

Biologische Bundesanstalt für Land- und Forstwirtschaft, Institut für Unkrautforschung, Braunschweig

Herbizidresistenz als Zuchtziel – Anmerkungen zu Nutzen, Risiken und Perspektiven

Breeding for herbicide resistance – remarks on benefits, risks and perspectives

Von P. Niemann

Zusammenfassung

Durch Züchtung auf Herbizidresistenz sollen Kulturpflanzenbestände vollständig vor Phytotoxizität geschützt werden, so daß auch bisher nichtselektive Herbizide in ihnen anwendbar sind. Methodisch kann dieses Ziel mit der Gentechnik, mit der Mutantenselektion *in vitro* und mit klassischen Züchtungsverfahren erreicht werden. Damit eröffnet sich neben dem langwierigen und mit steigenden Kosten belasteten Screening auf Wirksamkeit und Verträglichkeit ein weiterer Weg zur Erweiterung des Angebots von chemischen Unkrautbekämpfungsmitteln für bestimmte Indikationen. Kennzeichnend für dieses neue Konzept wird es sein, daß ein Herbizid komplementär an eine bestimmte Sorte gebunden ist und sich der Landwirt mit der Sortenwahl automatisch für ein bestimmtes Herbizid entscheidet. Daraus können sich ökonomische Vorteile ergeben.

Langfristig kann aus einer als Folge des Züchtungsansatzes möglicherweise eintretenden reduzierten Diversität des Sorten- und Herbizidangebots ein Risikopotential entstehen, das es zu erkennen, zu analysieren und zu beherrschen gilt.

Marktchancen für ein Komplementärangebot werden zunächst in konkurrenzschwachen Kulturen bei hohen Behandlungskosten, häufigen Behandlungen sowie gelegentlichen Problemen hinsichtlich Wirksamkeit und Verträglichkeit der vorhandenen Verfahren (z. B. Zuckerrüben) gesehen. Darüber hinaus wird der Züchtungsansatz dazu beitragen können, ökologisch bedenkliche Wirkstoffe relativ kurzfristig durch unbedenklichere zu ersetzen.

Abstract

Breeding for herbicide resistance is a possibility to gain complete crop tolerance for treatments with hitherto a nonselective herbicide in a given crop. Different breeding methods could be employed to reach this goal: genetic-engineering, mutant selection *in vitro* and the classical methods. This approach opens an additional way besides the expensive and time consuming screening for efficacy and crop tolerance to increase the options for chemical weed control in a given crop. The concept will be sold as a package with the herbicide and a complimentary cultivar and the farmer automatically makes a decision for a herbicide if he selects the cultivar and vice versa. This could have economic advantages for the herbicide manufacturer and/or the farmer.

But on the long term the concept may lead to a reduced diversity of cultivars and herbicides. This appears to be a risk which should be analyzed and reduced by a proper risk management.

Complimentary packages with broad spectrum herbicides seem to be suited for solving weed problems in low competitive crops with high herbicide costs and only marginal efficacy and/or crop tolerance (i. e. sugar beets). In addition breeding for herbicide resistance could help to eliminate quickly the use of environmentally unsafe herbicides.

1. Einführung

In den letzten Jahrzehnten hat die Industrie eine Vielzahl von herbiziden Wirkstoffen bereitgestellt, mit denen sich heute in den flächenmäßig bedeutenden Kulturen nahezu alle Unkrautprobleme chemisch lösen lassen. Das relativ günstige Kosten-Nutzen-Verhältnis dieser Verfahren hat dazu geführt, daß sie zu einem festen und teils sogar unentbehrlichen Bestandteil der pflanzlichen Produktionstechnik geworden sind. Sowohl die Selektivität als auch die Wirksamkeit der Präparate haben ein Niveau erreicht, das noch vor wenigen Jahrzehnten unvorstellbar war. Eine prinzipielle Abkehr von den bisher verfolgten Zielen der Herbizidforschung stand bis vor kurzem nicht zur Diskussion. Vor diesem Hintergrund ist es zunächst schwer verständlich, daß ein Teilziel der Herbizidforschung, die Verbesserung der Selektivität, gegenwärtig das lebhafteste Interesse weiterer Kreise insbesondere außerhalb der engeren Fachöffentlichkeit gefunden hat und in zunehmendem Maße kontrovers diskutiert wird. Dies ist damit zu erklären, daß die gentechnische Übertragung der Herbizidresistenz auf Kulturpflanzenarten, also das Erreichen eines extrem hohen Selektivitätsgrades, als eines der am ehesten realisierbaren Anwendungsfelder der Gentechnik mit Pflanzen überhaupt angesehen wird. Über weitere mögliche Anwendungen der Gentechnik mit Pflanzen informiert Tabelle 1.

Tab. 1. Mögliche Anwendungen der Gentechnik mit Pflanzen (aus ECKES et al., 1987)

1. Resistenzzeugung gegen
Herbizide
Viruserkrankungen
pilzliche Erkrankungen
Schädlinge
Mikroorganismen
Streßbedingungen
2. Beeinflussung pflanzlicher Inhaltsstoffe;
Veränderung der Aminosäurezusammensetzung oder des Proteingehalts;
Veränderung der Zusammensetzung pflanzlicher Öle, Kohlenhydrate oder Metabolite;
Beeinflussung von Inhaltsstoffen, die für Verarbeitung, Lagerung oder Transport von Bedeutung sind
3. Beeinflussung pflanzenphysiologischer Vorgänge
Beeinflussung der Photosynthese und/oder Photorespiration
4. Beeinflussung der Stickstofffixierung
5. Gentechnik als Hilfsmittel für die Pflanzenzüchtung
Diagnose von Krankheiten
Gen- und Genotypencharakterisierung

Die Gentechnik im weitesten Sinn befindet sich weltweit in einer stürmischen Entwicklung. „Pro Tag, so kann man vorsichtig schätzen, erscheinen rund tausend einschlägige Veröffentlichungen, die Zahl der Fachzeitschriften geht in die Hunderte“ (ALBRECHT, 1988). Allein in den USA arbeiten etwa 100 einzelne Wissenschaftler oder Forschergruppen ausschließlich im Bereich der gentechnischen Erzeugung von Herbizidresistenz (LEBARON, 1987). Weltweit dürfte es sich mindestens um die doppelte Anzahl handeln. Neben den führenden Herbizidherstellern sind zahlreiche „Genfirmen“ in diesem Bereich tätig (KRAUS, 1985). Internationale Kongresse sind ganz oder teilweise diesem Thema gewidmet.

Es soll nicht das Ziel dieses Beitrages sein, einen weiteren Übersichtsartikel zur wissenschaftlichen Basis und den Methoden der Gentechnik mit Pflanzen zu liefern. Dies ist bereits in zahlreichen einschlägigen Arbeiten erfolgt (HERZFELD et al., 1985; KRAUS, 1985; AMMON et al., 1987; ECKES et al., 1987; FRALEY et al., 1987; GOODMAN, 1987; MARSHALL, 1987; PIMENTEL, 1987; SCHUPHAN, 1987 u. a.).

Hier soll der gegenwärtige Kenntnisstand nur kurz dargelegt werden, um dann primär auf das Für und Wider eines Zuchtziels Herbizidresistenz unter verschiedenen Aspekten (Herbologie, Pflanzenbau, Ökologie, Volkswirtschaft, Zulassung von Herbiziden) einzugehen und abschließend einige Möglichkeiten der kurz- und langfristigen Entwicklung zu skizzieren.

2. Selektivität und Wirksamkeit als Ziele der Herbizidforschung

Ein selektives Unkrautbekämpfungsmittel zeichnet sich durch Verträglichkeit für bestimmte Kulturpflanzenarten und Wirksamkeit gegen Unkräuter aus. Nichtselektive Mittel („Totalherbizide“) können dagegen in einjährigen Kulturpflanzenbeständen zum Zwecke der Unkrautbekämpfung bis auf wenige Spezialindikationen nicht eingesetzt werden. Herbizide dürfen, wie jedes andere Pflanzenschutzmittel auch, nur in den Verkehr gebracht werden, wenn sie von der Biologischen Bundesanstalt zugelassen sind (§ 11 Abs. 1 PflSchG; WOLF, 1983; VOSS, 1986; MARTIN, 1988). Kriterien für die Zulassung sind neben der hinreichenden Wirksamkeit des Pflanzenschutzmittels u. a. die Eigenschaft, daß es bei bestimmungsgemäßer und sachgerechter Anwendung keine schädlichen Auswirkungen auf die Gesundheit von Mensch und Tier und auf das Grundwasser und keine sonstigen Auswirkungen, insbesondere auf den Naturhaushalt, hat (§ 15 PflSchG).

Über den wirtschaftlichen Erfolg eines Mittels entscheidet allein der Markt. Infolge von Marktsättigungstendenzen einerseits und steigenden Kosten für Forschung, Entwicklung und Zulassung andererseits ist die Zahl der jährlich neu auf den Markt kommenden herbiziden Wirkstoffe tendenziell rückläufig.

Die in den letzten Jahren zugelassenen Präparate mit neuen Wirkstoffen haben sowohl wesentliche Indikationslücken geschlossen (z. B. Bekämpfung von monokotylen Unkrautarten im Nachauflaufverfahren in Betarüben, Raps und Kartoffeln) als auch in einigen Anwendungsbereichen das Präparateangebot wesentlich erweitert (z. B. Bekämpfung von Problemunkräutern des Ackerbaus wie *Galium aparine* und *Viola arvensis*). Neben Präparaten mit nur einem Wirkstoff konzentriert sich die Herbizidentwicklung auf Kombinationspräparate mit mehreren, teilweise auch älteren Wirkstoffen („Breitbandherbizide“). Diese Präparate ermöglichen es dem Landwirt, die chemische Unkrautbekämpfung in vielen Kulturen auf eine Behandlung im Jahr zu reduzieren. Breitbandherbizide erfassen aber keineswegs, wie es der Name vermuten

läßt, die gesamte Unkrautflora, sondern in der Regel nur ein mehr oder weniger breites Artenspektrum. Präparate mit einem engen Wirkungsspektrum haben nur einen begrenzten Markt. Er würde vermutlich noch weiter schrumpfen, wenn es gelänge, Mittel mit einem tatsächlich umfassenden Wirkungsspektrum zu entwickeln.

Kennzeichnend für die neueren Herbizide sind weiterhin das Vorherrschen von Nachlaufindikationen und der Trend zu geringerem Mittelaufwand pro ha. Letzteres wird in der Regel durch neue Wirkstoffe mit höherer biologischer Aktivität aber auch durch Umformulierung älterer Präparate erreicht. Unabhängig von diesen generellen Zielen der Herbizidforschung versuchen sowohl die amtliche Pflanzenschutzberatung als auch die landwirtschaftliche Praxis durch eine ausgefeilte Anwendungstechnik (Splitting, Terminwahl, Tankmischungen, Zusatzstoffe) den bei der Zulassung vorgesehenen Mittelaufwand aus Gründen der Kosten und der Verträglichkeit bei unveränderter Wirksamkeit zu unterschreiten. Überzeugende Resultate wurden insbesondere im Zuckerrübenbau erzielt (GARBURG, 1987 a und b). Beispielsweise ist Goltix WG (Metamitron) mit bis zu 10 kg/ha im Nachauflaufverfahren bei der Zulassung vorgesehen. Der von der amtlichen Beratung für Spritzfolgen empfohlene Aufwand beträgt dagegen nur 4 kg/ha im Jahr. Ähnliches trifft für weitere Präparate zu, so daß die Behandlungskosten im Rübenbau und damit auch die Belastung des Bodens mit Herbiziden in den letzten Jahren regional um bis zu 50% reduziert werden konnten (GARBURG, 1987 a und b, 1988 b).

Auch unabhängig von diesem Spezialfall ist allgemein festzustellen, daß der monetäre Aufwand pro ha für Herbizide im Ackerbau kaum noch ansteigt. Insbesondere im Getreidebau hat er sich stabilisiert (HÖSEL und RUPPERT, 1986). Horizontale Betriebsvergleiche haben darüber hinaus wiederholt ergeben, daß sich Betriebe mit einem hohen Ertragsniveau und einem überdurchschnittlichen Management durch einen vergleichsweise geringen Aufwand für Herbizide je Flächeneinheit auszeichnen (GÖBBEL, 1981; BÖTTGER et al., 1983; BARTELS, 1984; KUHLMANN, 1984). Es besteht somit kein gesicherter Zusammenhang zwischen Ertragsniveau und Herbizideinsatz.

Der kontinuierliche Einsatz von Herbiziden hat in der Vergangenheit aufgrund der regional und einzelbetrieblich bevorzugten Anwendung von relativ wenigen Wirkstoffen in fast regelmäßigen Abständen zu interspezifischen Selektionen von immer neuen „Problemunkräutern“ geführt (GARBURG, 1977 und 1988 a). Darüber hinaus kam es bei extrem einseitiger Herbizidanwendung zu intraspezifischer Selektion von herbizidresistenten Biotypen (MARSHALL, 1987). Bisher konnten die Probleme der „Sequenzfloren“ stets mit neuen Wirkstoffen und/oder Wirkstoffkombinationen sowie wirkungsfördernden Zusatzstoffen zur Spritzflüssigkeit (MARTIN, 1982) gelöst werden.

Der ständige Wandel der Unkrautflora im Ackerbau hat sich auf die Anzahl der Herbizidbehandlungen eines Feldes pro Vegetationsperiode kaum ausgewirkt, da die Präparate den veränderten Unkrautspektren angepaßt wurden, d. h. ältere Wirkstoffe wurden durch neue ersetzt.

Bei dem nunmehr erreichten Entwicklungsstand der chemischen Unkrautbekämpfung tauchen zunächst Zweifel an der Notwendigkeit eines Zuchtziels Herbizidresistenz, also der Erhöhung der Selektivität, auf. Folgende Argumente sprechen für diesen Ansatz (ECKES et al., 1987; GOODMAN, 1987; LEBARON, 1987; NETZER, 1984 u. a.):

- Die Einsatzbereiche von ökologisch unbedenklicheren Wirkstoffen können erweitert werden.

- Steigende Kosten für die Entwicklung selektiver Wirkstoffe begrenzen zunehmend das Herbizidangebot für einzelne Kulturen. Die Resistenzzüchtung eröffnet einen neuen Weg der Erweiterung des Herbizidangebots für bestimmte Indikationen. Unkrautprobleme brauchen also nicht mehr allein über den zeitaufwendigen und kostenintensiven Weg des Screenens auf Wirksamkeit und Selektivität gelöst zu werden.
- Fruchtfolgeprobleme durch persistente Wirkstoffe (Soja nach atrazinbehandeltem Mais) lassen sich ohne Wirkstoffwechsel lösen.
- Es werden primär Resistenzen gegen Nachaufarbeitungsbehandlungen angestrebt. Dies ermöglicht gezielte Anwendungen und damit einen Rückgang der Behandlungen pro ha und Jahr sowie der Kosten für den Landwirt.
- Das Herbizidangebot für die Indikation „Unkrautbekämpfung bei konservierender Bodenbearbeitung“ wird durch eine Resistenz der Kulturpflanzen gegen bisher nichtselektive Präparate wesentlich erweitert. Dies ist aus Gründen des Bodenschutzes (z. B. Erosionsschutz) positiv zu beurteilen.
- Ein gestrafftes Herbizidangebot macht den Markt für den Landwirt überschaubarer.
- Wegen des höheren Selektivitätsgrades wird die Handhabung von Herbiziden für den Landwirt einfacher und risikoärmer.
- Durch Ausweitung des Marktvolumens einzelner Wirkstoffe können deren Produktionskosten fallen.
- Ältere Wirkstoffe mit auslaufendem Patentschutz werden komplementär an eine Sorte gebunden. Dies sichert die Marktposition des bisherigen Anbieters.
- Methodisch ist der Transfer von Genen für Herbizidresistenz weitgehend gelöst.

3. Methoden der Züchtung auf Herbizidresistenz

Die Züchtung herbizidresistenter Sorten kann auf verschiedenen Wegen erfolgen (CHALEFF, 1986):

- Klassische Züchtungsverfahren (BEVERSDORF und KOTT, 1987)
- Mutantenselektion in vitro mittels Zellkultur (SHANER et al., 1985)
- Gentechnik (THOMPSON et al., 1987).

Zuchtziel ist es, in jedem Fall, einen hohen Grad an physiologischer Herbizidresistenz in einer bisher sensitiven Kulturpflanzenart oder -sorte zu erreichen (MARSHALL, 1987). Die bloße Erhöhung des Selektivitätsgrades einer bereits bestehenden natürlichen Herbizidtoleranz in einer Art oder Sorte scheidet demnach als primäres Zuchtziel aus.

Im Gegensatz zu den klassischen Züchtungsverfahren sind die beiden übrigen freilandunabhängiger, weniger zeitaufwendig und langfristig vermutlich kostengünstiger.

Artschranken stellen insbesondere bei der Gentechnik kein unüberwindliches Hindernis mehr für die Neukombination von Merkmalen dar. Es lassen sich fremde Gene in pflanzliche Zellen transferieren, die in der Art, Gattung oder Familie noch nicht vorhanden gewesen waren (ECKES et al., 1987). Genreservoir anderer Organismen werden auf diese Weise für die Pflanzenzüchtung nutzbar gemacht. Sofern der Wirkungsort der Aktivsubstanz bekannt ist, läßt sich eine Herbizidresistenz relativ leicht gentechnisch realisieren, da nur ein oder wenige Gene transferiert werden müssen. Genquellen sind Mikroorganismen und höhere Pflanzen. Als Genvektor dient häufig *Agrobacterium tumefaciens*.

Züchtungsobjekte waren bisher, wegen des begrenzten Wirtspflanzenkreises von *A. tumefaciens*, primär dikotyle Arten wie Tabak, Tomate, Baumwolle, Sonnenblume, Soja, Raps u. a. Transgene herbizidresistente Pflanzen wurden bereits im Freiland erfolgreich getestet (u. a. LEEMANS et al., 1987). Mit folgenden neueren Wirkstoffen bzw. Wirkstoffklassen wird schwerpunktmäßig gearbeitet: Glyphosat, Gluphosinate-ammonium, Sulphonylharnstoffe, Dihydroimidazolone. An älteren Wirkstoffen sind Atrazin, Trifluralin und Bromoxynil zu nennen (FRALEY et al., 1987).

Innerhalb der nächsten 2–3 Jahre werden alle wichtigen Kulturpflanzenarten gentechnisch veränderbar sein. Innerhalb der nächsten 5–10 Jahre wird das Transferieren von Herbizidresistenz zur Routine geworden sein (FRALEY et al., 1987).

4. Andere Wege zur Erhöhung der Selektivität

Mit der Züchtung auf Herbizidresistenz soll die Kulturpflanze auf genetischem Wege vor Phytotoxizität geschützt werden. Dieses Ziel läßt sich grundsätzlich auch anders erreichen:

- Durch tiefe Saat (positionelle Selektivität) wird bei vielen über den Boden wirksamen Herbiziden die Selektivität graduell verbessert.
- Durch gerichtete Applikation (Streichverfahren, Unterblattspritzung) lassen sich physiologisch nichtselektive Herbizide in Kulturpflanzenbeständen einsetzen.
- Chemische Schutzstoffe (Antidots) werden dem Saatgut oder der Formulierung beigegeben und bewirken einen selektiven Schutz der Kulturpflanze vor der Herbizideinwirkung. Über den Wirkungsmechanismus gibt es verschiedene Theorien (FEDTKE, 1985). Wahrscheinlich wird eine schnellere Entgiftung der Aktivsubstanz in der Kulturpflanze bewirkt. Antidots gibt es vor allem für Thiocarbamate und Chloracetanilide. Praktische Bedeutung haben sie in Mais erlangt.

Im Prinzip eignet sich das Antidotkonzept wie der Züchtungsansatz dazu, Unkrautprobleme nicht durch aufwendiges Screening, sondern durch den chemischen Schutz der Kulturpflanze vor einem bisher nichtselektiven Herbizid zu lösen. Gegenüber der Züchtung hat dieser Ansatz den Vorzug, daß, bei Saatgutapplikation, die nicht geernteten Diasporen (Ausfallgetreide ect.) nicht mehr geschützt sind und die aufgelaufenen Pflanzen sogar mit dem gleichen Herbizid wieder bekämpft werden können. Auch entsteht nicht die Freisetzungproblematik wie bei genetisch veränderten Pflanzen (s. u. a. HAUPTLI et al., 1985).

- Die Selektivität einer Herbizidbehandlung läßt sich auch durch unterdosierte Vorbehandlungen mit demselben Herbizid erhöhen. Diese Forschungen haben das Anwendungsstadium allerdings noch nicht erreicht (STEPHENSON und EZRA, 1987).
- Selektive Synergisten erhöhen die Wirksamkeit von Herbiziden gegen Unkräuter, sie ermöglichen damit einen reduzierten Mittelaufwand und senken so indirekt das Phytotoxizitätsrisiko. Auch diese Arbeiten haben das Anwendungsstadium noch nicht erreicht (STEPHENSON und EZRA, 1987).

5. Mögliche Auswirkungen des Anbaus von herbizidresistenten Sorten

Gegenwärtig ist noch nicht abzusehen, wann und in welchem Umfang herbizidresistente Sorten einmal angebaut werden. Die Praxisreife wird in den USA für Anfang der 90er Jahre erwartet (SUN, 1986). Im folgenden soll von der Annahme

ausgegangen werden, daß ein Verbundangebot bestehend aus einer herbizidresistenten Sorte und einem komplementären, breitwirksamen Herbizid am Markt konkurrenzfähig ist und daß derartige Sorten auch in einem nennenswerten Umfang angebaut werden. Welche Chancen und Risiken können sich daraus unter unseren Verhältnissen (Bundesrepublik Deutschland) ergeben?

Als ein kurzfristiger Betrachtungszeitraum werden 5–10 Jahre angenommen. In diesem Zeitraum sollen die bisherigen Sorten und Herbizide neben den Komplementärangeboten noch uneingeschränkt weiter zur Verfügung stehen. Langfristig (> 10 Jahre) überwiegt dagegen das Angebot bei den herbizidresistenten Sorten. In ihnen ist der Einsatz von nicht-komplementären Herbiziden ausgeschlossen. Die Diversität des Wirkstoffangebots hat für alle Indikationen abgenommen. Auch ist das Sortenangebot weniger vielfältig. Es wird weiter davon ausgegangen, daß herbizidresistente Sorten in ihren sonstigen Merkmalen, insbesondere Ertrag und Qualität, dem allgemein erreichten Niveau entsprechen.

5.1 Herbologische Aspekte

Die Praxis ist aus Kostengründen daran interessiert, den chemischen Pflanzenschutz auf möglichst wenige Behandlungen in der Vegetationsperiode zu reduzieren. Sie erreicht dieses Ziel heute mit Mehrwirkstoffpräparaten und/oder mit Tankmischungen zugelassener Präparate einschließlich Wachstumsregler und Düngemittel.

Eine auf Herbizidresistenz gezüchtete Sorte wird im Regelfall gegen einen breitwirksamen Wirkstoff unempfindlich sein (ECKES et al., 1987; MARSHALL, 1987). Nur in Ausnahmefällen kann die Resistenz gegen ein spezifisch wirkendes Herbizid ökonomisch sinnvoll sein, beispielsweise wenn sich dadurch eine bedeutende Unkrautart bekämpfen läßt, die von dem üblicherweise in der Kultur eingesetzten selektiven Breitbandherbizid nicht ausreichend oder gar nicht erfaßt wird (GOODMAN, 1987). Schließlich wird sich die Resistenzzüchtung auf Nachaufauffindungen konzentrieren.

Nachaufauffindungen mit hoher Wirksamkeit sind aber bereits heute in der Praxis weit verbreitet. Eine Verstärkung dieses Trends durch Züchtung läßt keine prinzipiell neuen herbologischen Aspekte erwarten. Es würde lediglich das Phytotoxizitätsrisiko entfallen.

Kurzfristig kann die Praxis noch auf ältere Sorten und Herbizide zurückgreifen, falls ein Komplementärangebot nicht für bestimmte Standortverhältnisse geeignet ist. Die schlagspezifische Sorten- und Herbizidwahl bildet die Grundlage für eine flexible Anpassung der Produktionstechnik an die Standortverhältnisse. Beispielsweise kann fallweise auf ein Breitbandherbizid verzichtet werden, um im Sinne des Schadensschwellenprinzips lediglich die konkurrenzstarken Arten auszuschalten und die konkurrenzschwachen zu tolerieren.

Komplementärangebote können aber auch dazu beitragen, die produktionstechnische Flexibilität erst herbeizuführen. GOODMAN (1987) spricht in diesem Zusammenhang treffend von mehr „Freiheitsgraden“. Beispielsweise werden Wirkstoffe aus der Gruppe der Dihydroimidazolone hinsichtlich Wirkungsspektrum, Persistenz und Grundwassergefährdung positiver als Atrazin in Mais beurteilt (MARSHALL, 1987). Die selektierten Maislinien, die gegen diese Herbizide resistent sind, weisen zusätzlich Kreuzresistenz gegen Sulfonylharnstoffe auf (ANDERSON und GEORGESON, 1985 zit. in MARSHALL, 1987). Dadurch würde sich das Wirkstoffangebot für Mais zusätzlich erweitern. Praxisreife Maissorten mit einer Resistenz gegen Dihydroimidazolone werden in den USA in wenigen Jahren erwartet (FRALEY et al., 1987).

Auch bei der Unkrautbekämpfung in Zuckerrüben ließe sich mit der Resistenzzüchtung die Flexibilität durch Behandlungsalternativen gegen Problemkräuter wie *Galium aparine*, *Fallopia convolvulus*, *Mercurialis annua*, *Cirsium arvense* u. a. erhöhen. Darüber hinaus käme es durch Ausschaltung des Phytotoxizitätsrisikos zu einer Reduzierung der Zahl der Behandlungen. Nach den Kriterien, die MARSHALL (1987) anführt, ist die Zuckerrübe in besonderer Weise für den Züchtungsansatz zur Lösung von Unkrautproblemen geeignet: konkurrenzschwache Kultur, teure herkömmliche Behandlung mit Einschränkungen bei der Verträglichkeit und bei der Wirksamkeit.

Komplementäre Angebote von Sorten und Breitbandherbiziden stehen grundsätzlich nicht im Widerspruch zum Konzept des integrierten Pflanzenschutzes, sofern die Regeln der guten fachlichen Praxis (RESCHKE et al., 1987) eingehalten werden. Dies sind im besonderen:

- Die Beachtung von Schadensschwellen,
- die Einhaltung des höchsten bei der Zulassung vorgesehenen Aufwands bzw. dessen Reduzierung durch die Nutzung von Wechselwirkungen,
- die Anpassung der Mittelwahl an das Unkrautspektrum (gezielte Anwendung), d. h. Breitbandmittel werden nur bei entsprechendem Bedarf eingesetzt,
- die Wirkstoffe regelmäßig, auch und gerade bei enger Fruchtfolge, zu wechseln.

Im Hinblick auf den integrierten Pflanzenschutz ist es sogar positiv zu bewerten, wenn durch die Resistenzzüchtung die Nachaufauffindungen ausgeweitet und damit prophylaktische Behandlungen weiter eingeschränkt werden können.

Langfristig können Komplementärangebote marktbeherrschend werden, wenn durch sie Unkrautprobleme kostengünstiger und umweltverträglicher zu lösen sind als mit den heute bestehenden Verfahren. Die Folge wäre, daß das Angebot von nicht an Sorten gebundenen Herbiziden für eine bestimmte Indikation unbedeutend würde. Dies erhöht zwar die Markttransparenz (AMMON et al., 1987) schränkt aber gleichzeitig die Flexibilität bei der Sorten- und Herbizidwahl ein und erschwert damit die Anpassung der Produktionstechnik an die Standortverhältnisse. Im Extremfall könnte es sogar zu einer ungewöhnlichen Art von Lückenindikation kommen: Trotz bestehender Zulassung von Herbiziden für eine bedeutende Kultur ließen sich mit den wenigen Komplementärangeboten spezifische, lokal begrenzte Unkrautprobleme nicht lösen, weil die Herbizide in den standortgerechten Sorten nicht einsetzbar sind und/oder weil ein selektives Spezialherbizid aus kommerziellen Gründen fehlt.

Für ausschließlich breitwirksame Herbizide besteht in konkurrenzstarken Kulturen wie Getreide und Raps kein genereller Bedarf. Zur Tolerierung von konkurrenzschwachen Unkrautarten im Sinne des Schadensschwellenkonzeptes ist vielmehr ein Mindestangebot an weniger breitwirksamen selektiven oder komplementär gebundenen Präparaten erforderlich, da abgestufte Wirkungsgrade mit modifiziertem Aufwand von Breitbandherbiziden wegen der meist nichtlinearen Dosis-Wirkungs-Beziehungen nicht mit hinreichender Sicherheit zu erreichen sind.

Bei Anwendung von Breitbandmitteln in resistenten Sorten ist zu erwarten, daß die Zahl der Behandlungen pro Flächeneinheit in der Vegetationsperiode gegenüber heute nicht ansteigen wird, da mit einer späten Nachaufauffindung die Unkrautflora eines Kulturpflanzenbestandes in der Regel hinreichend zu bekämpfen ist. Einige Autoren (u. a. SANDERMANN, 1984; MÜLLER et al., 1987; SCHUPHAN, 1987) vermuten aber, daß der mit einer Behandlung ausgebrachte Aufwand

pro ha tendenziell steigen wird, weil dies wegen des fehlenden Phytotoxizitätsrisikos möglich und wegen der intraspezifischen Selektion von herbizideresistenten Biotypen notwendig sein wird. Gegen diese Vermutung spricht, daß ein Nichteinhalten des bei der Zulassung vorgesehenen Aufwands gegen die Regeln der guten fachlichen Praxis verstößt, daß auch der Mittelpreis ein Regulativ für den Aufwand darstellt und daß der Landwirt für nichtzulässige Rückstände infolge eines Abweichens von der Gebrauchsanleitung selbst haftet. Schließlich ist es aufgrund aller bisher gemachten Erfahrungen nicht möglich, selektierte Biotypen mit höherem Aufwand desselben Herbizids wirtschaftlich zu bekämpfen. Hierzu bedarf es eines Wirkstoffwechsels.

Ein weiteres Risiko der Züchtung auf Herbizidresistenz wird zu Recht darin gesehen, daß als Folge einer begrenzten Wirkstoffdiversität der Selektionsdruck ansteigt und sich das Problem der Resistenz von Unkräutern gegen Herbizide verschärft (AMMON, et al., 1987; GOODMAN, 1987; SCHUPHAN, 1987). Ob sich diese Schwierigkeiten durch die laufende Transferierung neuer Resistenzgene in Sorten in Verbindung mit einer begrenzten Neuentwicklung von Wirkstoffen lösen lassen und/oder selektive Synergisten als „Resistenzbrecher“ (KEMP und CASELEY, 1987) eine größere Bedeutung erlangen werden, ist schwierig zu prognostizieren. Ein besonderes Risiko können in dieser Hinsicht die nicht geernteten Diasporen von herbizidresistenten Sorten (z. B. Ausfallgetreide) darstellen, insbesondere wenn Kreuzresistenz vorliegt.

5.2 Pflanzenbauliche Aspekte

Die Selektivität von Herbiziden stellte bisher weder in der Pflanzenzüchtung noch im Pflanzenbau eine besondere Problematik dar. Generelles Zuchtziel ist es, daß alle Herbizide einer Indikation von den Sorten toleriert werden (KUCKUCK et al., 1985). Wenn dieses Ziel bei bestimmter Kulturarten nicht vollständig erreicht werden konnte, enthält die Gebrauchsanleitung des Präparates eines entsprechenden Hinweis auf die toleranten Sorten (Positivlisten) (Tab. 2).

Die in der Tab. 2 aufgeführten Beispiele mit eingeschränkter Sortenverträglichkeit engen den Landwirt in seiner Anbauplanung kaum ein. Wichtige Indikationen wie die Bekämpfung von *Alopecurus myosuroides* in Winterweizen auf schweren Böden sind von der Einschränkung nicht direkt betroffen, da die auf den entsprechenden Standorten bevorzugt angebauten Sorten chlortoluronverträglich sind und darüber hinaus als Behandlungsalternative der Wirkstoff Isoproturon ohne Sorteneinschränkung zur Verfügung steht.

Von der Vielzahl der zugelassenen Sorten einer Kulturart haben meist nur wenige einen größeren, bundesweiten Anbauumfang. Andere sind nur regional von Bedeutung (Tab. 3).

Die unterschiedlichen Anbaupräferenzen ergeben sich aufgrund der Standorteigenschaften einerseits und der Sortenanprüche andererseits. Auch Herbizide lassen Verbreitungsschwerpunkte erkennen. Sie sind am deutlichsten bei Präpara-

ten mit spezifischer Wirksamkeit, z. B. Flugafermittel, ausgeprägt. Die bestehende Sorten- und Herbizidvielfalt ermöglicht es dem Landwirt, betriebs- und schlagindividuelle Produktionstechniken zu realisieren.

An diesem Zustand dürfte sich *kurzfristig* nichts Wesentliches ändern. In einigen Fällen könnte sich durch herbizidresistente Sorten die Flexibilität der Anbauplanung sogar erhöhen lassen:

- Anwendung bisher nichtselektiver Mittel in Zuckerrüben.
- Anbau von Alternativkulturen mit einem Komplementärherbizid.
- Einsaat von herbizidresistenten Untersaaten (FAULKNER, 1982). Untersaaten sind aus verschiedenen Gründen vorteilhaft, speziell in Mais (Erosionsschutz, Unkrautunterdrückung, Nützlingsreservoir, Nitratabpufferung, Verdichtungsschutz), aber auch in Getreide (MERKELBACH und HEYLAND, 1988).
- Anbau von Arten- und Sortenmischungen, die aus phytopathologischen Gründen vorteilhaft sein können (STUKE und FEHRMANN, 1987; TRÄNKNER und WELTZIEN, 1986) und die wegen unterschiedlicher Herbizidverträglichkeit der Mischungspartner evtl. nicht immer zu realisieren sind.
- Kostengünstige Bereinigung von Saatgetreidebeständen (FAULKNER, 1982).
- Bekämpfung von Ausfallgetreide in Getreide.
- Ausweitung der chemischen Unkrautbekämpfungsmöglichkeiten bei konservierender Bodenbearbeitung.

Langfristig können sich einige der genannten Vorteile zu Nachteilen entwickeln, wenn nämlich der Markt von wenigen Komplementärangeboten beherrscht wird. Der Anbau von Untersaaten, Arten- und Sortenmischungen ist dann begrenzt. Auch erfolgt die Sortenwahl nicht mehr unabhängig von der Herbizidwahl, die Flexibilität wird dadurch eingeschränkt.

Durch entsprechende Preisgestaltung bei den Verbundangeboten (z. B. teures Saatgut und preisgünstiges Herbizid) kann der Anbauumfang von wenigen ökonomisch interessanten Sorten stark zunehmen. Diese Entwicklung kann durch Eigenherzeugung des Saatguts noch verstärkt werden. Folgeprobleme einseitiger Sorten- und Herbizidwahl wären epidemiologisch günstige Voraussetzungen für Krankheits- und Schädlingskalamitäten sowie Resistenzprobleme bei Unkräutern. Das Ausmaß des pflanzenbaulichen Gesamtrisikos läßt sich jedoch schwer erfassen, da die Folgen der Züchtung auf Herbizidresistenz nicht losgelöst von den sich wandelnden Rahmenbedingungen der landwirtschaftlichen Produktion gesehen werden können. Mit welchen, teils unerwarteten Auswirkungen dabei zu rechnen ist, soll anhand des weltweit ersten dokumentierten Anwendungsfalls aufgezeigt werden.

In Kanada wurden auf konventionellem Wege triazinresistente Rapsorten gezüchtet, die auch die erhöhten Qualitätsstandards hinsichtlich Erucasäure und Glucosinolate erfüllen. Ungelöste Unkrautprobleme im Sommerrapsanbau Kanadas sind die Bekämpfung der Kreuziferen *Sinapis arvensis* und *Thlaspi arvense*, die von dem bedeutendsten Raps-herbizid

Tab. 2. Beispiele für Herbizide mit einer Sortenpositivliste

| Wirkstoff | Präparat | Kulturart |
|-----------------|---------------------------|-------------|
| Chlortoluron | Dicuran 700 flüssig u. a. | W.-Weizen |
| Diclofop-methyl | Illoxan | S.-Gerste |
| Difenzoquat | Avenge | S.-Weizen |
| EPTC | Eradicane | Mais |
| Metribuzin | Sencor WG | Kartoffeln |
| Monolinuron | Aresin | Buschbohnen |

Tab. 3. Verbreitungsschwerpunkte einiger Winterweizensorten (nach ANONYM, 1987)

| bundesweit | Norddeutschland | Süddeutschland |
|------------|-----------------|----------------|
| Ares | Kraka | Basalt |
| Kanzler | Rektor | Bert |
| | Okapi | Farmer |
| | Sperber | Futur |
| | | Urban |

Trifluralin nicht erfaßt werden. In Gebieten mit Mais in der Fruchtfolge ist darüber hinaus der Rapsanbau wegen der Triazinresistenz nicht möglich. Diese Schwierigkeiten konnten mit der Züchtung triazinresistenter Sorten überwunden werden. Zudem stellten sich weitere positive Folgewirkungen ein: Durch die Erweiterung der Fruchtfolge in den traditionellen Maisanbaugebieten war es nun möglich, Problemkräuter des Maises wie *Setaria spp.* und *Panicum dichotomiflorum* mit Sethoxidim auch in Sommerraps zu bekämpfen. Rapsdurchwuchs wiederum konnte im Fruchtfolgeglied Weizen kostengünstig mit Wuchsstoffherbiziden erfaßt werden.

Neben den Vorteilen wurden aber auch unerwartete Nachteile registriert: Die triazinresistenten Sorten wiesen eine verzögerte Jugendentwicklung auf, hatten eine geringere Konkurrenzkraft (fitness), lagerten stärker, wurden stärker von Schädlingen befallen, hatten einen geringeren Ölgehalt und waren spätreifer. Ihr Anbauumfang ist daher unbedeutend geblieben und konzentriert sich auf Gebiete mit besonderen Unkrautproblemen, die sich nur mit Atrazin lösen lassen. Den möglicherweise entscheidenden Begrenzungsfaktor für die Weiterentwicklung des Konzepts der triazinresistenten Rapsorten stellt aber die Tatsache dar, daß mit dem neuen Wirkstoff DPX A 7881 seit kurzem ein selektives Herbizid zur Bekämpfung von *Sinapis arvensis* und *Thlaspi arvense* in *Brassica*-Arten verfügbar ist. Damit werden die Zukunftsaussichten eines vom Ansatz her erfolgversprechenden Komplementärangebots durch neue Entwicklungen der traditionellen Herbizidforschung entscheidend gemindert, wenn nicht gar in Frage gestellt (MARSHALL, 1987; SOUZA MACHADO und HUME, 1987).

Ein weiteres Konzept der Bindung eines Herbizids an eine oder alle Sorten einer Kulturpflanzenart stellt das Bestreben der Firma Bayer dar, eine Resistenz gegen Sencor WG (Metribuzin) in 00-Rapssorten zu verankern. Die organisatorische Basis hierfür bilden entsprechende vertragliche Vereinbarungen zwischen den Rapszüchtern und dem Herbizidhersteller (AMMON et al., 1987). Dabei wird von dem Grundsatz ausgegangen, daß die Pflanzenzüchtung regional ausgerichtet sein muß und daß es im Interesse des Herbizidherstellers liegt, wenn die Resistenz in möglichst vielen Sorten vorhanden ist (KRAUS, 1985). Falls dies gelingt, könnte Durchwuchs von 0-Sorten in OO-Sorten mit Sencor WG bekämpft werden. Dadurch ließen sich die ab 1991 in der EG gültigen Qualitätsstandards für Raps einhalten, ohne auf Flächen ausweichen zu müssen, auf denen wegen der langen Lebensdauer der Samen im Boden über mehrere Jahre kein 0-Raps angebaut wurde. Sobald der 0-Samen-Vorrat im Boden erschöpft ist, entfällt der Zwang zum Einsatz von Sencor WG, das ohnehin in vielen Fällen durch einen weiteren Wirkstoff zur Bekämpfung von *Galium aparine* ergänzt werden müßte. Das angestrebte Konzept ist somit geeignet, ein akutes Problem zu lösen, und es ist positiv zu bewerten, wenn sichergestellt ist, daß nach einer Übergangsphase neben Sencor WG auch weitere Herbizide in 00-Rapssorten einsetzbar sind, um sowohl schlagspezifische Behandlungsvarianten zu ermöglichen als auch den Selektionsdruck durch Wirkstoffwechsel zu mindern.

5.3 Ökologische Aspekte

Die Resistenzzüchtung stellt eine Möglichkeit dar, die Anwendungsbereiche von ökologisch weniger kritischen Wirkstoffen stark auszuweiten und auf bedenkliche Aktivsubstanzen zu verzichten. Dieser Weg führt vermutlich in kürzerer Zeit als das traditionelle Herbizidscreening mit den beiden Zielgrößen Wirksamkeit und Verträglichkeit zu einer Einschränkung des Einsatzes kritischer Chemikalien.

Darüber hinaus sind auch indirekte positive Wirkungen zu erwarten. So verbessert eine Resistenz gegen bisher nicht-selektive Herbizide die Voraussetzungen für die konservierende Bodenbearbeitung, weil die Bekämpfung der „Altverunkrautung“ (überständige Pflanzen) und der perennierenden Arten einfacher wird.

Nachauflaufbehandlungen sind gegenüber Voraufaufbehandlungen ökologisch grundsätzlich positiv zu bewerten, insbesondere wenn die Resistenz einen noch späteren Nachauflauftermin als bisher erlaubt. Dadurch verbleibt das Unkraut länger im Bestand und es kann regulierend auf den Nährstoff-, Wasser- und Wärmehaushalt des Bodens sowie die Populationen von Schädlingen und Nützlingen einwirken. Nicht zuletzt begünstigen spätere Anwendungstermine das Schadensschwellenkonzept, da sich die Sicherheit der Schadensprognose durch die Verkürzung des Zeitraums zwischen Bekämpfungsentscheidung und Schadenseintritt erhöht.

Der Argumentation von HERZFELD et al., 1985, „die Verlängerung und Intensivierung der Herbizidstrategie durch die Schaffung herbizidresistenter Kulturpflanzen würde die gesamte (Unkraut-)Samenbank im Ackerboden endgültig vernichten“, kann nicht generell gefolgt werden. In bezug auf die heute bereits seltenen Arten würde die Resistenzzüchtung keine wesentlich neuen Begrenzungsfaktoren schaffen, da diese Arten durch die veränderten agrotechnischen Maßnahmen insgesamt und weniger durch die Herbizidanwendung allein zurückgedrängt wurden (EGGERS, 1984). Bei den Problemunkräutern des Ackerbaus ist hingegen statt einer Abnahme eher noch mit einer Zunahme einzelner Arten zu rechnen, wie es die Vergangenheit der „Herbizidstrategie“ gezeigt hat (GARBURG, 1977, 1988 a). Schließlich sind keine deutlichen Anzeichen dafür zu erkennen, daß es durch die Resistenzzüchtung zu einer „Intensivierung“ des Herbizideinsatzes pro Flächeneinheit kommen würde (s. Kap. 5.1), daß sie ihn verstetigt, unterliegt dagegen keinem Zweifel. Auf die generelle ökologische Problematik, die mit der Freisetzung von genetisch veränderten Pflanzen verbunden sein kann (HAUPTLI et al., 1985), wird einem weiteren Beitrag (EGGERS, in Vorbereitung) eingegangen werden.

5.4 Volkswirtschaftliche und soziale Aspekte

Die breite Anwendung von Innovationen hat, insbesondere wenn ihnen der Rang von Schlüsseltechnologien zukommt, weitreichende Folgewirkungen (BUCHHOLZ et al., 1985). Im Falle des hier zu behandelnden Angebots von herbizidresistenten Sorten wird vielfach davon ausgegangen, daß es aufgrund der erheblichen Infrastrukturaufwendungen und der programmspezifischen Kosten zu monopolisierten Anbieterstrukturen kommen wird und zu Auswirkungen auf die Qualifikationsanforderungen für die in diesem Bereich Tätigen (AMMON et al., 1987).

In Abhängigkeit von den gewachsenen Anbieterstrukturen und durch die sich gegenwärtig in dieser Branche vollziehenden organisatorischen Veränderungen in Form von Fusionen, vertraglichen Bindungen und Beteiligungen (ANONYM, 1987) kann ein Komplementärangebot fallweise die Position des Herbizid- oder die des Saatgut anbietenden am Markt stärken.

Durch eine Abkehr von der traditionellen, kostenintensiven Herbizidentwicklung kann der Herbizidpreis tendenziell fallen, sofern ein Minimum an Wettbewerb unter den Anbietern gewährleistet ist. Der Herbizidmarkt wird sich auch von einem Spezialitäten- zu einem Massengeschäft wandeln. Gewinneinbußen auf dem Herbizidsektor lassen sich evtl. über den Saatgutsektor durch Komplementärangebote kompensieren (GOODMAN, 1987). Diese Art der Preisgestaltung wirkt sich

für den Landwirt so lange nicht ökonomisch nachteilig aus, wie die Kosten nicht komplementär gebundener, gleichwertiger Sorten-Herbizid-Kombinationen nicht überschritten werden. Durch eigene Saatguterzeugung (bei Getreide) ließe sich die Wirtschaftlichkeit sogar noch weiter steigern.

Inwieweit die Züchtung auf Herbizidresistenz, neben anderen Determinanten, den Wandel in der Agrarstruktur nachhaltig zu beeinflussen vermag, ist schwierig abzuschätzen. Komplementärangebote werden sich langfristig nur durchsetzen können, wenn sie ökonomische Vorteile bieten. Die damit ausgelöste Senkung der Produktionskosten kann kurzfristig zur Verbesserung der wirtschaftlichen Situation landwirtschaftlicher Unternehmen beitragen. Bei anhaltendem Preisdruck auf den Produktmärkten werden aber die Erzeugerpreise weiter nachgeben müssen, und der Konzentrationsprozeß wird sich, mit sozialen Härten für die Betroffenen, auch unter veränderten Produktionsbedingungen fortsetzen.

5.5 Aspekte der Zulassung von Herbiziden

Pflanzenschutzmittel dürfen nur in den Verkehr gebracht oder eingeführt werden, wenn sie von der Biologischen Bundesanstalt (BBA) zugelassen sind (§ 11 Abs. 1 PflSchG). Die Zulassung ist zu beantragen und sie wird erteilt, wenn das Pflanzenschutzmittel die gesetzlich in § 15 des Gesetzes festgesetzten Normen erfüllt (WOLF, 1983; VOSS, 1986; MARTIN, 1988). Die Zulassung kann mit Auflagen verbunden sein. Beispielsweise kann die BBA fordern, daß in die Gebrauchsanleitung für ein Herbizid die Sorten von Kulturpflanzenarten aufzunehmen sind, für die der jeweilige Mittelaufwand verträglich ist (Positivliste). In Tabelle 2 sind einige Herbizide aufgeführt, deren Gebrauchsanleitungen Positivlisten enthalten. Die Sortenfrage wird demnach im Zulassungsverfahren prinzipiell bereits berücksichtigt. Bei speziell auf Herbizidresistenz gezüchteten Sorten würde die Verträglichkeit in gleicher Weise wie bisher geprüft und beurteilt werden. Eine Notwendigkeit für darüber hinausgehende Prüfungen wird derzeit nicht gesehen.

Von einigen Autoren wird ein besonderes Risiko darin gesehen, daß der Landwirt bei herbizidresistenten Sorten den bei der Zulassung vorgesehenen Mittelaufwand überschreiten und den Anwendungstermin hinausschieben könnte, weil ein Phytotoxizitätsrisiko nicht mehr besteht (s. auch Kap. 5.1). Dadurch kann sich nach SANDERMANN (1984) die Rückstandssituation quantitativ und qualitativ (Konjugatbildung) verändern. SANDERMANN fordert daher, das Zulassungsverfahren auf diese seiner Ansicht nach spezielle Problematik bei genetisch veränderten Pflanzen mit Herbizidresistenz hin auszuweiten. Dazu ist festzustellen, daß im Zulassungsverfahren alle beantragten Indikationen, d. h. auch Abweichungen von den bisher aus Phytotoxizitätsgründen möglichen Anwendungsterminen, auch hinsichtlich ihrer „schädlichen Auswirkungen auf die Gesundheit von Mensch und Tier und das Grundwasser“ zu prüfen und zu beurteilen sind (§ 15 Abs. 1 PflSchG). Der bei der Zulassung vorgesehene Mittelaufwand und die Anwendungstermine gehen in die Gebrauchsanleitung ein, deren Einhaltung zu den anerkannten Regeln der guten fachlichen Praxis zählt (RESCHKE et al., 1987). Im übrigen könnte die BBA von den Bestimmungen des § 15 Abs. 3 PflSchG Gebrauch machen, indem sie für derartige Fälle vorschreibt, in der Gebrauchsanleitung anzugeben, daß die Anwendung eines höheren als bei der Zulassung vorgesehenen Mittelaufwandes bußgeldbewehrt ist. Ein Regulativ für den Mittelaufwand ist darüber hinaus der Herbizidpreis. Selbst wenn dieser im Rahmen eines Komplementärangebots relativ niedrig sein sollte, wird es das Bestreben des ökonomisch handelnden Landwirts sein, diesen Vorteil zu nutzen

und die Unkrautbekämpfung so kostengünstig wie möglich, d. h. mit dem geringsten Aufwand durchzuführen.

Die Frage der Zulassung von transgenen Sorten, die evtl. aufgrund veränderter Inhaltsstoffe ein Gefahrenpotential für Mensch oder Tier darstellen könnten, fällt in den Zuständigkeitsbereich des Bundessortenamtes und wird nach dem Saatgutverkehrsgesetz geregelt.

6. Einschätzung der weiteren Entwicklung

In den Diskussionen über den Nutzen einer Züchtung auf Herbizidresistenz wird vielfach von den Verhältnissen auf dem nordamerikanischen Kontinent ausgegangen. Dort sind es vor allem drei Bereiche, für die man sich eine Lösung durch den Züchtungsansatz verspricht: die durch die Persistenz von Atrazin bedingten Restriktionen in der Fruchtwahl nach Mais, unzureichend gelöste Unkrautprobleme in bedeutenden Kulturen (z. B. Raps) und bei der konservierenden Bodenbearbeitung. Schließlich besteht ein generelles Interesse an einer Ausweitung der Nachaufauffindungen. Bei uns sind diese Probleme weniger gravierend. Darüber hinaus ist mit Indikationen in Nordamerika ein wesentlich größeres Marktvolumen verbunden, so daß auch für Innovationen ein entsprechend größerer wirtschaftlicher Anreiz besteht. Die Zahl der Lückenindikationen wird vermutlich weder in den USA noch bei uns durch den Züchtungsansatz abnehmen.

Die bedeutenden landwirtschaftlichen Kulturen der Bundesrepublik Deutschland sind Getreide, Mais, Kartoffeln, Zuckerrüben und Raps. Für sie steht eine Vielzahl von herbiziden Wirkstoffen zur Verfügung, um Behandlungen flexibel den standörtlichen Unkrautspektren anpassen zu können. Während bei einigen Indikationen die Zahl der Behandlungsalternativen nahezu unübersehbar ist (z. B. dikotyle Unkräuter in Getreide), reduziert sie sich bei anderen auf einen oder wenige Wirkstoffe (z. B. *Galium aparine* und *Cirsium arvense* in Zuckerrüben).

Selektierte Problemunkräuter (z. B. *Aethusa cynapium* oder *Bidens tripartita*) lassen sich oft mit Neukombinationen vorhandener Wirkstoffe, veränderten Applikationsterminen und/oder wirkungserhöhenden Zusätzen zur Spritzflüssigkeit bekämpfen (GARBURG, 1988 b). Auch läßt sich die chemische Unkrautbekämpfung bei konservierender Bodenbearbeitung grundsätzlich mit den vorhandenen Wirkstoffen lösen, wenn gleich mit erheblichem Wirkstoff- und Kostenaufwand und einem umfassenden Spezialwissen des Landwirts.

Obwohl somit bei uns keine zwingende Notwendigkeit zur Züchtung auf Herbizidresistenz gesehen wird, ist einzuräumen, daß dieser Ansatz sektorale Vorteile z. B. bei der Handhabung der chemischen Unkrautbekämpfung, bei der Entlastung der Umwelt und bei der Wirtschaftlichkeit der Pflanzenproduktion zur Folge haben könnte. Er muß sich allerdings gegen Verfahren durchsetzen, die bereits technisch sehr hoch entwickelt, flexibel anwendbar und relativ kostengünstig sind. Langfristig sind Innovationen in diesem Sektor aber keineswegs ausgeschlossen.

Neue Technologien sollen dazu geeignet sein, bestehende Probleme zu lösen, ohne neue zu schaffen (GOODMAN, 1987). Die zu erwartenden Probleme mit herbizidresistenten Sorten werden im Prinzip den bisherigen mit der chemischen Unkrautbekämpfung vergleichbar sein, sie können allerdings in verschärfter Form auftreten (z. B. inter- und intraspezifische Selektionen). Diese Risiken müssen erkannt, analysiert und beherrscht werden. Prognosemodelle können hierbei hilfreich sein (MARSHALL, 1987).

Tab. 4. Einige mögliche künftige Einflußgrößen auf Art und Intensität der Unkrautbekämpfung

| Rahmenbedingungen | Pflanzenbau | Herbologie |
|--|--|---|
| Produktpreise Faktorpreise Extensivierungsmaßnahmen administrative Restriktionen beim Faktoreinsatz | Primärbodenbearbeitung Saattechnik Düngetechnik Düngeniveau Züchtungsfortschritt neue Kulturen Untersaaten | neue Wirkstoffe neue Formulierungen neue Herstellungsverfahren neue Applikationstechniken Antidots Synergisten Sensibilisierung durch Vorbehandlungen mechanische Unkrautbekämpfung Mycoherbizide |

Die Enquete-Kommission „Chancen und Risiken der Gentechnologie“ des Deutschen Bundestages bezieht hierzu wie folgt Stellung: „Mögliche negative Umweltwirkungen des Einsatzes der Gentechnologie in der Pflanzenproduktion sind zu vermeiden . . . Eine Entwicklung von Herbiziden und herbizidresistenten Pflanzen, die möglichst geringe toxische und ökologische Auswirkungen haben (ist) anzuregen und zu fördern“. Als Kriterium für ökologische und toxikologische Überlegenheit eines Mittels wird z. B. eine geringe Halbwertszeit genannt (ANONYM, 1986).

Bei Auseinandersetzungen mit den Risiken der chemischen Unkrautbekämpfung darf aber nicht übersehen werden, daß Unkrautprobleme die Folge bestimmter Produktionstechniken (Fruchtfolge, Anbautechnik, Düngeniveau etc.) sind. Grundsätzliche Problemlösungen können daher immer nur von integrierten Bekämpfungsansätzen unter Einbeziehung aller agrotechnischen Maßnahmen erwartet werden.

Jede einseitige Ausrichtung der Pflanzenproduktion auf wenige Sorten und Herbizide, die zudem komplementär aneinander gebunden sind, kann ein extremes Risikopotential darstellen, weil

- eine Sorte oder mehrere genetisch nahestehende Sorten durch das epidemieartige Auftreten neuer Erreger oder Erregerrassen „zusammenbrechen“ können,
- ein Herbizid nach Resistenzbildung der Unkräuter oder Nichterneuerung der Zulassung aufgrund neuer Erkenntnisse über die Eigenschaften des Wirkstoffs nicht länger anwendbar ist,
- die Lückenindikationen zunehmen können.

Alle Beteiligten müssen ein Interesse daran haben, diese Risiken durch ein Mindestmaß an Diversität zu reduzieren. Unter dem Eindruck der Epidemien von *Helminthosporium maydis* Anfang der 70er Jahre in den USA, deren Hauptsache die cytoplasmatische Uniformität der Sorten war, forderte bereits ULLSTRUP, (1972) „Diversity must be maintained in both the genetic and cytoplasmic constitution of all important crop species.“ Diese Forderung ist heute in Anbetracht neuer züchterischer Möglichkeiten berechtigter denn je.

Auf dem Herbizidsektor kann ein Minimum an Vielfalt gewahrt werden, wenn sichergestellt ist, daß neben dem Komplementärherbizid mindestens ein weiteres, gleichwertiges in einer bestimmten Sorte einsetzbar ist (FAULKNER, 1982) und daß die Anzahl der gegen ein bestimmtes Herbizid resistenten Sorten begrenzt ist. Als generelle Richtschnur für das weitere Vorgehen kann ein Zitat aus GOODMAN (1987) gelten: „We must keep available all the tools we have ever had, including the hoe, while we continue searching for new and better answers“.

Aus heutiger Sicht wird dem Züchtungsansatz zur Lösung von Unkrautproblemen unter folgenden Voraussetzungen eine Chance eingeräumt:

- konkurrenzschwache Kultur,
- mehrere Behandlungen, hohe Kosten/ha

- marginale Selektivität,
- Lücken bei der Wirksamkeit,
- ökologisch sehr bedenkliche Wirkstoffe,
- keine eigene Saatguterzeugung möglich.

Ein Großteil dieser Voraussetzungen trifft auf die Zuckerrübe, speziell bei konservierender Bodenbearbeitung, zu.

Geringe Chancen werden unter folgenden Voraussetzungen gesehen:

- konkurrenzstarke Kultur,
- wenige kostengünstige Behandlungen,
- geringe Selektivitätsprobleme,
- hinreichende Wirksamkeit,
- ökologisch unbedenklichere Wirkstoffe,
- eigene Saatguterzeugung möglich.

Diese Gesichtspunkte treffen in vielen Fällen auf Getreide zu.

Eine Befragung von Fachleuten in den USA nach den Prioritäten der Unkrautforschung hat kürzlich ergeben, daß der Züchtung auf Herbizidresistenz nur eine vergleichsweise geringe Bedeutung zuerkannt wird. Im Vordergrund des aktuellen Interesses stehen vielmehr andere Probleme, die es zu lösen gilt, beispielsweise die Grundwasserkontamination mit bestimmten Herbiziden (McWHORTER und BARRENTINE, 1988). In naher Zukunft werden Sorten mit Herbizidresistenz vermutlich nur in Gebieten mit besonderen Unkrautproblemen, die ausschließlich mit dem jeweiligen Komplementärherbizid zu lösen sind, angebaut werden (PIMENTEL, 1987).

Durch weitere Fortschritte in der Gentechnik könnte aber das Transferieren von Herbizidresistenz bald zur Routine werden und eine bedeutende Ergänzung zum traditionellen Screening darstellen. Daneben werden Art und Umfang der zukünftigen Unkrautbekämpfung aber auch von zahlreichen weiteren Faktoren bestimmt (Tab. 4), so daß Vorhersagen über die langfristigen Chancen von sektoralen Innovationen kaum zu machen sind. Grundsätzlich sollten Weiterentwicklungen im Bereich der Unkrautbekämpfung die Zahl der „Freiheitsgrade“ möglichst erhöhen und sie nicht weiter einschränken.

Literatur

- ALBRECHT, J., 1988: Grauer Alltag im Genlabor. ZEITmagazin, Heft Nr. 11, 36.
- AMMON, U., E. WITZGALL und G. PETER, 1987: Auswirkungen gentechnischer Verfahren und Produkte auf Profuktionsstruktur, Arbeitsplätze und Qualifikationserfordernisse. Deutscher Bundestag, 10. Wahlperiode, Drucksache 10/6775, 2475–2615.
- ANONYM, 1986: Anwendungsbereiche der Gentechnologie. Deutscher Bundestag, 10. Wahlperiode, Drucksache 10/6775, VII–XXIV.
- ANONYM, 1987 a: Sortenempfehlungen für die Aussaat 1987. top agrar, Heft 10, 49–53.
- ANONYM, 1987 b: When the chemists think „seeds“. Cultivar 2000, 53–54.
- BARTELS, J., 1984: Pflanzenschutz im intensiven Weizenbau. Auswer-

- tungen schlagspezifischer Fragebögen des Beratungsringes „Ackerbau Südhannover e.V.“ aus den Jahren 1973–1982 und Versuche zur praktischen Anwendung und ökonomischen Bedeutung von Schadensschwellen für Unkräuter, Mehltau und Blattläuse. Dissertation Göttingen.
- BEVERSDORF, W. D. und L. S. KOTT, 1987: Development of triazine resistance in crops by classical plant breeding. *Weed Sci.* **35** (Suppl. 1), 9–11.
- BÖTTGER, W., W. DENEKE und J. MEYER, 1983: Wie wirtschaftlich ist intensiver Pflanzenschutz in Winterweizen? *Gesunde Pflanzen* **35**, 154–164.
- BUCHHOLZ, K., B. GÖRLITZ, F. HERZFELD, V. KASCHE, M. KIPER und W. v. D. DAELE, 1985: Technischer Fortschritt und fortschrittliche Technik: Wie nützlich ist die Gentechnologie? Materialien der Studiengruppe „Gesellschaftliche Folgen neuer Biotechniken“ der Vereinigung deutscher Wissenschaftler e. V.
- CHALEFF, R. S., 1986: Herbicide resistance. 1986 BCPC Mono. No. 34, Biotechnology and Crop Improvement and Protection, 111–121.
- ECKES, P., G. DONN und F. WENGENMAYER, 1987: Gentechnik mit Pflanzen. *Angew. Chem.* **99**, 392–412.
- EGGERS, Th., 1984: Wandel der Unkrautvegetation der Äcker. *Schweiz. Landw. Fo.* **23**, 47–60.
- FAULKNER, J. S., 1982: Breeding herbicide-tolerant crop cultivars by conventional methods. In: *Herbicide Resistance in Plants*, H. M. LEBARON und J. GRESSEL (Eds.), New York: John Wiley, 235–256.
- FEDTKE, C., 1985: Einsatzmöglichkeiten und Wirkungsweise von Herbizid-Antidots. *Z. Pflanzenkrankh. Pflanzensch.* **92**, 654–664.
- FRALEY, R., G. KISHORE, C. GASSER, S. PADGETTE, R. HORSCH, S. ROGERS, G. DELLA-CIOPPA und D. SHAH, 1987: Genetically engineered herbicide tolerance – Technical and commercial considerations. 1987 Brit. Crop Protect. Conf.-Weeds, 463–471.
- GARBURG, W., 1977: Ackerstiefmütterchen und Ackersteinsame, beachtenswerte Unkräuter! *Hann. Land-Forstwirtschaft. Ztg.* **131**, 6–8.
- GARBURG, W., 1987 a: Gezielte Nachauflaufspritzungen können die Kosten halbieren. *top agrar*, Heft 1/87, 117–118.
- GARBURG, W., 1987 b: Unkrautbekämpfung in Zuckerrüben im Wandel. *Gesunde Pflanzen* **39**, 99–106.
- GARBURG, W., 1988 a: Die Leitverunkrautung schichtet sich um. *Pflanzenschutz-Praxis*, Heft 1/88, 6–10.
- GARBURG, W., 1988 b: Der gezielte Nachauflauf-Einsatz hat sich bewährt. *Hann. Land-Forstwirtschaft. Ztg.* **141**, 21–24.
- GÖBBEL, T., 1981: Einkommensreserven in der Pflanzenproduktion. *Agrar-Übersicht*, Heft 12/81, 30–34.
- GOODMAN, R. M., 1987: Future potential, problems, and practicalities of herbicide-tolerant crops from genetic engineering. *Weed Sci.* **35** (Suppl. 1), 28–31.
- HAUPTLI, H., N. NEWELL und R. M., GOODMAN, 1985: Genetically engineered plants: Environmental issues. *Bio/Technology* **3**, 437–442.
- HERZFELD, F., B.-D. GÖRLITZ und M. KIPER, 1985: Gentechnologie in der Landwirtschaft. *Naturwissenschaften* **72**, 582–590.
- HÖSEL, W. und W. RUPPERT, 1986: Die Entwicklung der Kosten im chemischen Pflanzenschutz. *Schule u. Beratung*, Heft 12/II, 11–16.
- KEMP, M. S. und J. C. CASELEY, 1987: Synergistic effects of 1-aminobenzotriazole on the phytotoxicity of chlorotoluron and isoproturon in a resistant population of black-grass (*Alopecurus myosuroides*). 1987 Brit. Crop Protect. Conf.-Weeds, 895–899.
- KRAUS, P., 1985: Die Biotechnologie in der Pflanzenforschung. *Presse-Seminar „Forschungsschwerpunkte bei Bayer“* in Grosseledder vom 09.–11. 09. 1985, 29–39.
- KUCKUCK, H., G. KOBABE und G. WENZEL, 1985: Grundzüge der Pflanzenzüchtung. 5. Aufl., Berlin und New York: W. de Gruyter.
- KUHLMANN, F., 1984: Zur Ökonomie des Pflanzenschutzes. *Mitt. Biol. Bundesanst. Land-Forstwirtschaft. Berlin-Dahlem*, Heft 223, 45.
- LEBARON, H. M., 1987: Introduction. *Weed Sci.* **35** (Suppl. 1), 2–3.
- LEEMANS, J., M. DE BLOCK, K. D. HALLUIN, J. BOTTERMAN und W. DE GREEF, 1987: The use of glufosinate as a selective herbicide on genetically engineered resistant tobacco plants. 1987 Brit. Crop Protect. Conf.-Weeds, 867–870.
- MARSHALL, G., 1987: Implications of herbicide-tolerant cultivars and herbicide-resistant weeds for weed control management. 1987 Brit. Crop Protect. Conf.-Weeds, 489–498.
- MARTIN, J., 1982: „Zusatzstoffe“ im Pflanzenschutz. *Gesunde Pflanzen* **34**, 257–262.
- MARTIN, J., 1988: Pflanzenschutz unter veränderten ökonomischen und ökologischen Bedingungen. *Gesunde Pflanzen* **40**, 97–104.
- McWHORTER, C. G. und W. L. BARRENTINE, 1988: Research priorities in Weed Science. *Weed Technology* **2**, 2–11.
- MERKELBACH, H. und K.-U. HEYLAND, 1988: Unkrautunterdrückung durch Untersaaten im Winterweizen und deren Auswirkung auf Ertrag und Verunkrautung der Folgekulturen Wintergerste und Zuckerrüben. *Z. PflKrankh. PflSchutz. Sonderh.* **XI**, 313–321.
- MÜLLER, Th., J. GRAS und R. JACOB, 1987: Das trojanische Gen. *Kosmos* **83**, 76–81.
- NETZER, W. J., 1984: Engineering herbicide tolerance: When is it worthwhile? *Bio/Technology* **2**, 939–944.
- Pflanzenschutzgesetz vom 15. September 1986. *Bundesgesetzblatt I*, 1986, 1505–1519.
- PIMENTEL, D., 1987: Down on the farm: Genetic engineering meets ecology. *Technology Rev.*, January 1987, 24–30.
- RESCHKE, M., H. BÖTGER und F. O. RIPKE, 1987: „Gute fachliche Praxis“ im Pflanzenschutz. *Gesunde Pflanzen* **39**, 497–509.
- SANDERMANN, H., 1984: Herbicide resistance through gene transfer? Biochemical and toxicological aspects. 35. Colloquium – Mosbach, The Impact of Gene Transfer Technique in Eukaryotic Cell Biology, 167–179.
- SCHUPHAN, I., 1987: Herbizidresistente Unkräuter und Kulturpflanzen, Risiko und Nutzen. *Nachrichtenbl. Deut. Pflanzenschutzd. (Braunschweig)* **39**, 135–137.
- SHANER, D. und T. MALEFYT, 1985: Herbicide resistant maize through cell culture selection. 1985 BCPC Mono. No. 32, Biotechnology and its Application to Agriculture, 45–50.
- SOUZA MACHADO, V. und D. J. HUME, 1987: Breeding herbicide-tolerant cultivars – a Canadian experience. 1987 Brit. Crop Protect. Conf.-Weeds, 473–477.
- STEPHENSON, G. R. und G. EZRA, 1987: Chemical approaches for improving herbicide selectivity and crop tolerance. *Weed Sci.* **35** (Suppl. 1), 24–27.
- STUKE, F. und H. FEHRMANN, 1987: Sortenmischungen im Weizenanbau. *Nachrichtenbl. Deut. Pflanzenschutzd. (Braunschweig)* **39**, 53–57.
- SUN, M., 1986: Engineering crops to resist weed killers. *Science* **231**, 1360–1361.
- THOMPSON, G. A., W. R. HIATT, D. FACIOTTI, D. M. STALKER und L. COMAI, 1987: Expression in plants of a bacterial gene coding for glyphosate resistance. *Weed Sci.* **35** (Suppl. 1), 19–23.
- TRÄNKNER, A. und H. C. WELTZIEN, 1986: Mehrjährige Ergebnisse zur Schaderregerentwicklung in einem Roggen-Weizengemisch. *Mitt. Biol. Bundesanst. Land-Forstwirtschaft. Berlin-Dahlem*, Heft 232, 124.
- ULLSTRUP, A. J., 1972: The impacts of the Southern Corn Leaf Blight epidemics of 1970–1971. *Ann. Rev. Phytopathol.* **10**, 37–50.
- VOSS, Th., 1986: Forderungen des neuen Pflanzenschutzgesetzes an die Zulassung von Pflanzenschutzmitteln. *Mitt. Biol. Bundesanst. Land-Forstwirtschaft. Berlin-Dahlem*, Heft 232, 43–56.
- WOLF, E., 1983: Die Prüfung und Zulassung von Pflanzenschutzmitteln. *Mitt. Biol. Bundesanst. Land-Forstwirtschaft. Berlin-Dahlem*, Heft 216, 7–49.