Blechl, O.D. Anderson und G. Galili, 1997: A recombinant protein of two high molecular weight glutenins alters gluten polymer formation in transgenic wheat. J. Biol. Chem. 272, 15488-15495.
- Singh, B. K.; Bascomb, N. F., and Shaner, D. L. Herbicide resistant crops. Integrated weed management for sustainable agriculture. Proceedings of an Indian Society of Weed Science International Symposium.; 1993 Nov 18-1993 Nov 20; Hisar, India. Hisar, Haryana; India: Indian Society of Weed Science; 1993: 195-201.
- Sieling, K. und H. Hanus, 1997: N-Aufnahme und N-Verwertungseffizienz zweier Weizensorten bei variierter mineralischer N-Düngung. Pflanzenbauwiss. 1, 57-62.

- Sleper, D. A.; Barker, T. C., and Bramel, C. P. J. Plant breeding and sustainable agriculture: considerations for objectives and methods. Proceeding of a symposium sponsored by Division C-1 of the Crop Science Society of America; 1989 Oct 17; Las Vegas, Nevada, USA. CSSA ; 1991xvii + 93.
- Smith, S.E., A.D. Robson und L.K. Abott, 1993: The involvement of mycorrhizas in assessment of genetically dependent efficiency of nutrient uptake and use. - In: Randall, P.J., E. Delhaize, R.A. Richards und R. Munns (Hrsg.) Genetic Aspects of Plant Mineral Nutrition, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht/Boston/London, pp. 221-231.
- Stevens, T., 1997: Raiding the phosphorus bank. Rural Res. 174, 13-16.
- Stoorvogel, J.J., E.M.A. Smaling und B.H. Janssen, 1993: Calculating soil nutrient balances in Africa at different scales. I. Supra-national scale. Fert. Res. 35, 227-235
- Stöppler, H., 1988: Zur Eignung von Winterweizensorten hinsichtlich des Anbaues und der Qualität der Produkte in einem System mit geringer Betriebsmittelzufuhr von außen. Diss. Witzenhausen.
- Stutte, C. A. und P. R. F. da Silva, 1981: Nitrogen volatilization from rice leaves. I. Effects of genotype and air temperature. Crop Sci. 21, 596-600.
- Tabe, L. und T.J.V. Higgins, 1998: Engineering plant protein composition for improved nutrition. Trends in Plant Sci. 3, 282-286.
- Tinker, P. B. H., 1979: Uptake and consumption of soil nitrogen in relation to agronomic practice. - In: Hewitt, E. J. und C. V. Cutting (Hrsg.) Nitrogen Assimilation of Plants. Academic Press, 101-122.
- Tusser, T., 1580: Five Hundred Points of Good Husbandry (zitiert in Paine und Harrison, 1993: The historical roots of living mulch and related practices. HortTechnology 3, 137-143.
- Upchurch, R.G., 1996: Diazotrophic endophytes: progress and prospects for nitrogen fixation in monocots. Plant and Soil 186, 29-38.
- Usayran, N. und D. Balnave, 1995: Phosphorus requirements of laying hens fed on wheat-based diets. British Poultry Sci. 36, 285-301.
- Van Ray, B. und Van Diest, A., 1979. Utilization of phosphate from different sources by six plant species. Plant and Soil, 51: 577-589.
- Verordnung über die Direktzahlungen an die Landwirtschaft (DVZ), AS 1999
- Vos, G. J. M., B. Duquet, J. C. Vedy und J. A. Neyroud, 1993: The course of ¹⁵N-ammonium nitrate in a spring barley cropping system. Plant and Soil 150, 167-175.
- von Broock, R.; Umbach, H., and Zeddies, J. Auswirkungen der Herbizidresistenz Technik auf die Züchtungspraxis und die genetischen Ressourcen. In: van den Daele, W.; Pühler, A., and Sukopp, H., Hrsg. Verfahren zur Technikfolgenabschätzung des Anbaus von Kulturpflanzen mit gentechnisch erzeugter Herbizidresistenz. Berlin: Wissenschaftszentrum Berlin für Sozialforschung (WZB); 1993; p. Heft 11.

- Wentzien, C., F. Timmermann und H. Soechtig, 1985: Field experiments to prove a model for qualitative evaluation of the nitrogen turnover in the soil-plant system. *Z. Deutsch. Geolog. Ges.* 136, 451-460.
- Wetselaar, R. und G. D. Farquhar, 1980: Nitrogen losses from tops of plants. *Adv. Agron.* 33, 263-302.
- Wirz, 1999: *Landwirtschaftliches Handbuch*. Verlag Wirz, Basel.
- Yan, X., J.P. Lynch und S.E. Beebe, 1995: Genetic variation for phosphorus efficiency of common bean in contrasting soil types: I. Vegetative response. *Crop Sci.* 35, 1086-1093.
- Yost, und Fox, 1979: Contribution of mycorrhizae to P nutrition of crops growing on an oxisol. *Agron. J.* 71, 903-908.
- Youngs, V.L. und R.A. Forsberg, 1987: Oat. - In: Olson, R.A. und K.J. Frey (Hrsg.) *Nutritional Quality of Cereal Grains: Genetic and Agronomic Improvement - Agronomy Monograph no. 28*, ASA-CSSSA-SSSA, Madison, WI, pp. 457-499.
- Zhou, J.R. and J.W. Erdman, Jr., 1995: Phytic acid in health and disease. *Crit. Rev. Food Sci. Nutr.* 35, 495-508.