

DPG Spectrum Phytomedizin

A. VON TIEDEMANN, R. HEITEFUSS, F. FELDMANN (HRSG.)

Pflanzenproduktion im Wandel – Wandel im Pflanzenschutz

Themenschwerpunkt der 56. Deutschen Pflanzenschutztagung 2008 in Kiel



Selbstverlag

Bibliografische Information der Deutschen Bibliothek

Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; Detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.ddb.de> abrufbar.

ISBN: 978-3-941261-00-6

Das Werk einschließlich aller Teile ist urheberrechtlich geschützt.

Jede Verwertung außerhalb der engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes ist ohne Zustimmung der Deutschen Phytomedizinischen Gesellschaft e.V. unzulässig und strafbar. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

© 2008 DPG Selbstverlag

Messeweg 11-12, 38104 Braunschweig

Email: geschaeftsstelle@phytomedizin.org

Internet: www.phytomedizin.org

Lektorat: Dr. Falko Feldmann, DPG, Braunschweig

Herstellung: Dr. C. Carstensen, InterKulturIntern, Edenkoben

Design: C. Senftleben, Net55, Braunschweig

Fotos Umschlagseite: Feldmann, Ganzelmeier, Wohlers, JKI/DPG, Braunschweig

Druck: Lebenshilfe Braunschweig gGmbH

Printed in Germany

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	3
Vorwort	4
Globale Agrarmärkte und lokale Produktionssysteme B Brümmer.....	6
Anpassung der Pflanzenproduktion an den steigenden Bedarf an Nahrungsmitteln und Energierohstoffen A Vetter.....	16
Pflanzenproduktion bei steigenden Qualitätsanforderungen E Pawelzik, L Theuvsen.....	32
Pflanzenproduktion und Biodiversität – Miteinander oder Gegensatz? H-H Steinmann, B Gerowitt.....	45
Langfristige Trends und Anpassung der Anbausysteme an den Klimawandel O Christen	57
Anpassungen der speziellen Intensität der Bodennutzung an veränderte Rahmenbedingungen für die Pflanzenproduktion F Kuhlmann.....	65
Verändertes Auftreten von Krankheiten und Schädlingen durch Klimaschwankungen A von Tiedemann, B Ulber	79
Pflanzenzüchterische Möglichkeiten der Anpassung von Nutzpflanzen an zukünftige Produktionsbedingungen F Ordon	80
Innovative Perspektiven durch Biotechnologie – Einsatz gentechnischer Methoden zur Verbesserung der Kulturpflanzenresistenz D Stahl, K Schmidt, R Nehls, J Moeser, M Varrelmann, D Scheel.....	103
Resistenzmanagement zur Erhaltung der Wirksamkeit von Pflanzenschutzmitteln in der Praxis - am Beispiel der Fungizide A Mehl, K Stenzel.....	122
Innovationen in der Applikationstechnik H Ganzelmeier, H Nordmeyer	138
Ökonomischer und gezielter Einsatz von Pflanzenschutzmitteln E Jörg, M Bartels.....	150

Vorwort

Im Laufe der Jahrhunderte hat die Landwirtschaft immer wieder entscheidende Impulse und Veränderungen erfahren. Meilensteine wie die Einführung des Fruchtwechsels oder der Mineraldüngung haben den Wandel in der Pflanzenproduktion in der Vergangenheit gekennzeichnet. Im 20. Jahrhundert hat der technische und biologische Fortschritt in der Agrarwirtschaft einen bis dahin kaum denkbaren Produktivitätszuwachs ermöglicht.

Wenn wir heute, in der ersten Dekade des 21. Jahrhunderts, wiederum vom Wandel in der Landwirtschaft und speziell in der Pflanzenproduktion sprechen, so sind es vor allem globale Einflussfaktoren, die dabei ursächlich von Bedeutung sind. Diese Einflüsse schlagen auch auf den Pflanzenschutz durch, der sich dem Wandel stellen muss und sich dabei neuen und steigenden Anforderungen gegenüber sieht.

In dieser ersten Ausgabe von „Spektrum Phytomedizin“, der neuen Schriftenreihe der DPG, zeigen kompetente Autoren mit ihren Beiträgen das komplexe Wirkungsgefüge auf, welches den aktuellen Wandel in der Pflanzenproduktion bestimmt und versuchen, Antworten zu geben, wie der Pflanzenschutz den neuen Herausforderungen gerecht werden kann.

Im ersten Teil „Pflanzenproduktion im Wandel“ wird das Spannungsfeld beleuchtet, in dem die Pflanzenproduktion derzeit steht. Wichtige Schlagwörter sind hier die globale Ernährungskrise und der Klimawandel. Die Globalisierung in fast allen Sektoren der Wirtschaft und des täglichen Lebens führt zu einschneidenden Folgen auch in der Landwirtschaft. Angebot und Nachfrage im Verbund mit internationalen Handelsabkommen bestimmen weltweit die Preise und Kosten und haben unmittelbare Konsequenzen für die nationale und regionale Produktion. Die Möglichkeiten der Produktion von nachwachsenden Rohstoffen und Energiepflanzen führt zu einer Kopplung der Nahrungsmittel- mit den Energiemärkten und verstärkt den Einfluß globaler Entwicklungen auf die Landwirtschaft noch weiter. Die Konkurrenz um die verfügbaren Flächen wächst. Die Reserven an landwirtschaftlich nutzbarer Produktionsfläche sind weltweit begrenzt. Um die weiter wachsende Weltbevölkerung bei steigenden Ansprüchen ausreichend zu ernähren, ist eine Intensivierung der Produktion an geeigneten Standorten unerlässlich.

Hier wird der Ertragssicherung durch geeignete Maßnahmen des Pflanzenschutzes eine entscheidende Rolle zukommen. Das gilt sowohl für vorbeugende Kulturmaßnahmen der Pflanzenhygiene, als auch besonders für einen gezielten und möglichst umweltfreundlichen chemischen Pflanzenschutz. Auch wenn die Anwendung chemischer Pflanzenschutzmittel in der EU und bei vielen Politikern immer kritischer gesehen wird und z.B. im Bereich der Zulassung derzeit neue Hürden aufgebaut werden, wird die Pflanzenproduktion auch in Zukunft auf dieses wichtige Produktionsmittel nicht verzichten können. Dabei geht es nicht nur um die Sicherstellung eines hohen Ertrags- und Qualitätsniveaus, sondern zunehmend auch um die Bereitstellung von Nahrungsmitteln zu annehmbaren Preisen. Welche vielfältigen Möglichkeiten

der Pflanzenschutz für die Lösung dieser großen Zukunftsaufgabe bereithält, wird im zweiten Teil „Wandel im Pflanzenschutz“ behandelt.

Ein weiterer Faktor, der die Landwirtschaft unmittelbar berührt, ist der Klimawandel. Wie wird sich dieser auf die agrarischen Produktionssysteme auswirken? Auch dazu gibt es verschiedene Szenarien, die in mehreren Beiträgen angesprochen werden. Mit den möglicherweise veränderten Anbausystemen wird sich auch das Auftreten von Schaderregern und deren Gegenspielern ändern und damit zu Konsequenzen für den Pflanzenschutz führen.

Die Landwirtschaft und besonders die Pflanzenproduktion wird sich diesen neuen und globalen Einflüssen stellen müssen. Der Pflanzenschutz in all seinen Teilbereichen wie Forschung, Industrie und Beratung ist gefordert, angemessene Lösungen zu entwickeln und sie dem Landwirt anzubieten.

Wir hoffen, mit dieser Ausgabe von „Spektrum Phytomedizin“ einen ausgewogenen Überblick zur gegenwärtigen Diskussion um den Wandel in der Landwirtschaft und die daraus folgenden Anforderungen an den Pflanzenschutz zu liefern. Ganz besonders danken wir den beteiligten Autoren für ihre engagierten und informativen Beiträge, mit denen diese Schrift möglich wurde.

Die Herausgeber

Göttingen u. Braunschweig im September 2008

Brümmer B: Globale Agrarmärkte und lokale Produktionssysteme. In: Tiedemann A v, Heitefuss R, Feldmann F (2008): Pflanzenproduktion im Wandel – Wandel im Pflanzenschutz, ISBN 978-3-941261-00-6; 6-15.
© Deutsche Phytomedizinische Gesellschaft, Braunschweig, Germany

Globale Agrarmärkte und lokale Produktionssysteme

B Brümmer

Universität Göttingen, Department für Agrarökonomie und Rurale Entwicklung

Lehrstuhl für Landwirtschaftliche Marktlehre

Platz der Göttinger Sieben 5, 37073 Göttingen; Email: bbruemm@gwdg.de

ZUSAMMENFASSUNG

Die globalen Agrarmärkte sind in der jüngsten Zeit von Dynamik und Volatilität geprägt, wenn auch mit großen Unterschieden zwischen den einzelnen Produkten. In der Zukunft werden die Agrarpreise sich voraussichtlich auf einem festeren Niveau als in den vergangenen zwei Dekaden bewegen, allerdings ist es unwahrscheinlich, dass das hohe Niveau vom Anfang des Jahres 2008 länger bestehen bleibt. Die Volatilität in den europäischen Agrarpreisen wird zunehmen, da die Integration der lokalen Agrarmärkte in die internationalen Märkte weiter zunehmen wird und die planwirtschaftlich gesetzten Agrarpreise der 80er und 90er Jahre zukünftig der Vergangenheit angehören werden.

Vor diesem Hintergrund werden Nutzungskonflikte zwischen Produktion von Agrar- und Umweltgütern, aber auch der Verwendung als Nahrungs- und Futtermittel oder als Energieträger bei den wichtigsten pflanzlichen Produkten tendenziell zunehmen. Lokale Produktionssysteme werden zukünftig besonders auf Flexibilität und geringe Anfälligkeit für Schwankungen ausgerichtet sein müssen, um Preisschwankungen besser abfedern zu können. Systemorientierte agrarwissenschaftliche Forschung, für die genügend private und öffentliche Investitionen getätigt werden müssen, wird der Schlüssel für die nachhaltige Sicherung der Welternährung sein.

EINLEITUNG

Die Entwicklungen auf den internationalen Agrarmärkten in den vergangenen Monaten waren durch eine bislang unbekannte Dynamik in den Preisen gekennzeichnet. Der Weizenpreis für amerikanischen Winterweizen, der immer noch als Eckpreis für die Weltagarmärkte

herangezogen werden kann, ist im Februar und März dieses Jahres kurzzeitig auf ein Niveau von über 520 \$/t angestiegen. Seit dieser Preisspitze hat sich der Preis bereits wieder deutlich nach unten bewegt, so ist der aktuelle Preis für US-amerikanischen Standardqualität HRW Nr. 2 FOB Golf von Mexico, aktuell nur noch bei 334 \$/t notiert (Stand 23.05.2008). Hier wird ein weiteres Merkmal der globalen Agrarmärkte deutlich, welches den internationalen Handel auch in den nächsten Jahren prägen wird, nämlich die im Vergleich zu den letzten Jahrzehnten gesteigerte Volatilität.

Dass Preise auf den internationalen Märkten geschwankt haben, ist allerdings kein ganz neues Phänomen. Der säkulare Trend auf den Weltagarmärkten war eine real nach unten gerichtete Preisbewegung, mit erheblichen Schwankungen um den Trend. Wirklich neu ist aber die Tatsache, dass die Preisschwankungen auch auf die in der Vergangenheit stark protektionierten Märkte insbesondere in den Industrienationen durchschlagen. Dies stellt eine neue Entwicklung dar, an welche sich Landwirtschaft und vor- und nachgelagerte Bereiche werden anpassen müssen. Die verstärkte Preistransmission von den internationalen Märkten auf die heimischen Märkte stellt zugleich Chance wie auch Herausforderung dar: Sie bietet die Chance, durch verbesserte Marktintegration und stärkere Berücksichtigung von Knappheitsrelationen auch auf bisher protektionierten Märkten zu einer gleichmäßigeren Entwicklung der weltweiten Versorgung mit Nahrungsmitteln beizutragen, ist aber auch eine Herausforderung, weil die lokalen Wertschöpfungsketten mit den Instrumenten zum Umgang mit diesen Schwankungen noch nicht hinreichend vertraut sind. Dies gilt für die landwirtschaftlichen Betriebe genauso wie für die vor- und nachgelagerten Bereiche. Somit ergeben sich auch aus der verstärkten Einwirkung internationaler Entwicklungen auf die lokalen Produktionssysteme neue Herausforderungen für Pflanzenbau und Pflanzenschutz.

Im Mittelpunkt dieses Beitrages steht daher die Darstellung der Interdependenzen zwischen globalisierten internationalen Agrarmärkten und den lokalen Produktionssystemen. Besonderes Augenmerk wird gerichtet auf die produktionstechnischen Herausforderungen, die sich aus meiner Sicht für künftige Produktionssysteme ergeben. Um mich dieser Fragestellung zu nähern, möchte ich den Beitrag wie folgt untergliedern. Im nächsten Abschnitt wird zunächst der allgemeine Trend der Globalisierung auf den Agrarmärkten anhand der wichtigsten pflanzlichen Produkte der gemäßigten Hemisphäre exemplifiziert. Der folgende Abschnitt wird einen Ausblick auf die zukünftige Entwicklung geben, so wie sie den heutigen Erwartungen der wichtigsten Prognoseinstitutionen entspricht. Im dann folgenden Teil werden die Auswirkungen für die Produktionssysteme im Pflanzenbau auf der lokalen Ebene, die sich aufgrund der geänderten ökonomischen Rahmenbedingungen in Zukunft wahrscheinlich stellen werden, erläutert. Der letzte Abschnitt enthält einige Empfehlungen und einen Ausblick, der den Beitrag beschließt.

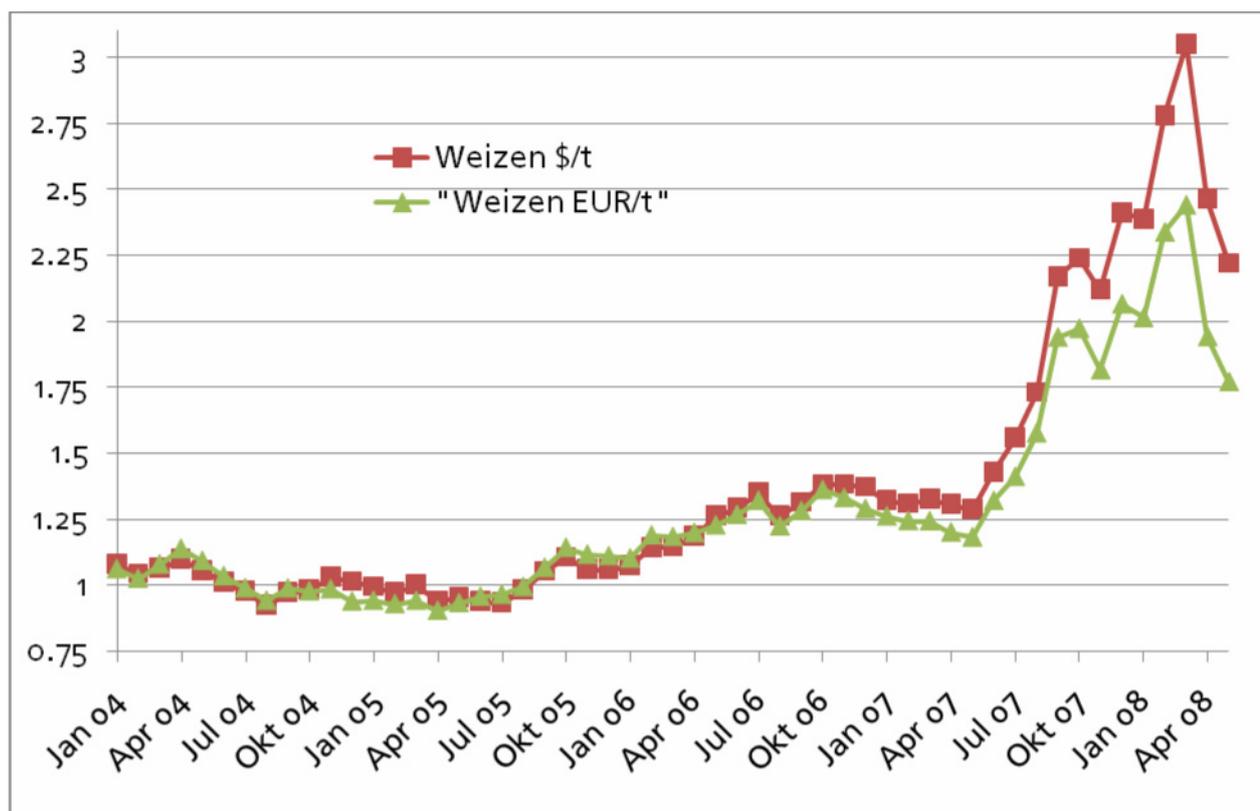


Schaubild 1 Preisentwicklung für Weizen, Durchschnitt des Jahres 2005=100

GLOBALISIERUNG AUF DEN WELTAGRARMÄRKTEN FÜR PFLANZLICHE PRODUKTE

Schaubild 1 stellt die Entwicklung der Weizenpreise fob Golf von Mexico in den vergangenen Monaten dar. Wie oben bereits angesprochen, waren weder eine solche Dynamik noch derart große Schwankungsbreiten dieser Preise in den letzten 50 Jahren zu beobachten (vielleicht mit Ausnahme der Ölkrise). Ursache dieser rasanten Preisbewegungen ist vor allem der geringe Lagerbestand, der zurzeit weltweit noch vorhanden ist. In den vergangenen Jahren (vgl. Schaubild 2) hat fast immer die globale Nachfrage nach Getreide das Angebot von Getreide international überschritten: Die durchgezogene Linie in der Mitte bewegt sich in fast allen Jahren unterhalb der Nulllinie, wobei negative Bestandsänderungen durch Minus-Symbole, positive entsprechend mit Plus-Symbolen gekennzeichnet sind. Die Wirtschaftsjahre sind hier jeweils von Juni bis Mai definiert, so dass das letzte dargestellte Wirtschaftsjahr, 2008/2009, die vor uns liegende Ernte dieses Jahres beinhaltet – es handelt sich bei den dargestellten Zahlen also um Vorausschätzungen, die z. B. wetterbedingt durchaus noch Schwankungen unterliegen können. Die Versorgungsdefizite in der Mehrzahl der Jahre haben dazu geführt, dass die Weltvorratsbestände auf ein historisches Tief, gemessen am Anteil des Verbrauchs, abgesunken sind: Ein Wert von 15,3% wie im just vergangenen Wirtschaftsjahr heißt, dass der Bestand gerade ausreicht, um den Verbrauch für knapp 8 Wochen zu decken. Geringe Lagerbestände (kleiner

20%) bedeuten dabei nicht nur, dass die Getreidepreise sich tendenziell nach oben bewegen, sondern auch, dass bereits geringe Veränderungen in den Prognosen über die Erntemengen wegen ihrer relativ starken Wirkungen auf die zu erwartenden Endlagerbestände des Folgejahres extreme Preisausschläge nach sich ziehen können, wie der Preisverlauf bei Weizen im Jahr 2008 bisher belegt. Auch die Preise für Reis und für Mais haben sich ähnlich entwickelt, bei Reis ist allerdings zu beachten, dass der international gehandelte Anteil der gesamten Produktion deutlich unterhalb von 7% liegt, so dass hier die internationalen Preise nicht unbedingt einen verlässlichen Indikator für die im jeweiligen Verbrauchsland geltenden Marktpreise darstellen.

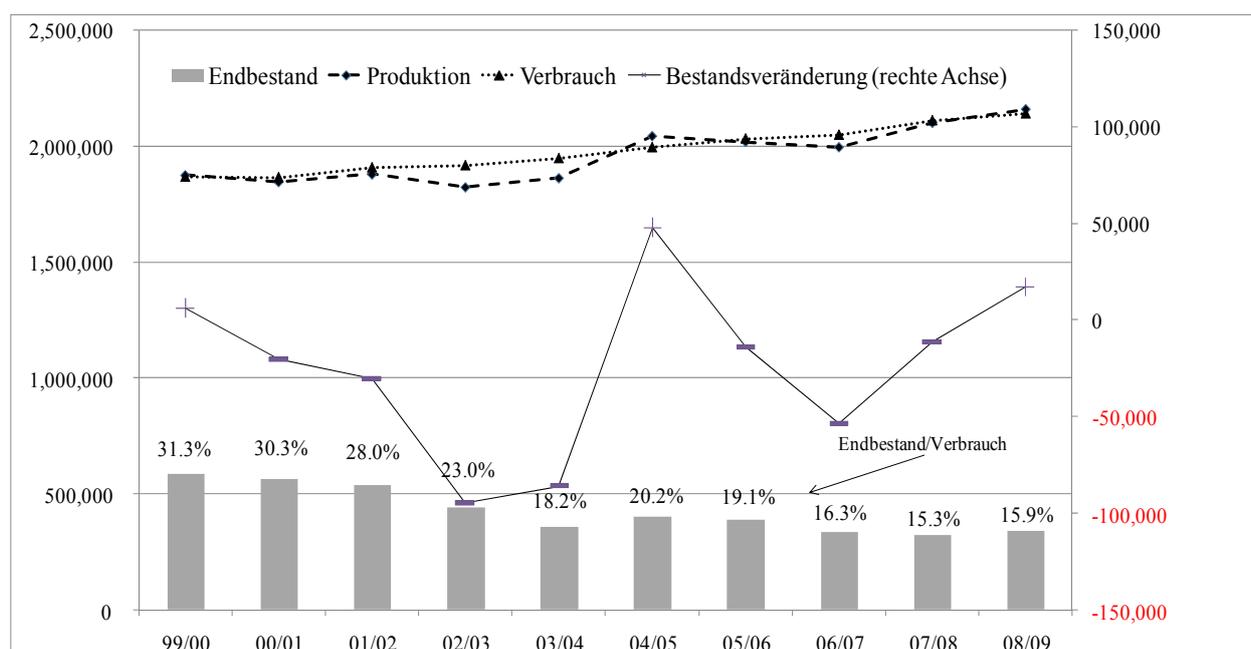


Schaubild 2 Produktion, Verbrauch und Bestand bei Getreide weltweit Wirtschaftsjahre 1999/2000 bis 2008/09. Quelle: USDA (2008).

Welche Faktoren sind nun verantwortlich für diese Verknappung in den Lagerbeständen, welche Faktoren haben also dazu geführt, dass die Nachfrage über das Angebot hinausgegangen ist? Hier sind an erster Stelle die internationalen Einkommensentwicklungen zu nennen. Der zunehmende Einkommensanstieg in Entwicklungs- und Schwellenländern, der in Hinblick auf die Armutsbekämpfung sehr zu begrüßen ist, hat bei der Nachfrage nach Getreide dazu geführt, dass zum einen eine direkte Zunahme zu verzeichnen ist, zum anderen aber auch ein indirekter Effekt über die verstärkte Verwendung von Getreide zur Erzeugung von tierischen Lebensmitteln, also über den Futtertrog zur Steigerung beigetragen hat. Als weiterer wichtiger Nachfragefaktor ist die in der Vergangenheit nicht vorhandene Nachfrage nach Bioenergie, insbesondere Biotreibstoffe, zu nennen. In den Vereinigten Staaten ist so die Maisverwendung in Bioethanol auf ein bislang unerreichtes Maß gestiegen. Das Besondere bei dieser neuen, überwiegend politisch generierten Nachfragekategorie ist darin zu sehen, dass durch die subventionierte Installation von Verarbeitungskapazitäten eine sehr preisunelastische Nachfrage geschaffen wurde. Das heißt, dass

diese Anlagen, wenn sie einmal in Betrieb sind, auch bei sehr hohen Preisen ihre volle Kapazität auszulasten trachten. Eine sehr unelastische Nachfrage heißt unter sonst gleichen Bedingungen, dass bei gegebenen Verschiebungen von Angebots- oder Nachfragekurven die Preisschwankungen größer werden.

Neben diesen Fundamentalfaktoren, die die Preisentwicklungen getrieben haben, ist aber auch die direkte Rolle der staatlichen Agrarpolitik nicht zu vernachlässigen. Es gab und gibt immer noch Angebotsbeschränkungen, z.B. die Flächenstilllegung in der Europäischen Union, die ja noch mit den Vorschlägen der EU-Kommission zum sog. Health Check abgeschafft werden sollen, oder Exportbeschränkungen, wie sie bspw. von den Schwarzmeeranrainerstaaten Russland, Ukraine und Kasachstan stark im vergangenen Wirtschaftsjahr eingesetzt wurden. Selbstverständlich tragen all diese Maßnahmen zu erhöhter Volatilität in den internationalen Preisen bei.

Für Getreide, insbesondere Weizen, stellt sich also die Preisentwicklung grundsätzlich positiv, allerdings mit Schwankungen versehen, dar. Gilt dies auch für andere pflanzliche Produkte? Diese Frage kann nicht für alle anderen wichtigen Agrarprodukte einheitlich beantwortet werden. Sicher sind enge Substitute für Getreide und Produkte, die in unmittelbarer Flächenkonkurrenz zu Getreideerzeugungsregionen stehen, zumindest auf mittlere Sicht in ähnlicher Weise von Preisanstiegen und Schwankungen betroffen wie Getreide selbst. Dies gilt insbesondere für Ölsaaten, insbesondere Raps und Sonnenblumen, mit Einschränkungen auch für Sojabohnen. Für diese Produkte liegt nämlich eine hohe Substitutionalität in der Verwendungsrichtung Bioenergie vor, und auch in der Verwendung als Futter besteht eingeschränkte Substituierbarkeit zum Getreide. Weiter stehen Ölsaaten aufgrund ähnlicher natürlicher Ansprüche in der Produktion in direkter Konkurrenz um dieselbe Fläche. Der Mechanismus der Konkurrenz um den knappen Faktor Fläche führt dazu, dass sich kein einziges bodengebundenes Agrarprodukt vollkommen von der Preisentwicklung auf lange Sicht von Getreide abkoppeln können. Dies ist aber kurzfristig durchaus möglich, wie die Bewegung bei den Preisen für wichtige tropische Erzeugnisse in den vergangenen Jahren gezeigt hat. Weder Zucker noch Baumwolle (s. Schaubild 3) haben die Preishausse bei Weizen und anderen Getreidearten auch nur annähernd mitgemacht. Aus Sicht der Armutsbekämpfung ist diese Entwicklung äußerst bedenklich, denn sie führt dazu, dass sich die Terms of Trade der Entwicklungsländer weiter verschlechtern; viele Entwicklungsländer exportieren Baumwolle oder Zucker, und führen dafür Getreide ein. Diese Entwicklung verdeutlicht aber auch, dass durch Veränderungen in den relativen Preisen unter Umständen neue Vorzughkeiten im Anbau entstehen können, welche Verschiebungen auch in den Anbauflächen nach sich ziehen dürften. Bei nachhaltig höheren Weizenpreisen und gleichzeitig fortgesetzter Stagnation der Baumwollpreise wird es bspw. für ein Land wie Ägypten wieder interessant mehr Weizen anstatt Baumwolle zu erzeugen. Kurzfristige Preisänderungen werden hier allerdings wirkungslos bleiben.

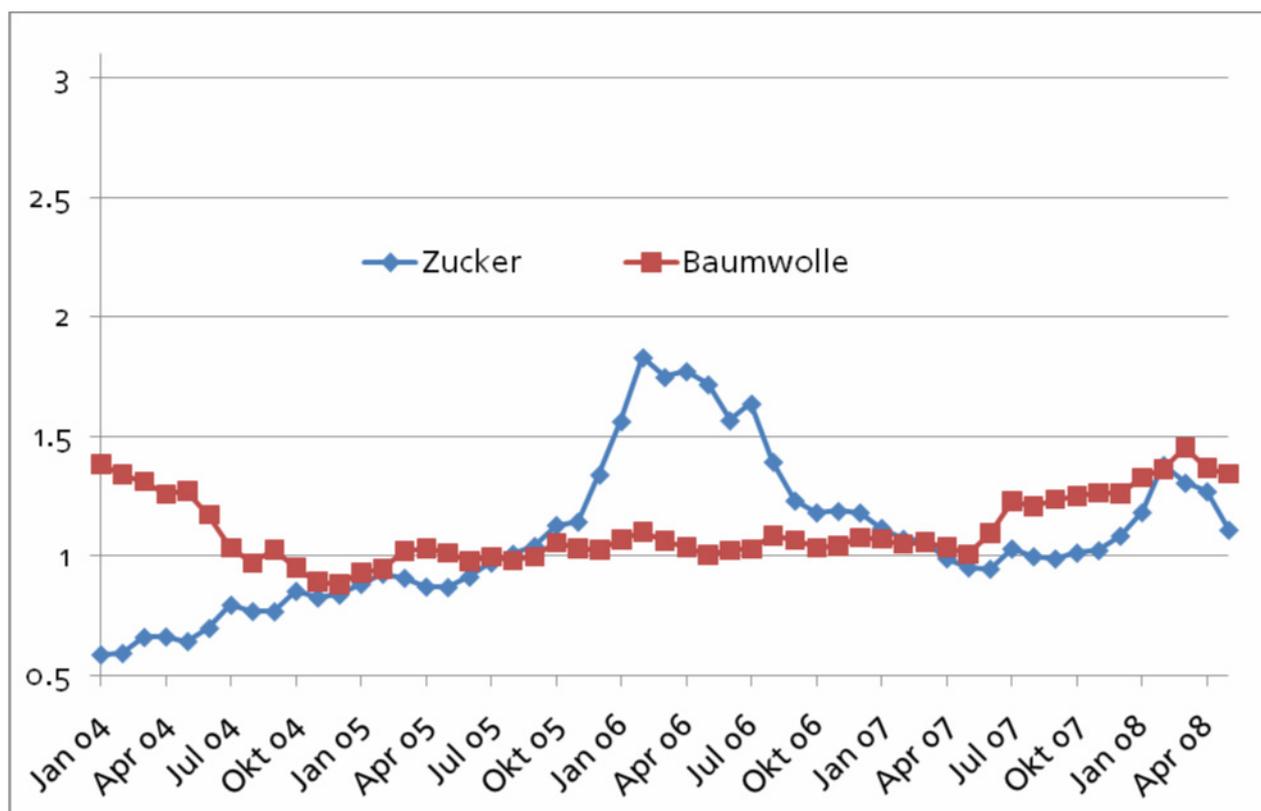


Schaubild 3 Preisentwicklung bei Zucker und Baumwolle, Durchschnitt 2005=100

ZUKÜNFTIGE TRENDS

Wie wird nun zukünftig das internationale Preisgefüge für Agrarprodukte aussehen? Die mittel- und langfristigen Prognosen von OECD/FAO (www.oecd.org) und FAPRI (www.fapri.org) sind wohl derzeit die verlässlichsten Quellen für kurz- und mittelfristige Vorhersagen, d.h. 10 Jahre in die Zukunft gerichtet. Wenn auch beide Organisationen im Detail die Entwicklungen auf den Weltagarmärkten unterschiedlich einschätzen, so ist doch einiges an Gemeinsamkeiten zu erkennen. Beide gehen davon aus, dass die aktuelle Preisentwicklung vom Anfang des Jahres 2008 eine Preisspitze darstellt; beide Prognosen sagen vorher, dass im Laufe der nächsten zwei Jahre die überreizten Preise sich wieder deutlich nach unten entwickeln. So geht die OECD/FAO-Prognose von einem Weizenpreisniveau von real 230 \$/t aus (HRW No. 2, FOB Golf von Mexiko). Bei einem unterstellten Wechselkurs in Höhe von 1,35 \$/€ ergäbe sich daraus ein Preisniveau von ca. 170 €/t. Die Prognosen für die übrigen pflanzlichen Produkte (Grobgetreide, Reis, Ölsaaten und Zucker) weisen ähnliche Bewegungen auf, vielleicht mit der Ausnahme von Ölsaaten, wo insbesondere aufgrund der verschiedenen politischen Veränderungen im Bereich nachwachsender Rohstoffe und Bioenergie die Prognosen einmütig eine Stabilisierung auf einem höheren Niveau vorhersagen. Allerdings sollte bedacht werden, dass die aktuelle Preisentwicklung beim Weizen eher darauf hindeutet, dass auch ein Niveau von 170 €/t in einzelnen Jahren durchaus spürbar unterschritten werden kann.

Betrachten wir die Produkte, die auch für die Entwicklungsländer von großem Interesse sind (z.B. Zucker und Baumwolle), so ist beim Zucker wie auch bei der Baumwolle eine Stagnation in realen Preisen auf dem heutigen Niveau zu erwarten. Bei den tierischen Produkten hingegen wird im Bereich Milch mittelfristig zunächst ein Rückgang im Vergleich zu den sehr hohen Preisen des vergangenen Jahres erwartet, die dann allerdings gegen Ende des Betrachtungszeitraums wegen der stärkeren Nachfrage nach Milchprodukten aufgrund von Einkommenswachstum wieder ansteigen können. Eine ähnliche Argumentation gilt auch für Fleisch.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass für die nahe Zukunft Agrarpreise insgesamt in einer Höhe zu erwarten sind, die oberhalb des in den vergangenen beiden Dekaden beobachteten Niveaus anzusetzen ist; es wird allerdings aller Voraussicht nach doch unter dem Niveau liegen, welches wir im vergangenen Jahr beobachten konnten. In Bezug auf das Preisgefüge (*terms of trade*) zwischen den pflanzlichen Produkten der gemäßigten Zone und denen der tropischen und subtropischen Gebiete scheint sich abzuzeichnen, dass eine Verschiebung eher zu Ungunsten der typischen Produkte der Entwicklungsländer stattfindet: Dies gilt vor allem für Kakao, Kaffee und Baumwolle. Bei Zucker besteht Anlass zur Vermutung, dass aufgrund der höheren Energiepreise die energetische Verwertung von Zucker, d.h. die Umwandlung in Bioethanol, eine Preisuntergrenze darstellt.

AUSWIRKUNGEN AUF LOKALE EBENEN

Die bisher gemachten Ausführungen bezogen sich ausschließlich auf das Preisniveau, so wie es sich im Weltagrarhandel dargestellt hat und in der Zukunft darstellen dürfte. In der Vergangenheit waren diese Entwicklungen gerade für das Preisniveau im Inland allerdings nicht immer von Bedeutung. Gleichsam als Moderator greift die Politik bei den Agrarrohstoffen in die Preistransmission zwischen Welt- und lokalen Märkten ein. Dabei war die Agrarpolitik jedenfalls in den Industrienationen durch massive Politikeingriffe in der Vergangenheit in der Lage, lokale Preisentwicklungen mehr oder weniger vollständig von den internationalen Preisentwicklungen abzukoppeln – man denke nur an das Interventionspreissystem für Getreide und Rindfleisch, wie es in der EU lange Jahre betrieben wurde¹.

Eine solche Abkopplung inländischer Preisentwicklungen von den internationalen Weltmärkten ist für die Zukunft nicht länger zu erwarten. Zwar sind die multilateralen Handelsgespräche im Rahmen der Welthandelsorganisationen (WTO) immer noch nicht zu einem erfolgreichen Abschluss geführt worden, aber in der Zwischenzeit sind viele bilaterale Handelsabkommen geschlossen worden, die letztlich auch dazu führen, dass die heimischen Preise in verstärktem

¹ Das Interventionspreissystem ist immer noch Kernbestandteil der meisten Gemeinsamen Agrarmarktordnungen der EU, das durch die staatliche Aufkaufgarantie abgesicherte Preisniveau liegt heute allerdings weit unter den aktuell geltenden Weltmarktpreisen. Dies wird zum einen durch eine direkte Verringerung des Interventionspreises oder

Maße den internationalen Preisen folgen werden. Dies gilt für alle handelbaren Güter, und gerade auch für die Agrarrohprodukte. Die Erwartung für die Zukunft der heimischen Agrarpreise in der EU ist also, dass die inländischen Preise letztlich im Niveau den Weltmarktpreisen folgen werden (wobei Zucker wohl noch für einige Jahre eine Ausnahme bleiben dürfte). Auch die Schwankungen der internationalen Preise dürften in der Tendenz auf die Inlandsmärkte durchschlagen, wobei die Agrarpolitik Ausschläge nach unten vermutlich begrenzen wird, während Ausschläge nach oben eher nicht gebremst werden dürften. Daraus ergeben sich für die lokale Produktion in der EU folgende Konsequenzen.

- Die Agrarpreise werden sich in der nächsten Dekade voraussichtlich auf einem Niveau stabilisieren, das - wenn auch wesentlich niedriger als zu Beginn des Jahres 2008 - immer noch hoch genug sein wird, um die Opportunitätskosten für flächengebundenen Naturschutz deutlich ansteigen zu lassen. Extensivierung für Naturschutz wird also besonders auf hochwertigen Standorten teurer als in der Vergangenheit sein.
- Die erzeugten pflanzlichen Produkte werden in drei anstelle von bisher zwei Hauptverwendungen eingesetzt werden. Neben die direkte Nutzung als pflanzliches Nahrungsmittel und die indirekte Nutzung in der Veredlung wird verstärkt die Nutzung als nachwachsende Rohstoffe, insbesondere für Bioenergie treten. Dieser Bereich wird aber auch in Zukunft ganz massiv durch die Politik beeinflusst werden, so dass ein erhebliches Politikänderungsrisiko besteht. Auch steht zu erwarten, dass verstärkt pflanzliche Abfallstoffe für die Erzeugung von Bioenergie genutzt werden, was die Nutzungskonflikte wenigstens teilweise entschärfen dürfte.
- Agrarprodukte werden weiterhin eher knapp bleiben, so dass auch die extensive Produktion von Agrarrohstoffen in einer flächenarmen Region wie Europa an ökonomischer Relevanz verliert. Dies bedeutet selbstverständlich nicht, dass beispielsweise die Mutterkuhhaltung komplett an Bedeutung verlöre; sie verliert allerdings an Vorzüglichkeit gerade an marktnahen Standorten, so dass es durchaus zu einer Einschränkung kommen wird.
- Die Preise im Inland werden wesentlich stärker schwanken als dies in der Vergangenheit der Fall war. Dies wird zweierlei Konsequenzen nach sich ziehen: Zum einen werden Landwirte vermutlich geneigt sein, aufgrund der schwankenden Preise bei der Wahl ihres Produktionsprogramms mehr Wert auf Stabilität als in der Vergangenheit zu legen. Zum anderen werden auch auf der Inputseite Produktionsverfahren an Interesse gewinnen, die, auch wenn sie nicht mehr Ertrag versprechen, sondern „nur“ eine Stabilisierung des Ertragsniveau nach sich ziehen, vermehrt eingesetzt werden.
- Die zu erwartenden Preisschwankungen dürften den Strukturwandel in der Landwirtschaft eher noch beschleunigen. Die verstärkten Preisschwankungen erfordern in verstärktem Maße, dass die Landwirte Liquiditätsreserven vorhalten; dies dürfte den wirtschaftlich weniger erfolgreichen Betrieben oftmals nicht gelingen. Zurzeit² wird diese

durch Verschärfungen der Interventionsbedingungen (mengenmäßige Begrenzung, Anforderungen an die Mindestqualität, etc.) erreicht.

² Die Rahmenbedingungen der GAP sind zur im so genannten Health Check unter Bearbeitung, werden aber bis 2013 im Wesentlichen unverändert bleiben.

Liquiditätsreserve noch durch die Direktzahlungen im Rahmen der Gemeinsamen Agrarpolitik gesichert, aber in der nächsten Haushaltsperiode der EU dürfte es hier deutliche Einschnitte geben.

Diese veränderten Rahmenbedingungen werden in der Landwirtschaft gewiss Bestrebungen hervorrufen, diese (für europäische Landwirte³) neuen Preisbewegungen durch verstärkte Politikeingriffe zu begleiten. Es steht zu erwarten, dass eine Zielrichtung das erneute Abkoppeln der europäischen Landwirtschaft von den globalen Agrarmärkten sein wird. Der Verzicht auf Integration der lokalen Produktionssysteme in die globalen Marktentwicklungen ist aber eine volkswirtschaftlich äußerst teure Angelegenheit, deren gesellschaftliche Kosten weit über die gesamtwirtschaftliche Bedeutung des Agrarsektors hinausgehen. Es ist zum einen nicht zu erwarten, dass internationale Handelspartner mittel- und langfristig eine Isolation der europäischen Märkte für Agrar- und Ernährungsgüter akzeptieren werden, während Europa in anderen Sektoren verstärkte Marktintegration propagiert. Zum anderen wäre es selbst ohne diesen Druck seitens der Handelspartner eine sehr teure Alternative, den Weg hin zu einer Strukturkonservierung im Agrarsektor, der unter Umständen bis hin zur Museumslandwirtschaft gehen könnte, einzuschlagen.

KONSEQUENZEN FÜR PFLANZENBAU UND PFLANZENSCHUTZ

Eine der Konstanten für die zukünftige Entwicklung der Agrarwissenschaften – damit auch für jede einzelne ihrer Teildisziplinen – wird der stetige Wandel sein. Einige der Trends, welche in Zusammenhang mit der zunehmenden Globalisierung der Agrarmärkte stehen, wurden oben diskutiert. Die Konsequenzen für Pflanzenbau und Pflanzenschutz im Detail zu diskutieren, ginge über den Rahmen dieses Beitrags hinaus; die weiteren Beiträge in diesem Sammelband setzen sich mit den unterschiedlichsten Herausforderungen der Zukunft im Detail auseinander. Die zukünftigen Entwicklungen auf den globalen Märkten, welche für den Agrar- und Ernährungssektor große Herausforderungen sind, sind die sich beschleunigende Dynamik und die verstärkten Schwankungen. Es gibt daher einige Schlussfolgerungen, welche hinsichtlich der Rolle von Forschung in Pflanzenbau und Pflanzenschutz gezogen werden können.

Es wird notwendig sein, Pflanzenbausysteme flexibel zu gestalten, d.h. dass die relative Vorzüglichkeit von Produktionssystemen nicht bereits bei geringen Änderungen in den Produkt- und Faktorpreisen starken Verschiebungen unterworfen ist. Auch die Störanfälligkeit pflanzenbaulicher Produktionssysteme wird in Zukunft an Bedeutung gewinnen, wenn die Agrarpolitik sich mehr und mehr von der direkten Beeinflussung der Märkte verabschiedet und das Risikomanagement stärker den landwirtschaftlichen Unternehmern überlassen bleibt. Damit

³ Allerdings ist die Novität dieses Phänomens in der Landwirtschaft sehr unterschiedlich: So ist beispielsweise die flächenungebundene tierische Veredlung ohnehin viel stärker an solche Preisschwankungen gewöhnt.

wird die stabilisierende Wirkung des Pflanzenschutzes in Zukunft gegenüber der ertragssteigernden Wirkung an Bedeutung gewinnen.

Die Betrachtung pflanzenbaulicher Systeme ohne die explizite Berücksichtigung ihrer Auswirkungen entlang der gesamten Wertschöpfungskette wird in Zukunft noch weniger umfassende Aussagen über die nachhaltige Vorzüglichkeit eines Produktionssystems gestatten, als dies heute bereits der Fall ist. Eine systemorientierte Herangehensweise, mit besonderem Augenmerk auf die wirtschaftlichen Folgen von Produktionssystemen über den einzelnen landwirtschaftlichen Betrieb hinaus, ist in den Agrarwissenschaften unerlässlich, um den Problemen der Zukunft angemessen begegnen zu können.

Eine letzte Botschaft aus der Boomzeit auf den Agrarmärkten Ende 2007 und Anfang 2008, welche ja auch auf drastische Weise die negative Wirkung explodierender Nahrungsmittelpreise für die ärmsten Länder der Welt (die ja meist Nettonahrungsmittelimporteure sind) illustriert hat, ist die Notwendigkeit von Investitionen der privaten und wie der öffentlicher Hand in Agrarforschung, um auch zukünftig genügend Innovationen für standortangepasste, nachhaltige Produktionssysteme zur Sicherung der Welternährung erzeugen zu können.

Vetter A: Anpassung der Pflanzenproduktion an den steigenden Bedarf an Nahrungsmitteln und Energierohstoffen. In: Tiedemann A v, Heitefuss R, Feldmann F (2008): Pflanzenproduktion im Wandel – Wandel im Pflanzenschutz, ISBN 978-3-941261-00-6; 16-31. © Deutsche Phytomedizinische Gesellschaft, Braunschweig, Germany

Anpassung der Pflanzenproduktion an den steigenden Bedarf an Nahrungsmitteln und Energierohstoffen

A Vetter

TLL Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft, Apoldaer Strasse, 07778 Dornburg

Email: a.vetter@dornburg.tll.de

ZUSAMMENFASSUNG

Mit steigenden Preisen für die Nahrungsmittel und Energierohstoffe erhöht sich zwangsläufig die Intensität der Produktion sowohl im Food- als auch im Non-Food-Anbau. Mit dem Energiepflanzenanbau eröffnet sich für die Landwirtschaft eine neue Einkommensquelle, die nur in wenigen Regionen Deutschlands in Konkurrenz zur Futterproduktion zu sehen ist. Insbesondere mit neuen Fruchtarten zur Erzeugung von Kosubstraten für Biogasanlagen und mit Agroforstsystemen kann zukünftig ein erheblicher Beitrag zur Biodiversität in der Landwirtschaft geleistet werden. Bei globalisierten Märkten für Rohstoffe, aber auch für Nahrungs- und Futtermittel, muss sich die deutsche Landwirtschaft an der Nachfrage auf dem Weltmarkt orientieren. Gleichzeitig kommen, neben ökonomischen Erwägungen, verstärkt Kriterien zur Nachhaltigkeit der Produktion, zum Klimaschutz und zur Sicherheit bei der Versorgung mit Nahrungsmitteln und Energie in die Diskussion. Die Landwirtschaft wird sich bei den durch die EU und die Bundesrepublik gesetzten Rahmenbedingungen zunehmend auf eine Diversifizierung der Produktion einstellen und zwangsläufig das begrenzte Flächenpotenzial intensiver nutzen.

EINLEITUNG

Nach einer jahrzehntelangen Stagnation der landwirtschaftlichen Produktion hat in den letzten zwei Jahren eine rasante Umorientierung stattgefunden. Der Markt hat sich von einem Angebotsmarkt mit Überschüssen zu einem Nachfragemarkt entwickelt. Diese Entwicklung wurde durch das Aufeinandertreffen mehrerer Faktoren bedingt:

- ungebremster Anstieg der Weltbevölkerung, verbunden mit einer zunehmenden Urbanisierung,
- wachsendes Einkommen in den Schwellenländern, damit Veränderung der Verzehrsgewohnheiten,
- steigende Preise für fossile Rohstoffe, damit steigende Nachfrage nach Biorohstoffen,
- Klimawandel mit vermuteter Ertragsstagnation bzw. -rückgang.

Zudem haben widrige Witterungsverhältnisse in Getreideexportländern (z. B. Australien) und das Einsteigen von Spekulanten an den Börsen in den Nahrungs- und Futtermittelmarkt diesen Trend verstärkt. Insgesamt kam es trotz einer in der Welt ansteigenden Getreideproduktion zu einer Abnahme der Lagerbestände. In Summe führten diese Faktoren zu einem drastischen Anstieg der Getreidepreise Mitte bis Ende 2007 (Abbildung 1). Die Preise für tierische Erzeugnisse wie Milch und Fleisch sind bzw. werden diesem Trend, zwangsläufig aufgrund gestiegener Futter- und Energiekosten, folgen.

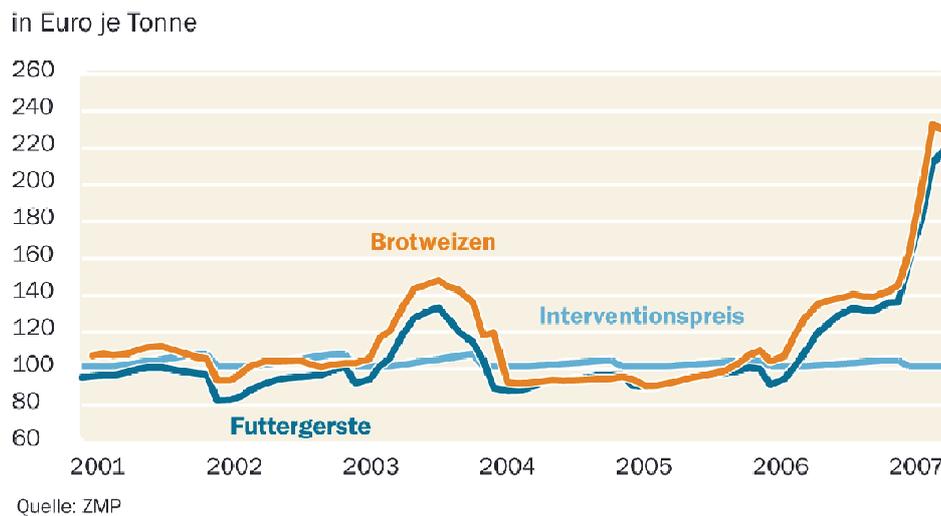


Abb. 1 Erzeugerpreise Getreide 2001 bis 2007

Allgemeine Schätzungen, die natürlich mit vielen Unsicherheiten behaftet sind, gehen von einem zukünftigen Getreidepreis von 16 bis 18 Euro/dt aus. Den größten Einfluss auf die Preisgestaltung wird das Wachstum der Weltwirtschaft mit dem damit verbundenen Einfluss auf die fossilen Rohstoffpreise und dem Wohlstand der Bevölkerung ausüben. Der tatsächliche Einfluss des Verbrauchs von Biomasse für die Bioenergieproduktion, vor allem die Bioethanolproduktion wird im Allgemeinen überschätzt. Die Weltgetreideproduktion, inkl. Reis beträgt ca. 2.100 Mio. t, wovon 2007 ca. 3,5 % zu Biokraftstoffen verarbeitet wurden. Diese Menge entspricht der bisher durch die USA exportierte Maismenge. Zuckerrohr, als neben Mais wichtigstem Rohstoff für die Bioethanolproduktion, konkurriert nur begrenzt mit dem Nahrungsmittelsektor, da der Weltmarkt mit Zucker gut versorgt ist und die Erweiterung des Zuckerrohranbaus im Hauptproduktionsland

Brasilien nicht zu Lasten der Fläche für die Nahrungsmittelerzeugung geht. Bei der Erweiterung der Palmölproduktion zur Biodieselherstellung und der Sojaproduktion mit der Zielstellung Eiweißfuttermittel, inkl. des Nebenproduktes Öl für Sojaölmethylester, werden für diese Kulturen vorwiegend Grasland und tropischer Regenwald in eine ackerbauliche Nutzung überführt. In diesen Fällen handelt es sich somit nur sekundär um eine Konkurrenz zwischen Food- und Non-Food-Produktion, sondern vielmehr um eine Konkurrenz mit Naturschutz- und Klimaschutzziele. Ob diese Entwicklung nachteilig ist, muss stark hinterfragt werden.

POTENZIALE

Eine Abschätzung der Potenziale für den Energiepflanzenanbau gestaltet sich zunehmend schwierig. In Zeiten eines Marktes mit Überschussangebot konnten in der EU und in Deutschland die stillgelegten Flächen zuzüglich des teilweise subventionierten Agrarrohstoffexportes als theoretische Fläche für den Anbau von nachwachsenden Rohstoffen, vor allem von Energiepflanzen, angenommen werden. Ausgehend von diesen Überlegungen kommt Zeddies (2008) zu dem Ergebnis, dass im Zeitraum 2002 bis 2005 etwa 3,2 Mio. ha landwirtschaftlicher Nutzfläche (\approx 19 % der LF) nicht für die Versorgung der Bevölkerung mit Nahrungsmitteln erforderlich waren. Des Weiteren blieben 0,5 Mio. ha im Rahmen der obligatorischen Stilllegung ungenutzt. In Folge stagnierender Bevölkerung und gleichbleibendem pro Kopf Verbrauch erhöht sich bei steigenden Erträgen (?) bis 2020 diese Fläche auf 5 Mio. ha. Das Wuppertal Institut (2006) kommt auf ca. die Hälfte dieses Wertes, d. h. ca. 2,4 Mio. ha.

Entscheidend für die in Deutschland zur Verfügung stehenden Fläche sind die politischen Ziele der EU und der Bundesregierung. Mit dem EU-Klima- und Energiepaket vom März 2007 und den Meseberger Beschlüssen der Bundesregierung (2007):

- Minderung Treibhausgase bis 2020
- 20 % erneuerbare Energien bis 2020
- 20 % Biokraftstoffe bis 2020 (korrigiert auf 10 %)

wurden die Weichen gestellt. Zur Erreichung der Ziele ist es notwendig, die derzeitige Erzeugung von Bioenergie bis 2020 mindestens zu verdoppeln. Zu berücksichtigen ist dabei, dass schon heute ca. 70 % der regenerativen Energien auf die Biomasse entfallen (Abbildung 2).

Des Weiteren ist zu beachten, dass biogene Nebenprodukte und Abfälle, z. B. Altholz und Nebenprodukte der Holzverarbeitenden Industrie bereits weitgehend energetisch genutzt werden. Es gilt daher zukünftig die noch ausreichend zur Verfügung stehenden Nebenprodukte Gülle, Waldrest- und Durchforstungsholz sowie Stroh und speziell angebaute Energiepflanzen für die Energiegewinnung zu mobilisieren.

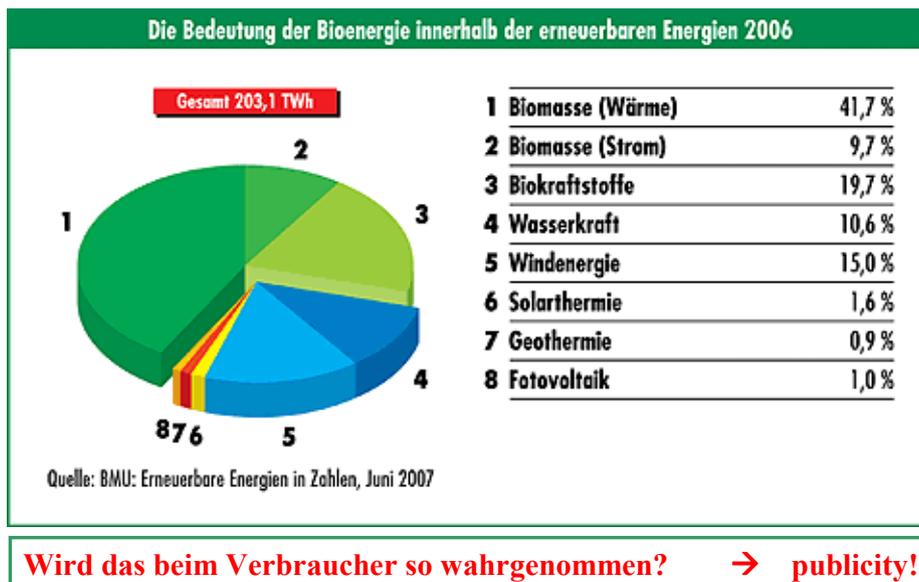


Abb. 2 Bedeutung der Bioenergie innerhalb der erneuerbaren Energien 2006

Für die verfügbaren Biorohstoffe gilt es wiederum die verschiedenen Nutzungspfade, d. h. für die Wärme-, Strom- oder Kraftstoffnutzung zu beurteilen. Bei knappen Ressourcen ist die Energieeffizienz, bewertet von der Rohstoffherzeugung bis zur Energiebereitstellung, das wichtigste Kriterium. Vor diesem Hintergrund schneidet die Wärmeerzeugung bzw. die Kraft-Wärme-Kopplung am besten ab (Abbildung 3).

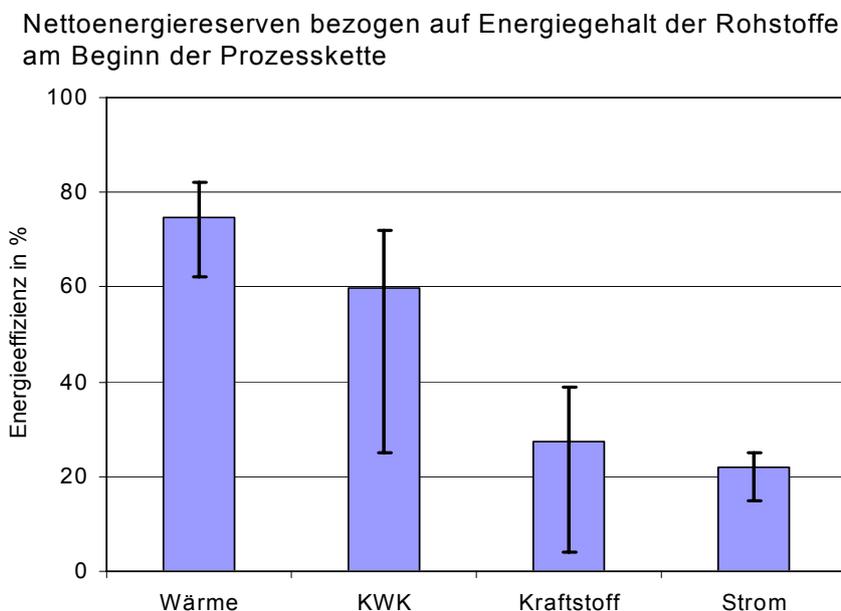


Abb. 3: Energieeffizienzen der verschiedenen Nutzungspfade

Die Spannbreite ist in Abhängigkeit vom Konversionsverfahren und den eingesetzten Rohstoffen beträchtlich. Eine Sonderstellung bei der Bewertung nehmen die biogenen Kraftstoffe ein. Obwohl die Energieeffizienzen bedeutend schlechter als bei der Wärme- und KWK-Nutzung, sind sie auf absehbare Zeit die einzige Möglichkeit „regenerative Kraftstoffe“ herzustellen. Die bisherigen Aussagen beziehen sich auf Kraftstoffe der 1. Generation, d. h. Pflanzenölmethylester vorwiegend auf Rapsbasis und Bioethanol auf Getreidebasis (Stärke). Für Kraftstoffe der 2. Generation, d. h. BTL-Kraftstoffe (Biomass to liquid) bzw. Ethanol auf Lignocellulosebasis (Holz oder Stroh) liegen noch keine belastbaren Ergebnisse vor. Für die Beurteilung der Energieeffizienz und der Nettoenergieerzeugung je Flächeneinheit in der Landwirtschaft ist es notwendig, eine Schnittstelle zu definieren. Dies sollte das Lager der Konversionsanlage sein. Zuzüglich ist die Rücklieferung anfallender Nebenprodukte in Bezug auf die Humusbilanz und damit der theoretische Nettoenergieertrag pro Flächeneinheit zu berücksichtigen. In Abbildung 4 erfolgt eine Bewertung der wichtigsten Energiepflanzen. Die von Zimmer et. al. (2007) ermittelten Werte für Pappeln im Kurzumtrieb (Energieholz), Getreidekorn (B- bzw. C-Weizen), Silomais und Raps sind in Tabelle 1 dargestellt. Die Aufstellung wurde mit selbst ermittelten Werten für das Koppelprodukt Stroh ergänzt.

Außer bei Energieholz bewegen sich die Inputwerte auf einem ähnlich hohen Niveau. Die geringen Werte für Pappeln sind vor allem auf deren niedrigen Stickstoffdüngerbedarf von knapp 40 kg N/ha/a zurückzuführen. Die ebenfalls etwas niedrigeren Inputwerte für Silomais sind durch die Rückführung eines erheblichen Anteils des Stickstoffs über die Gärreste (120 kg N/ha) zu erklären. Bei einer vollständigen Versorgung des Maises mit Mineraldünger werden in etwa Werte wie bei Getreide erzielt. Entscheidend für die Energieeffizienz sind somit die Energieoutputs, die wiederum über die Hektarerträge determiniert werden. Unter Einbeziehung des Nebenproduktes Stroh weist Getreide als Ganzpflanze ein dem Mais vergleichbaren Nettoenergieertrag auf. Bei einer alleinigen Körnernutzung sinken die Nettoenergieerträge unter das Niveau von Energieholz ab. Die dargestellten Nettoerträge können für einen Vergleich zwischen den Fruchtarten genutzt werden. Für die Ermittlung von Potenzialen in einem Betrieb oder einer Region ist die gesamte Fruchtfolge über die Humusbilanz zu betrachten.

Bei einer für das Bundesland Thüringen nach der VDLUFA-Methode berechneten Humusbilanz konnte ermittelt werden, dass schätzungsweise 25 % der aufgewachsenen Trockenmasse pro Jahr zur Humusproduktion auf dem Acker zu verbleiben haben. Das heißt, der Bruttoenergieertrag (Ganzpflanze) ist, außer bei Dauerkulturen, theoretisch um ca. 25 % zu reduzieren. Diese Aussage ist in Abhängigkeit vom Nutzungspfad zu relativieren.

Tabelle 1 Energiebilanzen für Energiepflanzen frei Lager

Energie	Einheit	Energieholz Pappeln	Getreide Winterweizen	Mais Silomais	Raps
		10 t TM/ha	77 dt/ha	445 dt FM/ha	37 dt/ha
Input	kWh/ha	2.310	3.840	2.600 (4.230) ¹⁾	3.770
davon Diesel	kWh/ha	690	770	930	690
davon Stickstoff	kWh/ha	570	2.060	1.020 (2.650) ¹⁾	2.500
Output – Brutto	kWh/ha	47.290 ²⁾	31.120	59.330	24.580
Output - Netto	kWh/ha	44.980	27.280	56.730	20.810
Output - Nebenprodukt ³⁾	kWh/ha	-	32.000 (8 t)	-	28.000 (7 t)
Output - Nebenprodukt Netto ⁴⁾	kWh/ha	-	19.300 (5 t)	-	-
Notwendige Biomasse zur Humusreproduktion (-25 %)	t/ha	-	3,9	(Rückführung Gärrückstände)	2,7
Output - Netto - Bilanz	kWh/ha	44.980	43.680	56.730	38.010

1) ohne Rückführung Stickstoff aus Gärrückständen

2) inkl. 2 % Lagerungsverluste

3) gewachsener Nebenproduktertrag

4) erntbarer Nebenproduktertrag inkl. Stickstoffabfuhr

Erfolgt eine Rückführung von organischer Substanz aus dem Konversionsprozess, z. B. über Gärreste bei der Biogaserzeugung, kann der gesamte Flächenertrag bei der Berechnung des Bruttoenergieertrages herangezogen werden. Wird die gleiche Pflanze verbrannt oder vergast, z. B. für die Herstellung eines Synthesegases für die BTL-Produktion, erfolgt keine Rückführung an organischer Substanz, der Bruttoflächenertrag ist um ca. 25 % zu reduzieren.

Analog zur Food-Produktion erhöht sich beim Energiepflanzenanbau mit zunehmender Intensität der Produktion der Energieertrag bis zu einem Maximalwert (Abbildung 4). Da die Inputs energetisch betrachtet nur einen geringen Einfluss auf den Nettoenergieertrag haben, befindet sich der betriebswirtschaftliche Optimalwert kurz vor dem Maximalertrag. Der spezifische Energieaufwand pro Produkteinheit nimmt zudem mit steigender Intensität ab. Aus Gründen der Energieeffizienz wäre somit eine relativ hohe Intensität zu fordern. Dem widersprechen allerdings z. T. die Erhöhung der Treibhausgasemissionen bei einer Stickstoffdüngung über den Entzugswerten sowie die Einhaltung der CC-Kriterien zur umweltverträglichen Produktion und letztendlich betriebswirtschaftliche Gesichtspunkte.

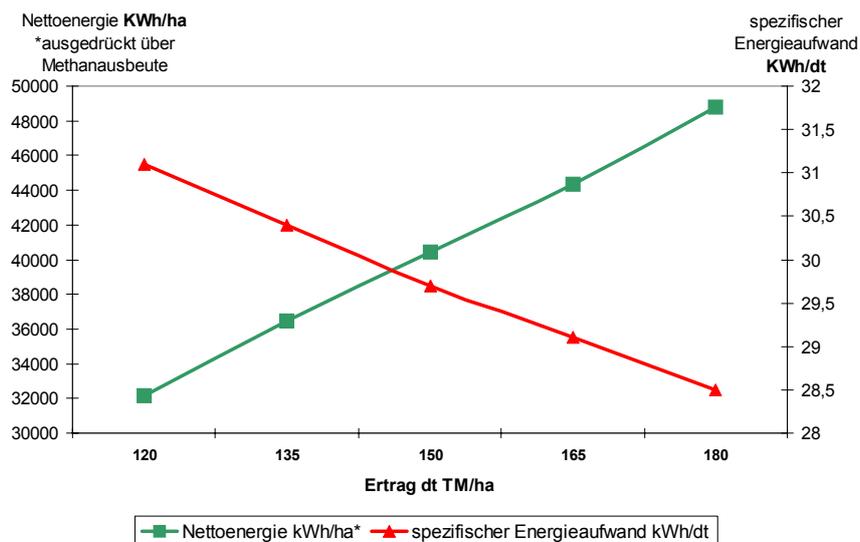


Abb. 4 Einfluss der Intensivierung auf den Nettoenergieertrag und den spezifischen Energieaufwand bei Mais

ANBAUVERFAHREN – ERTRAGSGRENZEN

Ölsaaten und Eiweißfutterproduktion

Niedrige Preise für Biomasse führen zu einer Extensivierung der Produktion. Dies dürfte einer der wesentlichen Gründe für die Stagnation der Erträge bei Weizen und Mais gewesen sein. Eine Ausnahme bildete der Raps, bei dem mit der Ausdehnung des Anbauumfangs auch eine Steigerung der Erträge stattfand (Abbildung 5).

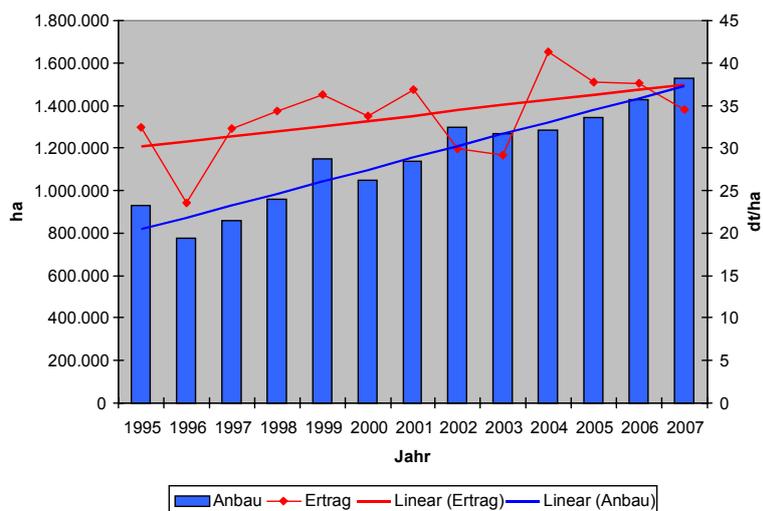


Abb. 5 Anbau und Ertrag von Winterraps 1995 bis 2007* in Deutschland (* vorläufiges Ergebnis)

Im Vergleich zu Getreide hatte Raps relativ gute Preise, sodass das Optimum der Intensität auf einem höheren Niveau lag. Der Rapsanbau stößt mit 1,8 Mio. ha an seine fruchtfolgetechnischen Grenzen. Wesentliche Flächen sind somit nicht mehr zu erschließen. Aufgrund der starken Nachfrage sowohl aus dem Food- als auch Non-Food-Bereich, letzterer sowohl als Industrie- und Energierohstoff, wird der Rapsanbau sicher seine Anbaubedeutung beibehalten. Dies ist auch vor dem Hintergrund des Rückganges bzw. der Stagnation der Blattfrüchte Zuckerrübe und Kartoffel aus fruchtfolgetechnischen Gründen zu befürworten.

Für die weltweit steigende Tierproduktion werden zunehmend Eiweißfuttermittel benötigt. Die dominierende Eiweißquelle ist Sojaschrot, bereitgestellt aus Nord- und Südamerika. Die gewaltigen Potenziale sind an der Ausdehnung der Sojaproduktion in Argentinien zu ersehen. Argentinien hat seine Produktionsfläche in den letzten zwölf Jahren auf ca. 17 Mio. ha verdreifacht. In Europa, vor allem in Deutschland, wird neben importiertem Sojaschrot der Anbau von Ackerbohnen, Erbsen und Lupinen propagiert. Die Argumente sind vermiedene „Stickstoffimporte“, Auflockerung der Fruchtfolge, einheimische sichere, vor allem gentechnikfreie Eiweißquelle. Unter Beachtung der Prämisse, dass die Ackerfläche zunehmend eine knappe, optimal auszunutzende Ressource ist, sollte überlegt werden, die Proteinversorgung z. T. mit Nebenprodukten der Bioenergie- und Nahrungsmittelproduktion abzusichern. Dafür kommen insbesondere Rapsextraktionsschrot und -kuchen aus Ölfrüchten und Schlempen aus der Ethanolherstellung in Betracht. Insbesondere die Nebenprodukte aus der Ölgewinnung erfüllen die aufgestellten Prämissen. In Abhängigkeit von der konkurrierenden Leguminose kann, bezogen auf die Sojaschrotäquivalente 0,8 bis 1,3 ha Raps ca. 1 ha Anbaufläche bei den der großkörnigen Leguminosen ersetzen. Zuzüglich werden ca. 1.500 l hochwertiges Rapsöl für den Food- oder Non-Food-Bereich produziert. Die aufgeführte Berechnung soll zur Orientierung dienen, da bei der Zusammenstellung der Futterrationen die Zusammensetzung der Aminosäuren im Protein ein wesentliches Kriterium ist.

Futter- und Biogasproduktion

Die größten Chancen für den Ausbau der Bioenergie werden neben der Strohnutzung für die Verbrennung und Vergasung im Ausbau der Biogaserzeugung auf der Basis von nachwachsenden Rohstoffen gesehen. Dabei sind zwei Entwicklungstendenzen abzusehen. Zum einen sind dies Biogasanlagen mit BHKW's zur Verstromung im Leistungsbereich 50 kW bis 1 MW_{elektr.} und Biogasanlagen mit nachfolgender Aufbereitung des Gases auf Erdgasqualität und Einspeisung des Gases in das Erdgasnetz im Leistungsbereich 2 bis 4 MW_{elektr.}. Vor allem bei letztgenannten Anlagen mit einem Bedarf von bis zu 100.000 t Feuchtbiomasse (Silagen), kann es regional zu Konkurrenzen um die Fläche mit der Tierproduktion, insbesondere der Rinderhaltung, kommen. Allerdings trifft diese Aussage nur für bestimmte Regionen mit hohem Tierbesatz zu. Deutschlandweit war in den letzten Jahren bei gleichbleibend hoher Milchmenge, aufgrund steigender Milchleistung pro Tier, eine Abnahme der Rinderbestände zu verzeichnen. Dieser Abnahme folgte die Maisanbaufläche. Erst mit dem Anbau von Mais zur Biogaserzeugung nahm die Anbaufläche wieder zu (Abbildung 6).

Tabelle 2 Vergleich ausgewählter heimischer Eiweißträger mit Sojaextraktionsschrot - Proteingehalt „Sojaäquivalente“ und Ertrag (Menge, Protein und Sojaäquivalente)

Feldfrucht →	Futtermittel	Rohprotein je kg Trockenmasse (T)	Äquivalentmenge für Sojaextraktionsschrot kg	Ertrag dt/ha		
				Feldfrucht (T)	Futtermittel (T)	Sojaextraktionsschrotäquivalente
Raps →	Extraktionsschrot	400	1,28	35	20,3 ¹⁾	15,9
	Kuchen/ Expeller	350	1,46	35	23,1	15,9
Weizen →	Trockenschlempe	370	1,38	70	25 ²⁾	18,1
Ackerbohnen		300	1,70	35	35	20,6
Erbsen		250	2,04	35	35	17,2
Lupinen blau		335	1,52	20	20	13,2
Sojabohne →	Extraktionsschrot	510	1			

¹⁾58 %

²⁾35 %

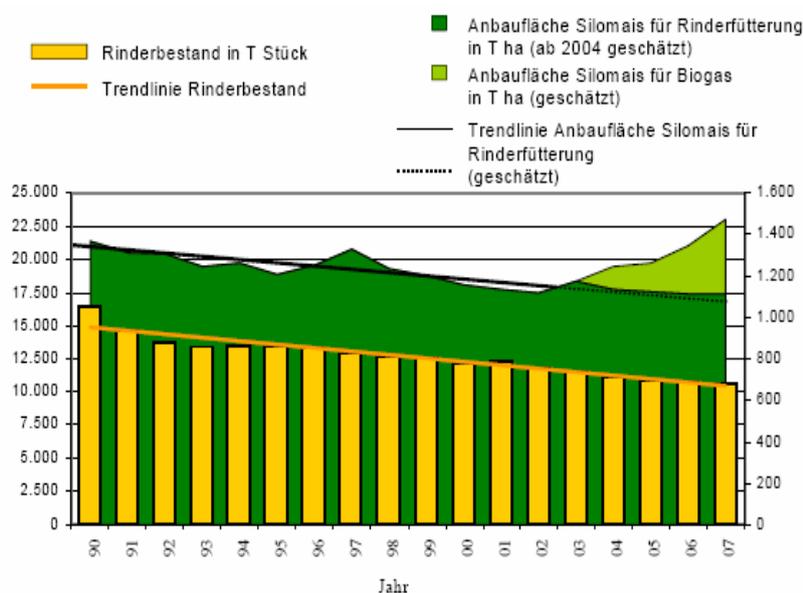


Abb. 6 Entwicklung von Rinderbeständen (< 6 Monate) und Maisanbaufläche von 1990 bis 2007 in Deutschland (Quelle: Endbericht Monitoring EEG, Institut für Energetik Leipzig, 2008)

Das Ausgangsniveau von 1.385.000 ha in 1990 wurde erst 2006 wieder erreicht, bzw. 2007 mit 1.475.000 ha leicht überschritten. Damit nimmt derzeit die Anbaufläche für Mais 9 % der landwirtschaftlichen Fläche (LF) ein.

Unter der Prämisse, dass die Milchleistung je Tier weiter steigt und die Milcherzeugung in Summe nicht wesentlich anwächst, ist mit einer weiteren Freisetzung von Flächen zu rechnen. Die Substraterzeugung für Biogas muss sich dann betriebswirtschaftlich an der Marktfruchtproduktion messen. Bei einem Preis von ca. 16 bis 19 Euro/dt für Getreide muss sich der Maissilagepreis in Abhängigkeit vom Ertragsniveau zwischen 36 und 42 Euro/dt Silage bewegen. Mais stellt mit 79 % der eingesetzten Kosubstrate (Monitoring EEG, 2008) das „Leitsubstrat“ dar, an dem sich alle anderen Substrate hinsichtlich Qualität und Preis messen müssen.

Für die Biogaserzeugung werden zur Zeit spezielle Maissorten gezüchtet, die nicht mehr kolben-, d. h. stärkebetont, sondern ertragsbetont sind. Für diese Energiemaissorten wird kurz- und mittelfristig ein erheblicher Ertragsanstieg von $\approx 20\%$ seitens der Züchter prognostiziert. Über diesen Ertragsanstieg soll eine Kostenreduktion erreicht werden, die die relative Vorzüglichkeit des Energiemaisses sowohl zum klassischen Silomais als auch zu Getreide verbessern soll.

Ob das Ertragspotenzial in der Praxis ausgeschöpft werden kann, hängt entscheidend von den Wasser-Ertragsbeziehungen ab. Die Wasser-Boden-Ertragsbeziehung für die C4-Pflanze Mais, mit einem unterstellten Evapotranspirationskoeffizienten von 200 l Wasser/kg TM, ist in Abbildung 7 dargestellt.

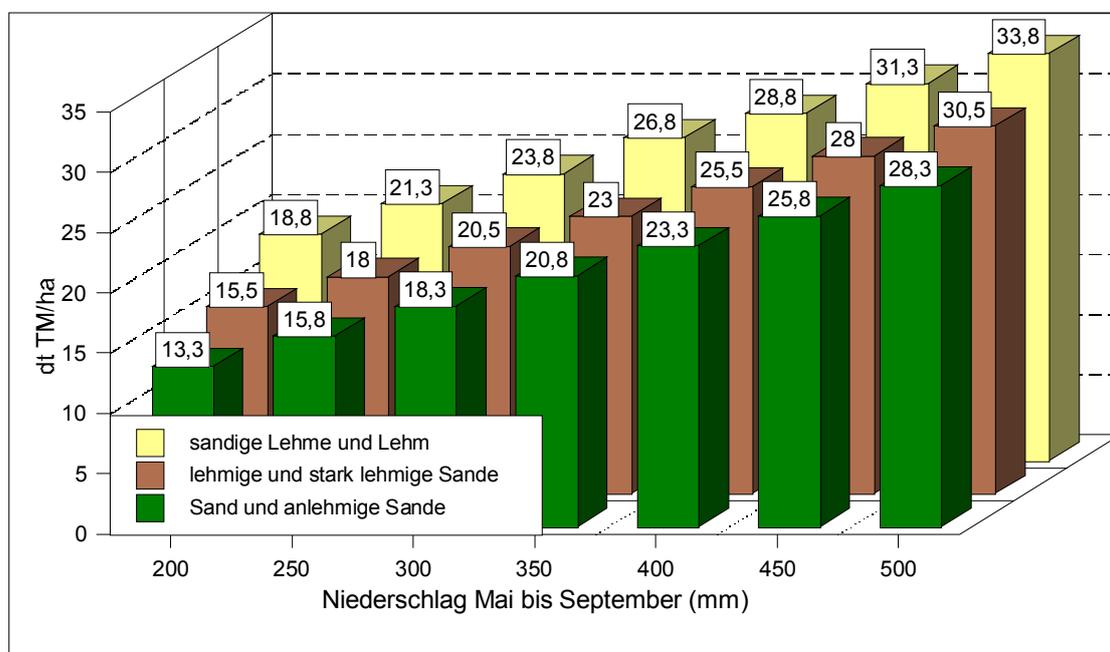


Abb. 7 Ertragspotenzial von Mais in Abhängigkeit vom Niederschlag während der Vegetationsperiode und dem pflanzenverfügbaren Bodenwasser (Mai bis Sept.)

Die Wasserverfügbarkeit, die sich aus Bodenwasserbereitstellungsvermögen und Niederschlägen in der Vegetationszeit ergibt, begrenzt somit die Erträge.

Einer standortgerechten Produktion kommt somit in Zukunft eine höhere Bedeutung zu. Insbesondere das Wasser wird sich in vielen Regionen zum ertragsbegrenzenden Faktor entwickeln. Wassersparende Anbaumethoden, eine gute Wasserspeicherfähigkeit des Bodens und die Auswahl trockenoleranter Arten und Sorten sind sicher zu berücksichtigen. Unter letztgenannten Gesichtspunkten wird der Anbau von Hirsen diskutiert. Vor allem Sudangras und Zuckerhirse wird ein hohes Ertragspotenzial zugesprochen. Erste Ergebnisse zeigen, dass Sudangras auf den meisten Standorten nicht ganz an die Erträge von Mais erreicht (Abbildung 8).

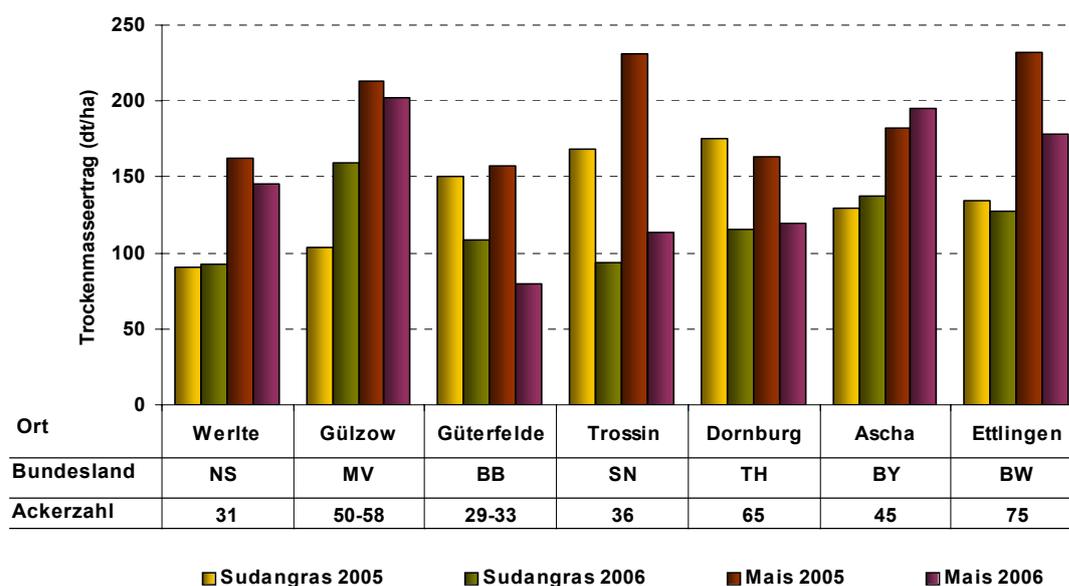


Abb. 8 Erträge von Sudangras und Mais in Abhängigkeit vom Standort

Auf leichteren bzw. schlechter mit Wasser versorgten Standorten, wie dem brandenburgischen Güterfelde, dem sächsischen Trossin oder dem thüringischen Dornburg, kann Sudangras eine Alternative bzw. Ergänzung zum Mais darstellen. Diese Aussage gilt prinzipiell auch für Zuckerhirse, deren Trockenstresstoleranz noch höher als die des Sudangrases einzuschätzen ist. Die Abbildung 8 zeigt des Weiteren sehr deutlich die Abhängigkeit der Erträge von der Jahreswitterung. Sudangras weist die gleichen jährlichen Ertragsschwankungen, wie Mais, auf. Allerdings können diese durchaus gegenläufig sein. Gegenwärtig besteht bei den Hirsen noch das Risiko der Sortenwahl. In der EU sind über 100 Sorten zugelassen, wobei die wenigsten für einen Anbau in Deutschland geeignet sind. Die Ansprüche an die Temperatursumme während der Vegetationszeit variieren zwischen den Sorten beträchtlich. Klassische Sortenversuche, wie sie von den Ländern bei landwirtschaftlichen Fruchtarten durchgeführt werden, fehlen für die Hirsen noch, so dass z. Z. die Situation nicht befriedigen kann. Trotzdem sollten die Hirsen in die Anbauplanung vor allem auf trockenen Standorten zur Streuung des Ertragsrisikos aufgenommen

werden. Zu berücksichtigen ist auch, dass bei einem überdehnten Maisanbau mit einem verstärkten Auftreten von Problemunkräutern z. B. Storchnabel, der nicht Unterbrechung von Fusarienbefallsketten mit der Gefahr erhöhter DON-Belastungen in einer möglichen Folgefrucht Getreide sowie erhöhten Maiszünslerbefall zu rechnen ist. An dieser Stelle sei angemerkt, dass der Zünsler auch auf Sudangras zu finden war, wenn auch nicht in so starkem Maße wie bei Mais. Ob sich die Situation bei zunehmendem Anbauumfang ändert, bleibt abzuwarten. Die gleiche Frage stellt sich bei einem möglichen Auftreten des Maiswurzelbohrers. Verschiedene Veröffentlichungen weisen auf eine Resistenz der Futterhirse gegenüber dem Maiswurzelbohrer hin, sodass diese Kulturart bei einem Befall in der Quarantänezone angebaut werden könnte. Sollte sich diese Aussage verfestigen, wäre mit der Futterhirse sowohl für Biogasbetreiber als auch für Milcherzeuger eine Alternative gegeben, die wesentlich zur Risikominimierung beitragen kann.

Der Anbau von Ganzpflanzengetreide stellt eine weitere Ergänzung zum Mais und zur Risikostreuung bei der Substratbereitstellung dar. Zudem trägt Ganzpflanzengetreide zur besseren Nutzung des Stickstoffes der Gärsubstrate über die Vegetationszeit, zur besseren Ausnutzung des Siloraums und der Erntetechnik sowie als zeitig räumende Vorfrucht für eine termingerechte Aussaat des Rapses bei. Hafer, geprüft als „Sanierungsfrucht“ im bundesweiten EVA-Projekt für getreidebetonte Fruchtfolgen, hat auf fast allen Standorten enttäuscht. Erschreckend niedrig waren auch die Erträge von 5 bis 7 t TM/ha sowohl bei Hafer als auch Wintertriticale auf den leichteren Standorten (AZ ≈ 30). Auf den besseren Standorten können mit Wintertriticale, Winterweizen, aber auch Wintergerste gute Ganzpflanzenerträge erzielt werden. Bereits im derzeitigen Sortiment sind erhebliche Sortenunterschiede zu verzeichnen, dargestellt am Beispiel der Wintertriticale in Abbildung 9.

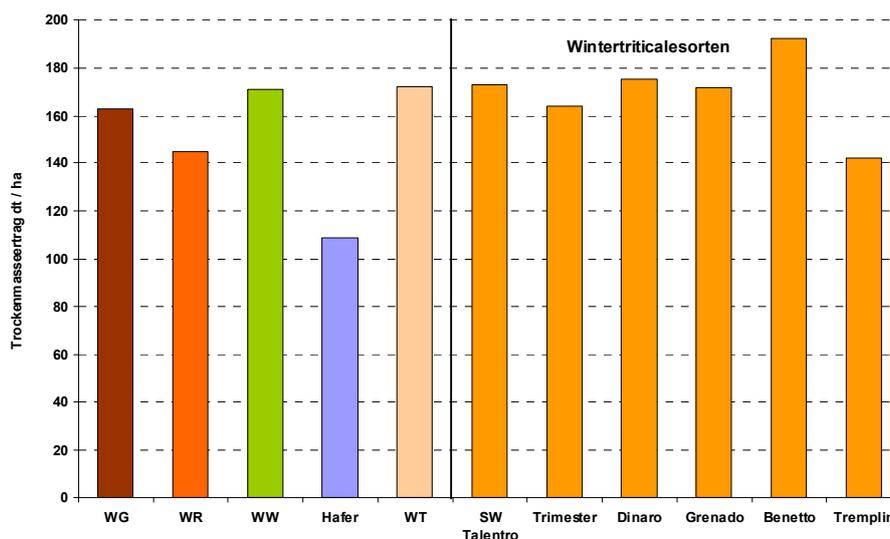
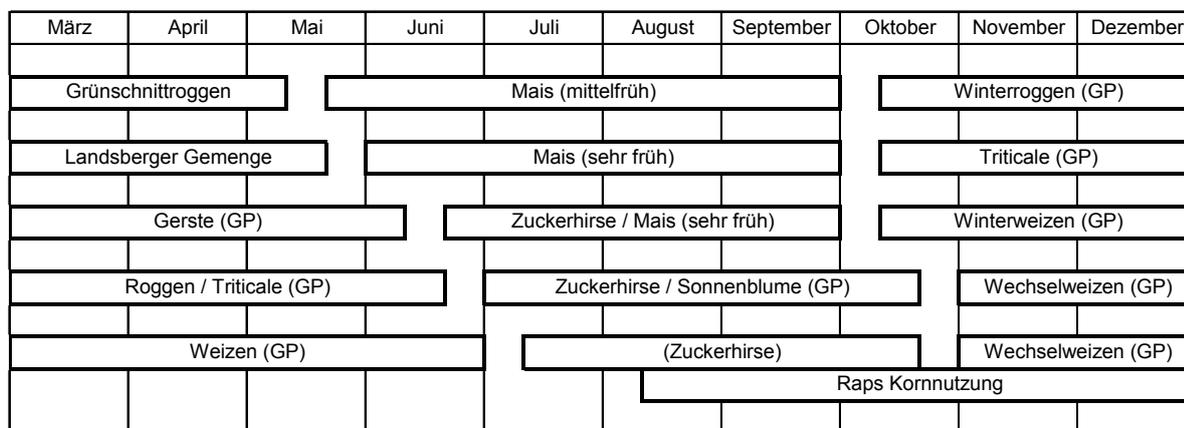


Abb. 9 Mittlere Ganzpflanzenerträge verschiedener Wintergetreidearten und Wintertriticalesorten am Standort Dornburg 2006/2007

Die beste Triticale-Sorte erreichte einen Ertrag von ca. 19 t TM/ha. Weitere Versuche mit Getreidesorten- und -artenmischungen sind ebenfalls vielversprechend. Der Vorteil derartiger Mischungen besteht in einer höheren Ertragsstabilität und einer geringeren Anfälligkeit gegenüber pilzlichen Krankheitserregern. Nach bisherigem Kenntnisstand kann zumindest eine Fungizidspritzung eingespart werden.

Die aufgeführten Erträge beziehen sich auf eine Ernte zum BBCH Stadium 78 bis 83, das heißt Milch- bis Teigreife. Der Grünschnittroggen mit Erntetermin 5. bis 15. Mai (Grannenspitzen, BBCH 49) erzielte dagegen standort- und witterungsabhängige Erträge von 3 bis 7 t TM/ha. Zwischen der Ernte von Grünschnittroggen und spätem Ganzpflanzengetreide besteht somit eine Zeitspanne von sechs Wochen mit einem Ertragszuwachs von bis zu 10 t TM/ha. Mit dem Anbau von Getreide als Winterzwischenfrucht könnte auch zur Eindämmung des Ackerfuchsschwanzes beigetragen werden, für dessen Bekämpfung das Wirkungsspektrum der Herbizide aufgrund von Resistenzen regional bereits stark eingeschränkt ist (Wolber 2008). Ackerfuchsschwanz entwickelt sich parallel zu Wintergetreide und samt etwa beim BBCH-Stadium 75 des Getreides aus. Eine frühere Ernte des Getreides könnte daher eine Möglichkeit zur Verhinderung seiner Reproduktion darstellen. Extrem starker Befall ist allerdings auch im Ganzpflanzengetreideanbau zu bekämpfen, da ansonsten erhebliche Mindererträge zu erwarten sind.



GP = Ganzpflanze

Abb. 10 Varianten Zweikulturnutzungssystem (Getreide / Mais / Zuckerhirse)

Ein weiterer Vorteil des Wintergetreideganzpflanzenanbaus besteht in der Bodendeckung über Winter und damit der Verringerung der Erosionsgefahr. Zur Minderung der Gefahr von diversen Phosphoreinträgen in Gewässer aus dem Ackerland ist dies im Rahmen der Europäischen Wasserrahmenrichtlinie eine wirksame Möglichkeit. Da bis 2009 deutschlandweit Maßnahmenprogramme zur Umsetzung der Richtlinie erstellt werden müssen, kann der Energiepflanzenanbau zum Schutz der Grund- und Oberflächengewässer beitragen. Winterzwischenfrüchte, vor allem Grünschnittroggen, Wickroggen und Landsberger Gemenge

oder Ganzpflanzengetreide in Kombination mit den Zweitfrüchten Mais oder Hirse ergeben das Zweikulturnutzungssystem. Die vielfältigen Varianten sind in Abbildung 10 dargestellt. Dabei handelt es sich nur um eine Auswahl der Kombinationen, allerdings aus Sicht der Autoren um die aussichtsreichsten. Die Erträge der Zweikulturnutzung liegen in Abhängigkeit vom Standort um 4 bis 7 t TM/ha über einem Hauptfruchtanbau von Mais oder Hirse.

Bei hohen bzw. steigenden Preisen für landwirtschaftliche Rohstoffe gewinnen derartige Systeme aus betriebswirtschaftlicher Sicht in Bezug auf gleichbleibende Flächenkosten im Anbaujahr gegenüber dem Einkulturnutzungssystem an Bedeutung. Prinzipiell gilt, je trockener der Standort, desto früher ist die Zweitfrucht zu etablieren. Zu beachten ist dabei allerdings, dass Zuckerhirsen erst ab 12 °C Bodentemperatur keimen, ein sehr früher Saattermin somit keine Vorteile hat. Ungeeignet sind Standorte mit extremer Vorsommertrockenheit und leichte Standorte mit einem geringen Wasserspeichervermögen. Auf diesen Standorten besteht dann die Gefahr, dass die Erstkultur den Bodenwasservorrat zu sehr beansprucht. Der Zweitfrucht steht dann bei ausbleibenden Niederschlägen nicht genügend Wasser für eine zügige Jugendentwicklung zur Verfügung.

Diese Aussagen werden durch umfangreiche Beregnungsversuche im EVA-Projekt gestützt (Schittenhelm 2008). Die Mehrerträge durch Zusatzwasser bei Mais und Hirsen in Zweitfruchtstellung liegen deutlich über denen in Hauptfruchtstellung. Eine Zusatzwassermenge über Beregnung ist deshalb vorrangig auf Flächen vorzunehmen, die im Zweikulturnutzungssystem bewirtschaftet werden.

Für die Versorgung von Biogasanlagen, vor allem wenn sie in Besitz der Landwirtschaft sind, können auch Dauerkulturen neben den Fruchtfolgen durchaus sinnvoll sein. Beides, die Dauerkultur und die Biogasanlage sollen möglichst lange in Betrieb sein. Die seit vier Jahren mit Durchwachsener Silphie an zwei Standorten durchgeführten Versuche brachten Erträge zwischen 18 und 28 t TM pro Jahr ab dem 2. Standjahr. Im Anpflanzjahr wird eine Rosette gebildet, erst ab dem 2. Standjahr schosst dann die Pflanze.

Die aufgeführten Erträge (Abbildung 11), liegen etwas über den standorttypischen Maiserträgen. Auch die Methanausbeuten sind mit Mais vergleichbar. Zur Zeit werden weitere Herkünfte an verschiedenen Standorten Deutschlands sowie im Praxisanbau getestet. Sollten sich die Ergebnisse in den nächsten Jahren bestätigen, würde, neben Mais, den Hirsen und Ganzpflanzengetreide, eine weitere interessante Kulturart für Biogasanlagen zur Verfügung stehen.

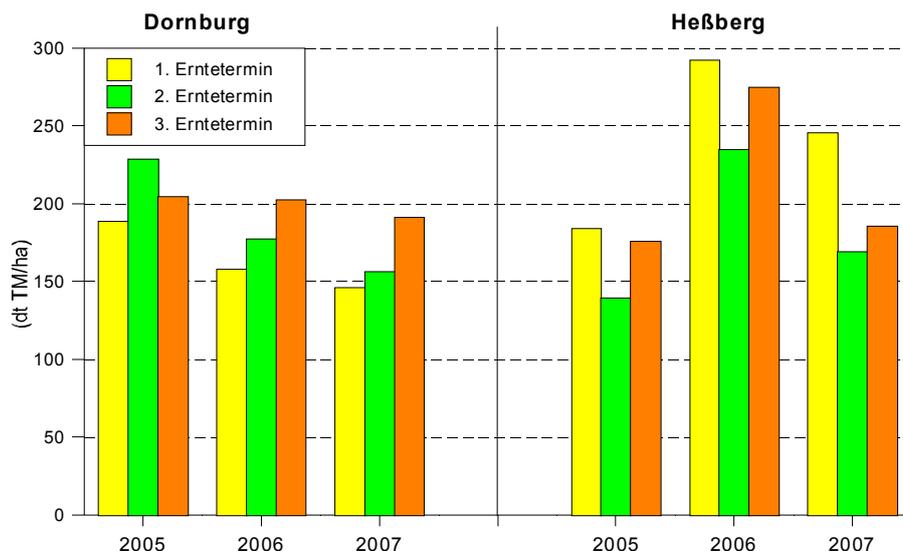


Abb. 11 Trockenmasseerträge der Durchwachsenen Silphie in Abhängigkeit vom Erntetermin

Agroforstsysteme

Eine Kulturlandschaft vereint im Idealfall Nutz-, Schutz- und Erholungsfunktion. All dies in Einklang zu bringen, ist unter den Bedingungen der modernen hochproduktiven Landwirtschaft nur schwer möglich. Daher gilt es einen Konsens zu finden, der die einzelnen Funktionen weitestgehend berücksichtigt. Die Agrarräume sind besonders in den neuen Bundesländern durch ‚ausgeräumte‘ Landschaften mit großen Schlägen geprägt. Windschutzstreifen sind nur in wenigen Regionen Deutschlands in ausreichendem Umfang vorhanden. Infolgedessen verstärken und beschleunigen sich Prozesse, welche einer nachhaltigen Landwirtschaft entgegenwirken. Wind- und Wassererosion werden verstärkt und führen langfristig zu einer Herabsetzung der Qualität der Anbaufläche und somit zur Verringerung der Produktivität dieser Flächen. Enge Fruchtfolgen auf großen Schlägen führen zur starken Einschränkung der Vielfalt der angebauten Kulturen pro Flächeneinheit, wodurch der Ausbreitung von Schädlingen und Krankheiten und der einseitigen Belastung des Bodens Vorschub geleistet wird. Dadurch werden wiederum erhöhte Gaben von Pflanzenschutz- und Düngemitteln nötig.

Die Neuanlage von Feldgehölzen und Biotopverbundsystemen, zum Beispiel in Form von Hecken, findet in der Praxis kaum Anwendung. Dies ist vor allem darin begründet, dass keine Erlöse von diesen Flächen zu erzielen sind und Auflagen im Pflanzenschutz, d. h. Einschränkungen auf der angrenzenden Fläche (Abstände zu Saumbiotopen) zu Ertragsverlusten führen. Für Kurzumtriebsplantagen zur Erzeugung von Energieholz treffen diese Einschränkungen nicht zu. Allerdings sind Kurzumtriebsplantagen eine relativ extensive Form der Landbewirtschaftung, welche daher vorwiegend auf ertragsschwächeren Agrarstandorten zur Anlage kommen werden. Eine Möglichkeit, die vielfältigen Funktionen der Kulturlandschaft in ertragsstarken Gebieten mit geringem Besatz an Landschaftselementen mit einer verstärkten

Produktion biogener Energieträger in Einklang zu bringen, sind Agroforstsysteme. Hierbei werden auf einer Fläche mehrere Produkte von verschiedenen Pflanzenarten gleichzeitig produziert, es findet gleichzeitig eine landwirtschaftliche Nutzung mit laufendem Einkommen und Kapitalbildung in Form von Holzzuwachs an Bäumen statt (Herzog 1994). Vor allem der streifenweise Anbau von Pappeln technologisch bedingt auf 12 m breiten Streifen abwechselnd mit einer mit annuellen Kulturen bestellten Fläche mit einer Breite des Vielfachen von 12 m werden als aussichtsreiches System angesehen. Die Erprobung erfolgt gegenwärtig auf vier Standorten der Bundesrepublik.

LITERATUR

- Herzog F (1997). Stand der agroforstlichen Forschung in West- und Mitteleuropa. *Z. f. Kulturtechnik und Landentwicklung* 4 (38), 145-148.
- Schittenhelm S (2008). Persönliche Mitteilung.
- Wolber D (2008). Landwirtschaftskammer Hannover (www.lwk-niedersachsen.de).
- Zeddies J (2008). Globale Märkte - Zukünftige Rahmenbedingungen für die Landwirtschaft. Agrarpotenziale nutzen! *Herausforderung für Landwirte und Gesellschaft, DLG-Wintertagung, Band 102*, 37-48.
- Zimmer Y; *et al.* (2008). Klima- und energiepolitische Analyse ausgewählter Bioenergie-Linien. FAL: Braunschweig.

Pawelzik E, Theuvsen L: Pflanzenproduktion bei steigenden Qualitätsanforderungen. In: Tiedemann A v, Heitefuss R, Feldmann F (2008): Pflanzenproduktion im Wandel – Wandel im Pflanzenschutz, ISBN 978-3-941261-00-6; 32-44. © Deutsche Phytomedizinische Gesellschaft, Braunschweig, Germany

Pflanzenproduktion bei steigenden Qualitätsanforderungen

E Pawelzik

*Department für Nutzpflanzenwissenschaften (DNPW) der Georg-August-Universität Göttingen;
Carl-Sprengel-Weg 1, 37075 Göttingen; Email: epawelz@gwdg.de*

L Theuvsen

*Department für Agrarökonomie und Rurale Entwicklung der Georg-August-Universität
Göttingen; Platz der Göttinger Sieben 5, 37073 Göttingen; Email: theuvsen@uni-goettingen.de*

ZUSAMMENFASSUNG

Die Qualitätsanforderungen bei pflanzlichen Produkten unterliegen, bedingt durch globale Veränderungen auf ökonomischer und politischer Ebene bzw. durch ein erhöhtes Umwelt-, Gesundheits- und Ernährungsbewusstsein sowie weiterer Faktoren einem immer stärkeren dynamischen Wandel, auf den in den einzelnen Gliedern der Wertschöpfungskette reagiert werden muss. Vor dem Hintergrund des Bedürfnisses nach sicheren Lebensmitteln einerseits und sich ändernden wirtschaftlichen Rahmenbedingungen im Bereich der Pflanzenproduktion andererseits, die diesen Anspruch gefährden können, wie am Beispiel Fusarienentwicklung und Mykotoxinbildung aufgezeigt, ergeben sich sehr komplexe Anforderungen an einzelne Bereiche der Wertschöpfungskette, wie Züchtung, Pflanzenproduktion und insbesondere den Pflanzenschutz. Aufgrund der zunehmenden Einbeziehung von durch den Konsumenten nicht ohne weiteres nachprüfbaren Qualitätsparametern und im Interesse des Verbraucherschutzes sind Zertifizierungssysteme und Produktkennzeichnungen etabliert, die Rückverfolgbarkeit ermöglicht bzw. verbessert sowie die Dokumentationspflichten innerhalb der Wertschöpfungskette ausgeweitet worden. Diese Erfordernisse werden, wie am Beispiel einer Befragung von Landwirten zur Dokumentation der Anwendung von Pflanzenschutzmitteln aufgezeigt, zunehmend in der Praxis akzeptiert und es werden außerdem eigene Vorteile für z.B. die Sicherung des Konsumentenvertrauens und die internationale Wettbewerbsfähigkeit der deutschen Landwirtschaft erkannt.

PRODUKTQUALITÄT IM SPANNUNGSFELD DER KONSUMENTENANSPRÜCHE

Auffassungen über die Qualität von landwirtschaftlichen Produkten unterliegen aufgrund des Wertewandels in der Gesellschaft permanenten Veränderungen. Der Qualitätsbegriff aus Sicht des Konsumenten umfasst intrinsische und extrinsische Indikatoren. In der Reihenfolge der intrinsischen Qualitätsindikatoren stehen die Produktsicherheit und der Nährwert an erster Stelle, gefolgt von sensorischen Eigenschaften und Haltbarkeit sowie der Produktzuverlässigkeit und Convenience, während zu den extrinsischen Indikatoren die Prozessqualität, damit verbundene Umweltaspekte sowie das Marketing gezählt werden (Luning *et al.*, 2002).

Charakteristisch ist, dass alle wesentlichen Glieder der Wertschöpfungskette in die Qualitätsbeurteilung einbezogen werden (u.a. Huyskens-Keil & Schreiner, 2003) und dass Ernährungsgewohnheiten, Lebensmitteltrends sowie globale Veränderungen die Qualitätsbeurteilung beeinflussen und einzelne intrinsische und/ oder extrinsische Qualitätsaspekte besonders hervorheben können. Dies betrifft gegenwärtig z.B. einzelne wertgebende Inhaltsstoffe, wie bioaktive Substanzen, die Nachhaltigkeit von Anbaumethoden, die Herkunft der Rohstoffe, den Grad der Verarbeitung und zunehmend auch das Ausmaß der Umweltbelastung durch den Transport („*food miles*“). Generell verdichten sich die Qualitätsanforderungen innerhalb der Wertschöpfungskette und werden vom Konsumenten im Sinne des Endverbrauchers als komplexe Merkmale formuliert (Tabelle 1).

Gründe für die Weiterentwicklung des Qualitätsverständnisses, insbesondere auf Konsumentenebene, sind vor allem in folgenden Bereichen zu sehen:

Eine stärkere und bewusste Wahrnehmung des Zusammenhanges von Ernährung und Gesundheit sowie ein erhöhtes Umweltbewusstsein führen beim Konsumenten zu einem zumindest partiell sich ändernden Ernährungsverhalten (Rechkemmer, 2001). Erhöhtes Umweltbewusstsein äußert sich u. a. im Hinterfragen von Art bzw. Nachhaltigkeit der Produktion (ökologisch/konventionell), der Herkunft von Rohstoffen oder Verarbeitungsprodukten (Regionalität, Überregionalität usw.), der Art des Transportes bzw. Länge des Transportweges (Demmeler & Burdick, 2005).

Bei verarbeiteten Lebensmitteln sind sowohl eine steigende Nachfrage nach als auch eine Ablehnung von Convenience-Produkten zu beobachten. Ein erhöhter Bedarf an Convenience-Produkten ist vor allem begründet durch zunehmend kleine Haushaltsgrößen, keine bzw. nur geringe Bereitschaft zur Nahrungsmittelzubereitung und dem Bedürfnis nach Mobilität, während eine Ablehnung vor allem aus einer Unklarheit über verarbeitungsbedingte Nebenprodukte, Zusatzstoffe sowie einen hohen Verarbeitungsgrad resultiert.

Ein weiterer Aspekt berührt die ethische Ebene dahingehend, dass Konsumenten bedenklich bzw. ablehnend auf die Verwendung von Nahrungspflanzen für die Bioenergieerzeugung bei gleichzeitiger globaler Verknappung und Verteuerung von Nahrungsmitteln reagieren.

Insbesondere die gegenwärtigen dynamischen Veränderungen auf globaler Ebene, die zunehmende Verknappung von Ressourcen und die sich daraus ergebenden Anforderungen an eine effiziente und nachhaltige Flächennutzung (Alrøe & Kristensen, 2006) können als mögliche Triebkräfte für sich ständig wandelnde Qualitätsansprüche identifiziert werden. Daneben werden weitere gesellschaftliche Entwicklungen (z.B. zunehmende Sensibilisierung für Umweltaspekte), demographische Veränderungen und sich ändernde soziale Strukturen, ein zunehmendes Bewusstsein für den Zusammenhang zwischen Ernährung und Gesundheit Qualitätsanforderungen beeinflussen und prägen.

Tabelle 1 Aspekte der Qualität in der Wertschöpfungskette pflanzlicher Produkte (in Anlehnung an Huyskens-Keil & Schreiner, 2003, ergänzt)

Glieder der Wertschöpfungskette	Qualitätsebene	Qualitätsindikatoren (Beispiele)
Züchtung	Produkt: Bedarf des Marktes, landeskultureller Wert	wertgebende Inhaltsstoffe, Resistenzen, Ertrag
Landwirtschaftliche Produktion	Produkt: Bedarf des Marktes	Ertrag, Krankheitsresistenz, äußere Merkmale, wertgebende Inhaltsstoffe (z.B. Proteingehalt)
	Prozess: Art der Produktion (integriert/ökologisch)	Nitratgehalt des Grundwassers
Verarbeitung	Produkt: Eignung für Verarbeitung	innere Merkmale (Inhaltsstoffe), Sensorische Merkmale, Nähr- und Gesundheitswert
	Prozess: Umweltaspekte	Energie- und Wasserverbrauch, Anfall von Neben- und Nachprodukten
Handel (Groß- und Einzelhandel)	Produkt	äußere Merkmale, Unversehrtheit, Verfügbarkeit
Konsument	Produkt: Eignung für Konsum	Rückstände und Kontaminanten, Nähr- und Gesundheitswert, sensorische Merkmale, Haltbarkeit bzw. Frische, Herkunft
	Prozess: Art der Produktion (integriert/ökologisch) der Rohstoffe, Art der Verarbeitung, Art und Ausmaß des Transportes	Verarbeitungsgrad, Art und Menge an Zusatzstoffen

SPEZIELLE ASPEKTE DER LEBENSMITTELSICHERHEIT UND DARAUS RESULTIERENDE ANFORDERUNGEN AN DIE PFLANZENPRODUKTION, EINSCHLIEßLICH DEN PFLANZENSCHUTZ

Das Bedürfnis nach sicheren Lebensmitteln steht beim Konsumenten an erster Stelle seiner Erwartungen an die Qualität. Dies ist auch mit der Erwartung verbunden, dass pflanzliche Nahrungsmittel keine gesundheitlich bedenklichen Rückstände, wie toxische Verbindungen und Pflanzenschutzmittel, enthalten.

In der Pflanzenproduktion ist allgemein, vor allem aus wirtschaftlichen Gründen, eine fortschreitende Einengung der Fruchtfolge u.a. zugunsten von Winterweizen zu beobachten. Diese Tendenz sowie der verstärkte Anbau von Mais zur Biogaserzeugung führen zu neuen Anforderungen an alle Bereiche der Pflanzenproduktion, jedoch insbesondere an den Pflanzenschutz sowie die nachgelagerten Bereiche und die Lebensmittelindustrie. Im Ergebnis einer Einengung der Fruchtfolge kann es zu einer phytopathologisch bedenklichen Anreicherung toxinbildender Pathogene, insbesondere von *Fusarium*-Arten kommen (Krupinsky *et al.*, 2002; Obst *et al.*, 2000), die eine Verwertung der Ernteprodukte in der Futter- und Lebensmittelkette erschweren oder sogar unmöglich machen. Vor diesem Hintergrund ist mit veränderten Belastungssituationen des Erntegutes bezüglich Mykotoxinen zu rechnen, die durch den zunehmenden Maisanbau und die möglicherweise daraus resultierende verbundene spezifische Übertragung pilzlicher Erkrankungen z.B. in Weizen und Zuckerrüben noch verstärkt werden und dadurch zu bisher unbekanntem Schadensausmaß führen können.

Mykotoxine, die infolge von Primärkontamination entstehen, sind aufgrund ihrer chemischen Stabilität innerhalb der gesamten Nahrungskette präsent und stellen somit eine permanente Problematik der Futter-, Lebensmittel- und Ernährungsqualität dar (u.a. Prange *et al.*, 2005; Matthäus *et al.*, 2004).

FAO-Schätzungen gehen davon aus, dass die jährlich weltweit durch Mykotoxinkontamination verursachten Verluste bei der Produktion von Nahrungsmitteln etwa 750 Mio. Euro betragen (European Technology Plattform, 2007).

Bei einer in der EU durchgeführten Datenerhebung zum Vorkommen von Fusarientoxinen in pflanzlichen Rohstoffen und Verarbeitungsprodukten, an der sich elf Länder beteiligten, wurde ermittelt, dass Mais und Maisprodukte, abgesehen von einer Ausnahme, am häufigsten mit Fusarientoxinen kontaminiert waren, gefolgt von Weizen und Weizenprodukten (Tabelle 2), wobei Deoxynivalenol und Zearalenon als dominierende Mykotoxine auftraten.

Tabelle 2 Übersicht zum Vorkommen von Fusarientoxinen in pflanzlichen Produkten in der Europäischen Union (Gareis *et al.*, 2003)

Fusariumtoxin	Kontaminierte Produkte/Produktgruppe (Anteil kontaminierter Proben der jeweiligen Produkte/Produktgruppe, %)
Deoxynivalenol	Mais (89), Weizen und Weizenmehl (61)
Nivalenol	Mais (35), Hafer (21), Weizen und Weizenmehl (14)
T-2 Toxin	Mais (28), Weizen (21), Hafer (21)
HT-2 Toxin	Hafer (41), Mais (24), Roggen und Roggenmehl (17)
3-Acetyldeoxynivalenol	Mais (27), Weizen und Weizenmehl (8)
Zearalenon	Mais (79), Maismahlfraktionen (51), maisbasierte Produkte (53), Weizen (30), Weizenmahlfraktionen (24), weizenbasierte Produkte (11), Baby-Nahrung (23)
Fumonisin B ₁	Mais (66), Maismehl (79), maisbasierte Produkte (31), Cornflakes (46), Weizen (79)
Fumonisin B ₂	Mais (51)

Obwohl die Aufnahmemengen von Fusarientoxinen mit der Nahrung in der Regel deutlich unter den TDI-Werten (Tolerable Daily Intake, µg/kg Körpergewicht/Tag) lagen, konnten dennoch bei Risikogruppen, wie Säuglingen und Kindern, in Einzelfällen Aufnahmeeraten ermittelt werden, die in der Nähe von TDI-Werten lagen oder diese sogar überschritten (Gareis *et al.*, 2003).

Die Vielzahl von Interaktionen, die auf das Vermehrungspotential von Fusarien und damit die Bildung von Mykotoxinen einwirken (z.B. Witterungsabhängigkeit, Standortfaktoren, Sorten und pflanzenbauliche Maßnahmen), sowie die potentielle und reale Gefahr der Anreicherung von Mykotoxinen in der Nahrungskette, u.a. aufgrund ihrer chemischen Stabilität, erfordern daher zwingend Strategien zur Risikominimierung des Fusarienbefalls und damit zur Vermeidung der Mykotoxinbildung. Diese betreffen zunächst die Züchtung von Sorten mit hohem Resistenzpotential gegenüber Fusarien und anderen Mykotoxin bildenden Pilzen. Weitere Strategien beinhalten die Anwendung von Fruchtfolgen und Bodenbearbeitungsmaßnahmen mit geringem Risikopotential sowie von effektiven Fungiziden bzw. Prognosemodellen für die Anwendung von Fungiziden (Backhaus & Gattermann, 2008). Insbesondere an den Fungizideinsatz selbst werden hohe Anforderungen gestellt: die Fungizide können zur Sicherung ihrer Wirksamkeit nur innerhalb eines relativ schmalen Zeitfensters während der Vegetation ausgebracht werden und sie dürfen in der Pflanze selbst keine physiologischen Wirkungen haben, die u.U. das Pilzwachstum und die Mykotoxinproduktion anregen. Aus Konsumentensicht wird darüber hinaus erwartet, dass keine Rückstandsbildung im Erntegut bzw. keine weitere Qualitätsbeeinflussung der daraus hergestellten Lebensmittel erfolgt. Untersuchungen an Weizen, der mit Blatt- und Ährenfungiziden behandelt worden war, konnten keine nachteiligen Wirkungen auf die Backqualität bei Weizen nachweisen (Wang *et al.*, 2004).

NACHWEIS DER QUALITÄT PFLANZLICHER PRODUKTE

An die Produkt- und Prozessqualität pflanzlicher Produkte werden zunehmend Anforderungen gestellt, deren Erfüllung Käufer nicht oder nur unter Inkaufnahme unverhältnismäßig hoher Kosten überprüfen können (Jahn *et al.*, 2005); Beispiele sind u.a. Rückstands- und GVO-Freiheit, regionale Herkunft und ökologische Erzeugung. Derartige Vertrauenseigenschaften haben Informationsasymmetrien zwischen Verkäufern, die vielfach wissen, ob bestimmte Produkt- oder Prozessqualitäten vorliegen, und Käufern, denen diese Kenntnis fehlt, zur Folge. Informationsasymmetrien können Marktversagen auslösen, wenn die Nachfrager aus Angst vor Übervorteilung die Produkte nicht mehr kaufen (Akerlof, 1970). Da es sich bei Lebensmitteln um sog. „notwendige Güter“ mit sehr unelastischer Nachfrage handelt (Hardes & Uhly, 2007), kann es aber auch zur gesundheitlichen oder finanziellen Schädigung der Verbraucher kommen, etwa, wenn sie mit Kontaminanten belastete Produkte erwerben oder konventionelle Waren als Ökoprodukte ausgegeben werden. Anbieter von Produkten mit Vertrauenseigenschaften haben ein Interesse daran, die Qualität ihrer Produkte glaubwürdig zu kommunizieren, um Marktversagen zu verhindern. Der Staat wiederum bemüht sich im Interesse des Verbraucherschutzes darum, Gefahren für die menschliche Gesundheit abzuwehren sowie Täuschung und Irreführung der Verbraucher zu verhindern (Theuvsen, 2007). Zentrale Ansätze sind in diesem Zusammenhang der Aufbau von Zertifizierungssystemen und die Lebensmittelkennzeichnung (Labelling), die Verbesserung der Rückverfolgbarkeit sowie die Ausweitung der Dokumentationspflichten.

Zertifizierungssysteme und Labelling

Ein Zertifizierungssystem ist dadurch gekennzeichnet, dass auf der Grundlage eines durch einen Standardsetzer formulierten Zertifizierungsstandards externe Kontrollen der zu zertifizierenden Betriebe durch unabhängige, akkreditierte Prüfinstitute erfolgen (Meuwissen *et al.*, 2003). Die Kontrollen werden regelmäßig und – sofern erforderlich – zusätzlich fallweise bzw. stichprobenartig auf einzelnen oder allen Stufen der Wertschöpfungskette durchgeführt.

Charakteristisch für das Agribusiness ist die Formulierung branchen-, in vielen Fällen sogar produktspezifischer Zertifizierungsstandards. Dadurch wird die durch die ISO 9000-Familie ursprünglich eingeleitete Hinwendung zu branchenneutralen Standards konterkariert (Spiller, 2004) mit der Folge, dass die Zahl der in der europäischen Agrar- und Ernährungswirtschaft implementierten Zertifizierungsstandards in den letzten Jahren stark angewachsen ist. Eine im Sommer, 2006 durchgeführte Untersuchung hat ergeben, dass in Deutschland für pflanzliche Produkte und aus ihnen erzeugte Lebensmittel rund 35 Zertifizierungsstandards existieren, die sich hinsichtlich Träger (z.B. Staat, Abnehmer, Lieferanten, Zertifizierer, Normierungsinstitutionen usw.), Adressaten (Verarbeiter, Handel, Verbraucher), Fokus (Systeme, Prozesse, Produkte), Zielen (Absicherung von Mindeststandards oder Produktdifferenzierung), geographischer Ausdehnung (von lokal bis global), Teilnehmerzahl (von wenigen hundert bis zu mehreren Zehntausend) sowie Zahl der einbezogenen Wertschöpfungsstufen erheblich voneinander unterscheiden (Tabelle 3; Theuvsen *et al.*, 2007a). Nicht berücksichtigt wurden bei

Tabelle 3 Zertifizierungssysteme für pflanzliche Produkte und Lebensmittel (ohne Garten-, Obst- und Weinbau; Quelle: Theuvsen *et al.*, 2007b)

Biokreis	Geprüfte Qualität Baden-Württemberg	ISO 22000
Bioland	Geprüfte Qualität Bayern	Kontrolliert Integrierte Produktion (KIP) / Neutral Kontrollierter Vertragsanbau (KVA)
Biopark	Geprüfte Qualität Hessen	Landgard
Biosiegel	Geprüfte Qualität Thüringen	Lebensbaum
Bio-Zeichen Baden-Württemberg	Geschützte geographische Angabe (g. g. A.)	Lebensmittel TÜV geprüft
Basisqualität Ackerbau (BQ) / Basis-Qualitätsmanagement (BQM)	Geschützte Ursprungsbezeichnung (g. U.)	Naturland
CMA geprüfte Markenqualität	GlobalGAP	Öko-Qualität aus Bayern
Demeter	Good Manufacturing Practice (GMP ⁺)	Qualitätserzeugnis pro agro geprüft
European Feed Manufacturers' Guide (EFMC)	Hergestellt und geprüft in Schleswig Holstein	Qualität und Sicherheit (QS)
European Feed Additives and Premixtures Quality System (Fami-QS)	IFSA Feed Ingredients Standard (IFIS)	Transfair
Fresenius Qualitätssiegel	International Food Standard (IFS)	Unser Land
Gäa	ISO 9001	

dieser Zählung Garten-, Obst- und Weinbau sowie Systeme, die bislang in Deutschland nicht genutzt werden; dies gilt etwa für die garantierten traditionellen Spezialitäten (g. t. S.) gemäß Verordnung (EG) Nr. 509/2006. Führend im Bereich der Pflanzenproduktion sind gegenwärtig Qualität und Sicherheit (QS), GlobalGAP sowie die verschiedenen ökologischen Standards. In jüngerer Zeit sind angesichts der Vielzahl der Standards Anstrengungen unternommen worden, durch ein Benchmarking der Kriterien verschiedener Standards, etwa im Rahmen der Global Food Safety Initiative, oder die wechselseitige Anerkennung von Audits, bspw. des GlobalGAP-Audits durch QS, Betrieben Mehrfachauditierungen zu ersparen.

Sollen Zertifizierungssysteme die in sie gesetzten Erwartungen im Hinblick auf die Kommunikation von Vertrauenseigenschaften erfüllen, ist ihre Glaubwürdigkeit von zentraler Bedeutung. Letzere wird bestimmt durch die Unabhängigkeit und Fachkompetenz der Auditoren, die durch das jeweilige Zertifizierungssystem gesetzten Anreize zu qualitativ hochwertigen und neutralen Audits, die Kontrollintensität von Betrieben und Auditoren sowie die eingesetzte Kontrolltechnologie, etwa die Durchführung datenbankgestützter Plausibilitätskontrollen (Jahn *et al.*, 2005). Die „Kontrolle der Kontrolle“ und die Ausbildung der Auditoren genießen daher bei allen führenden Zertifizierungsstandards hohe Priorität.

Hat ein Betrieb das mit der Zertifizierung verbundene neutrale Audit erfolgreich absolviert, wird ihm ein Zertifikat verliehen, das speziell in Märkten, die aufgrund von Vertrauenseigenschaften durch Qualitätsunsicherheiten geprägt sind, als Qualitätssignal gegenüber Abnehmern verwendet werden kann (Luning *et al.*, 2002). Dies geschieht z. T. auch gegenüber Endverbrauchern durch Abdruck auf der Produktverpackung. Üblich ist dieses Labelling bei Zertifizierungssystemen, die der Produktdifferenzierung zwecks Durchsetzung höherer Preise dienen (z. B. Öko-Standards), doch findet es sich teilweise auch bei Systemen, die lediglich Mindeststandards absichern wollen; ein Beispiel ist das QS-Zeichen (Theuvsen *et al.*, 2007b).

Unabhängig von Zertifizierungsstandards haben Produktkennzeichnungen eine lange Tradition, da Hersteller ein Interesse daran haben, ihre Erzeugnisse zu markieren, um sie von konkurrierenden Produkten abzuheben. Seit Verabschiedung des Gesetzes über den Verkehr mit Nahrungsmitteln, Genussmitteln und Gebrauchsgegenständen vom 15. Mai 1879 sind Lebensmittelkennzeichnungen zudem wesentliches Element des staatlichen Verbraucherschutzes (Grüne, 1994). Heute ist die Lebensmittel-Kennzeichnungsverordnung (LMKV) die zentrale Vorschrift für die Kennzeichnung von Lebensmitteln, die in Fertigpackungen an Endverbraucher abgegeben werden. Gesetzlich vorgeschriebene Mindestangaben auf verpackten Lebensmitteln sind – vereinfachend gesagt – die Verkehrsbezeichnung, der Name und die Anschrift des Herstellers, Verpackers oder Verkäufers, ein Verzeichnis der Zutaten, das Mindesthaltbarkeitsdatum, die Füllmenge, die Losnummer und der Preis, wobei letzterer auch in Produktnähe am Regal angebracht sein kann.

Seit einigen Jahren werden Produktkennzeichnungen verstärkt zur Erreichung politischer Ziele eingesetzt. DG SANCO (2006) etwa verfolgt das Ziel eines „labelling which will provide consumers with necessary information to enable them to make safe, healthy and sustainable choices.“ Als zentrale Handlungsfelder wurden u. a. *nutrition*, *origin* und *GMO labelling* identifiziert. Dementsprechend wurden bspw. die Allergen- (Richtlinie, 2007/68/EG) und die GVO-Kennzeichnung (vgl. etwa den Hinweis „ohne Gentechnik“ gemäß § 3a des EG-Gentechnik-Durchführungsgesetzes) sowie die Gesetzgebung zu Nährwert- und gesundheitsbezogenen Angaben über Lebensmittel (Verordnung (EG) 1924/2006) weiterentwickelt. Inzwischen wurden Darstellungsvorschläge für erweiterte Nährwertinformationen auf Verpackungen unterbreitet, die für Kalorien, Zucker, Fett, gesättigte Fettsäuren und Kochsalz Angaben in absoluten Zahlen sowie

in % der Richtwerte für die Tageszufuhr vorsehen (BMELV, 2008). Dass im Hinblick auf die Kennzeichnung von Lebensmitteln weitere Entwicklungen zu erwarten sind, zeigen erste Ansätze des „CO₂-Labelling“ (Höfinghoff, 2008).

Rückverfolgbarkeit

Folgt man Art. 3 Nr. 15 der Lebensmittel-Basisverordnung (EG) 178/2002, so ist Rückverfolgbarkeit „die Möglichkeit, ein Lebensmittel oder Futtermittel ... durch alle Produktions-, Verarbeitungs- und Vertriebsstufen zu verfolgen“. Rückverfolgbarkeit ist im Bereich pflanzlicher Produkte teilweise mit besonderen technischen Problemen verbunden (Beplate-Haarstrich *et al.*, 2007). Nach Art. 18 VO (EG) 178/2002 müssen alle Lebensmittel- und Futtermittelunternehmer, auch Landwirte, in der Lage sein, ihre Lieferanten und Abnehmer zu identifizieren und über ein geordnetes Wareneingangs- und -ausgangssystem die Nachvollziehbarkeit des Warenflusses zu gewährleisten. Die Verordnung wird allgemein dahingehend interpretiert, dass die Verpflichtung zur Sicherstellung der Rückverfolgbarkeit sich nur auf die jeweils vor- bzw. nachgelagerte Wertschöpfungsstufe bezieht („one step up – one step down“). Über die Lebensmittel-Basisverordnung hinaus finden sich weitere rechtliche Vorschriften, die die Rückverfolgbarkeit von Agrarprodukten und Lebensmitteln berühren. Von ihnen sind tierische Produkte allerdings insgesamt stärker berührt als die Pflanzenproduktion; verwiesen sei beispielhaft auf die Vorschriften zur Tierkennzeichnung (Hollmann-Hespos, 2008).

Neben rechtlichen Vorschriften gibt es weitere Gründe für die Einrichtung von Rückverfolgbarkeitssystemen. So unterstützt eine lückenlose Rückverfolgbarkeit die glaubwürdige Kommunikation von Vertrauenseigenschaften und findet daher in fast allen Zertifizierungsstandards sowie im Zuge der Umsetzung von Differenzierungsstrategien für pflanzliche Produkte Berücksichtigung. Rückverfolgbarkeitssysteme sind zudem zentrale Bausteine betrieblicher Risikomanagementsysteme sowie des inner- und zwischenbetrieblichen Prozessmanagements (Hollmann-Hespos & Theuvsen, 2007; Hollmann-Hespos, 2008).

Empirische Untersuchungen zeigen, dass betriebliche Investitionen in Rückverfolgbarkeitssysteme wesentlich davon abhängen, wie stark Betriebe den Druck namentlich von Abnehmern zur Einrichtung entsprechender Systeme wahrnehmen, welche Nutzen sie den Systemen z.B. im Rahmen des Risiko- oder des Prozessmanagements beimessen und wie stark die positiven Imagewirkungen sind, die sie sich von entsprechenden Investitionen erhoffen. Die Kosten der entsprechenden Systeme beeinflussen die Investitionsentscheidungen dagegen nicht signifikant (Hollmann-Hespos, 2008). Darüber hinaus wurde deutlich, dass sich die Unternehmen hinsichtlich der entsprechenden Einschätzungen erheblich voneinander unterscheiden (Hollmann-Hespos & Theuvsen, 2007).

Dokumentationsanforderungen: Das Beispiel Pflanzenschutz

Neben internen Motiven, etwa der Durchführung betriebswirtschaftlicher Auswertungen, bestehen zunehmend gesetzliche oder andere von Dritten veranlasste Verpflichtungen zum Führen von Aufzeichnungen über ausgebrachte Produktionsmittel, speziell solche, die potenziell Umweltwirkungen haben, z.B. Pflanzenschutzmittel (Steinmann *et al.*, 2008).

Die die Lebensmittel-Basisverordnung VO (EG) 178/2002 flankierenden Verordnungen (EG) 852/2004 und 183/2005 verlangen von Produzenten von Lebens- und Futtermitteln, über die Verwendung von Pflanzenschutzmitteln und Bioziden Buch zu führen. Eine gesetzliche Pflicht zur Aufzeichnung von Pflanzenschutzanwendungen sah in Deutschland erstmals das Naturschutzgesetz von, 2002 vor; auch wurde die schlagspezifische Dokumentation Element der guten fachlichen Praxis. Diese Regelungen wurden durch die am 12. März 2008 verkündete Änderung des Pflanzenschutzgesetzes abgelöst. Seitdem ist die Dokumentationspflicht der durchgeführten Pflanzenschutzmaßnahmen in § 6 Abs. 4 des Pflanzenschutzgesetzes eindeutig und verbindlich geregelt. Spezielle Dokumentationspflichten können sich im Geltungsbereich regionaler Schutzverordnungen, wie sie u.a. im Zuge der Ausweisung von Wasserschutzgebieten erlassen werden, ergeben.

Privatrechtlich begründete Aufzeichnungspflichten der Landwirte bestehen vielfach gegenüber Handelspartnern, die speziell im Getreide- und Zuckerbereich Vorkehrungen getroffen haben, um die entsprechenden Dokumentationen einfordern oder bei Bedarf Zugang zu den Daten erhalten zu können. Auch Zertifizierungssysteme wie GlobalGAP und QS sehen die Dokumentation des Pflanzenschutzmitteleinsatzes vor. Schließlich können freiwillige Vereinbarungen im Rahmen von Agrarumwelt- und Wasserschutzprogrammen zu Aufzeichnungspflichten führen (Steinmann *et al.*, 2008).

Eine schriftliche Befragung im Sommer 2006 in Südniedersachsen, an der sich 581 Landwirte beteiligten, ergab, dass über 96 % der Landwirte ihre Pflanzenschutzanwendungen aufzeichnen; ihren Informationsstand über die Dokumentationspflichten schätzten die Befragten als sehr gut ein. Dabei werden das Datum der Anwendung, der Anwendungsort, die Kultur bzw. das Pflanzenerzeugnis, die Bezeichnung des Pflanzenschutzmittels sowie die Aufwandmenge von jeweils mehr als 90 % der befragten Betriebe festgehalten. Der Name des Anwenders wird nur von gut jedem dritten, der Schadorganismus nur von knapp jedem vierten Betrieb dokumentiert, obwohl dies guter fachlicher Praxis entspräche. Die Dokumentationspflichten werden von über 85 % der Befragten mit Hilfe handschriftlicher Schlagkarteien oder von PC-Schlagkarteien, in die die Daten per Hand eingegeben werden, erfüllt. 6,4 % der Befragten erfassen ihre Daten per PDA, 1,7 % nutzen teil- oder vollautomatisierte Verfahren. Die Investitionen in die Dokumentationstechnik beliefen sich um Durchschnitt der befragten Betriebe auf gut 1.000 €, der laufende Aufwand liegt im Mittel bei knapp 582 € pro Jahr bzw. 3,58 €/ha LF und Jahr. Der Zeitaufwand wird mit durchschnittlich 37,5 Stunden pro Jahr bzw. 15,26 Minuten/ha LF und Jahr angegeben (Battermann *et al.*, 2008).

Die Untersuchung zeigte, dass nur rund 12 % der befragten Landwirte die Dokumentationspflichten grundsätzlich ablehnen. Die übrigen Landwirte sind nicht durchweg vorbehaltlose Befürworter, vermögen jedoch zumindest einzelne positive Aspekte der Dokumentationspflichten zu erkennen. Vor allem das den entsprechenden Pflichten am positivsten gegenüberstehende gute Viertel der Landwirte betont die Vorteile der Dokumentation im Hinblick auf die Sicherung des Verbrauchervertrauens, die internationale Wettbewerbsfähigkeit sowie die selbstbewusste Darstellung der Landwirtschaft nach außen (Battermann *et al.*, 2008). Für diese Einschätzung scheinen steigende Anforderungen an die Prozessqualitäten eine maßgebliche Rolle zu spielen.

LITERATUR

- Akerlof G A (1970). The Market for ‚Lemons‘: Quality Uncertainty and the Market Mechanisms. In: *Quarterly Journal of Economics* **84**, 488-500.
- Alrøe H F; Kristensen E S (2006). Organic Agriculture in a Global Perspective. In: *Building Sustainable Communities: Ecological Justice and Global Citizenship*, eds J D Wulfhorst, A K Haugestad, pp. 131-144.
- Backhaus G F; Gattermann C (2008). Moderne Methoden für gesunde Pflanzen und sichere Produkte. *ForschungsReport* **2008**, 14-17.
- Battermann H W; Steinmann H-H; Theuvsen L (2008). Einzelbetrieblicher Umgang mit Dokumentationspflichten im Pflanzenschutz: Eine empirische Erhebung. In: *Agrarwirtschaft* **57**, 286-297.
- Beplate-Haarstrich L; von Hörsten D; Lücke W (2007). Einsatz von RFID-Transpondern zur Rückverfolgbarkeit pflanzlicher Produkte. In: eds S Böttinger, L Theuvsen, S Rank, M Morgenstern, pp. 27-30. Bonn.
- BMELV (Hrsg.) (2008). Eckpunkte für einen Leitfaden für erweiterte Nährwertinformationen auf Lebensmittelverpackungen bzw. -etiketten. o.O.
- Demmeler M; Burdick B (2005). Energiebilanz von regionalen Lebensmitteln. In: *Der kritische Agrarbericht*, eds Agrarbündnis e.V. pp. 182-188.
- DG SANCO (2006): Labelling: Competitiveness, Consumer Information and Better Regulation for the EU. Consultative Document, Februar 2006.
- European Technology Platform Plants for the Future (2007). Strategic Research Agenda 2025, Part II, 27. Juni 2007, S. 9.
- Gareis M; Zimmermann C; Schothorst R; Paulsch W; Vidnes A; Bergsten C; Paulsen B; Brera C; Miraglia M; Grossi S; Debegnach F (2003). Collection of Occurrence Data of *Fusarium* Toxins in Food and Assessment of Dietary Intake by the Population of EU Member States. *Reports on Tasks for Scientific Cooperation, Task 3.2.10, Directorate-General Health and Consumer Protection*, p. 6.

- Grüne J (1994). Anfänge staatlicher Lebensmittelüberwachung in Deutschland. Stuttgart.
- Hardes H-D; Uhly A (2007). Grundzüge der Volkswirtschaftslehre. 9. Aufl. München und Wien.
- Höfinghoff, T (2008). Der Mensch als CO₂-Emittent. www.faz.net; Zugriffsdatum: 9. April 2008.
- Hollmann-Hespos T (2008). Rückverfolgbarkeitssysteme in der Ernährungswirtschaft. Eine empirische Untersuchung des Investitionsverhaltens deutscher Unternehmen. Hamburg.
- Hollmann-Hespos T; Theuvsen L (2007). Determinanten von Investitionen in Rückverfolgbarkeitssysteme: Ergebnisse einer empirischen Untersuchung in der deutschen Ernährungsindustrie. In: *Agrarinformatik im Spannungsfeld zwischen Regionalisierung und globalen Wertschöpfungsketten*, eds S Böttinger, L Theuvsen, S Rank, M Morgenstern, pp. 95-99. Bonn.
- Huyskens-Keil S; Schreiner M (2003). Quality of Fruits and Vegetable. In: *Journal of Applied Botany*, **77**, 141-151.
- Jahn G; Schramm M; Spiller A (2005). The Reliability of Certification: Quality Labels as a Consumer Policy Tool. In: *Journal of Consumer Policy*, **28**, H 1, 53-73.
- Krupinsky J M, Bailey K L, McMullen M P; Gossen B D; Turkington T K (2002). Managing Plant Disease Risk in Diversified Cropping Systems. In: *Agronomy Journal*, **94**, 198-209.
- Luning, P A, Marcelis W J; Jongen W M F (2002). Food Quality Management: A Techno-Managerial Approach. Wageningen.
- Matthäus K, Dänicke S, Vahjen W, Zimon O, Wang L, Valenta H, Meyer K, Strumpf A, Ziesenib H; Flachowsky G (2004). Progression of the Mycotoxin and Nutrient Concentration in Wheat after Inoculation with *Fusarium culmorum*. In: *Archives of Animal Nutrition*, **58**, 19-35.
- Obst A; Lepschy J; Beck R; Bauer G; Bechtel A (2000). The Risk of Toxins by *Fusarium Graminearum* in Wheat – Interactions between Weather and Agronomic Factors. In: *Mycotoxin Research*, **16A**, 16-20.
- Prange A; Modrow H; Hormes J; Krämer J; Köhler P (2005). Influence of Mycotoxin Producing Fungi (*Fusarium*, *Aspergillus*, *Penicillium*) on Gluten Proteins during Suboptimal Storage of Wheat after Harvest and Competitive Interactions between Field and Storage Fungi. In: *Journal of Agriculture and Food Chemistry*, **53**, 6930-6938.
- Rechkemmer, G (2001). Funktionelle Lebensmittel – Zukunft der Ernährung oder Marketing-Strategie. *Forschungsreport Sonderheft 2001*, 12-15.
- Spiller A (2004). Qualitätssicherung in der Wertschöpfungskette: Vor- und Nachteile unterschiedlicher Organisationskonzepte. In: *Lebensmittelqualität und Qualitätssicherungssysteme*, eds Dachverband Agrarforschung, pp. 83-96. Frankfurt a. Main.
- Steinmann H-H; Battermann H W; Theuvsen L (2008). Instrumente und Verpflichtungen zur Regelung einer guten fachlichen Praxis in der Landwirtschaft – Das Beispiel der

Dokumentation von Pflanzenschutzmittelanwendungen. In: *Berichte über Landwirtschaft*, **Bd. 86**, (im Druck).

- Theuvsen, L (2007). Von der Gewährleistungs- zur Initiativfunktion: Neue Handlungsstrategien des Staates am Beispiel des gesundheitlichen Verbraucherschutzes. In: *Die Zukunft der öffentlichen Dienstleistungen*, eds Gesellschaft für öffentliche Wirtschaft, pp. 40-68. Berlin.
- Theuvsen L; Gawron J-C; Plumeyer C-H (2007). Qualitätsanforderungen in Zertifizierungssystemen: Ansatzpunkte für die Messung von Qualität. In: *Messbare Qualität*, ed. G Linß, pp. 180-201. Aachen.
- Theuvsen L; Plumeyer C-H; Gawron J-C (2007b). Certification Systems in the Meat Industry: Overview and Consequences for Chain-wide Communication. In: *Polish Journal of Food and Nutrition Sciences*, **57**, **H. 4(C)**, 563-569.
- Wang J; Pawelzik E; Weinert J; Zhao Q; Wolf G A (2004). Effect of Fungicide Treatment on the Quality of Wheat Flour and Breadmaking. In: *Journal of Agriculture and Food Chemistry*, **52**, 7593-7600.

Steinmann, H-H, Gerowitt B: Pflanzenproduktion und Biodiversität – Miteinander oder Gegensatz? In: Tiedemann A v, Heitefuss R, Feldmann F (2008): Pflanzenproduktion im Wandel – Wandel im Pflanzenschutz, ISBN 978-3-941261-00-6; 45-56. © Deutsche Phytomedizinische Gesellschaft, Braunschweig, Germany

Pflanzenproduktion und Biodiversität – Miteinander oder Gegensatz?

H-H Steinmann

Universität Göttingen, Forschungs- und Studienzentrum Landwirtschaft und Umwelt, Am Vogelsang 6, 37075 Göttingen; Email: hsteinm@gwdg.de

B Gerowitt

Universität Rostock, Institut für Landnutzung, Phytomedizin, Satower Straße 48, 18051 Rostock; Email: baerbel.gerowitt@uni-rostock.de

ZUSAMMENFASSUNG

Biodiversität hat neben der Artenzahl von Pflanzen, Tieren und Mikroorganismen auch eine funktionale Dimension. Deshalb hat in den letzten Jahren die Forschung zu den Funktionen und Leistungen von Agrarökosystemen einen größeren Stellenwert bekommen als das reine Zählen von Arten. *Ecosystem services* und *Ecosystem functioning* sind Konzepte, die für diese Sichtweise stehen. Für die agrarisch dominierten Lebensräume wurde der Begriff der *Agrobiodiversität* eingeführt, um zu signalisieren, dass zur Diversität dieser Systeme auch die Vielfalt der kultivierten Genotypen, Sorten, Rassen etc. gehört. Für die Pflanzenproduktion und besonders für den Pflanzenschutz ist die Fähigkeit zur Selbstregulation wesentliches Element der funktionalen Diversität; die Agrarproduktion ist aber auch Mitverursacher des Verlustes von Artenvielfalt. Die Spannungen zwischen Pflanzenproduktion und Biodiversität werden deshalb bei einer ausgedehnten Agrarproduktion nicht geringer werden. Es wird darauf ankommen, geeignete Vereinbarungen und Anreizsysteme zur Erhaltung der Biodiversität zu entwickeln.

EINLEITUNG

Biodiversität – dieser Begriff ist seit dem ersten Erscheinen in den 80er Jahren zu einem Kernbegriff in den ökologischen Wissenschaften und schließlich in der breiten Öffentlichkeit geworden. Ursprünglich als Synonym für Artenzahl oder Artenvielfalt verwendet, ist das Biodiversitätskonzept mittlerweile stark ausgebaut und verfeinert worden. Dabei werden Begriffe nicht immer konsequent und manchmal auch plakativ als Schlagworte verwendet. Landwirtschaft

– speziell die Pflanzenproduktion – wird als bedeutendste, weil flächenstärkste Landnutzungsform mit der Bedrohung von Biodiversität aber auch mit Erhaltungsmaßnahmen besonders in Verbindung gebracht.

Wenn seit kurzem die Agrarmärkte Knappheit und damit einhergehend erhöhte Nachfrage nach Agrarprodukten signalisieren, so werden diese Signale zwangsläufig zu einer Ausweitung der Agrarproduktion führen. Die Vereinbarkeit der Erhaltung von Biodiversität mit hochproduktiver Landwirtschaft ist unter diesem Vorzeichen erneut Gegenstand der öffentlichen Diskussion geworden. Wir wollen mit diesem Beitrag einige wichtige Begriffe erläutern, die helfen sollen, den derzeitigen Diskussionsstand aus ökosystemarer und landwirtschaftlicher Sicht nachzuvollziehen. In diesem Beitrag wird vorrangig die Beziehung der Pflanzenproduktion und des Pflanzenschutzes zur Biodiversität thematisiert. Welche möglichen Auswirkungen daraus für den Pflanzenschutz resultieren wird darauf aufbauend diskutiert.

BEGRIFFE

Für die Landwirtschaft und die damit verbundene Nutzung des ländlichen Raumes gilt das Prinzip der *Multifunktionalität*. Damit wird ausgedrückt, dass neben den der Produktion von Nahrungsmitteln und Rohstoffen (food and fibre) auch nicht-marktfähige Leistungen, sogenannte *Externalitäten*, bereitgestellt werden (OECD, 2001). Dies sind Beiträge zum Stoffhaushalt, zur Gestaltung und zur Wertschöpfung des ländlichen Raumes und der Kulturlandschaft sowie zum Erhalt von Lebensräumen und der Biodiversität. Die Externalitäten der Landwirtschaft sind jedoch nicht ausschließlich erhaltender oder vermehrender Art, sondern häufig beeinträchtigender oder unzureichender Natur.

Unter *Biodiversität* versteht man nach dem letzten Stand der Diskussion die Vielfalt von Genen, Populationen, Arten und Lebensräumen (MEA 2005). Dieser Begriff ist sehr umfassend und muss einer globalen Betrachtungsebene gerecht werden. Auf der Ebene der Artenzahlen unterscheidet man α , β und γ -Diversität. α ist die Artenzahl einer einzelnen Parzelle oder eines Feldes. γ ist die Summe aller Arten einer Landschaft, Gemarkung oder Region. Die β -Diversität steht für die Arten, mit denen sich innerhalb der γ -Diversität die α Diversität einer Fläche von der einer anderen unterscheidet. Eine vielfältige Landschaft verfügt in der Regel über höhere β und γ -Diversitäten als eine einseitige.

Für die Biodiversitätsdebatte, die die Agrarlandschaft betrifft, hat sich die Betrachtungsebene der *Agrobiodiversität* als hilfreich erwiesen (BMELV, 2007; Jackson *et al.*, 2007). Darunter werden alle Bestandteile der biologischen Vielfalt beschrieben, die für die Ernährungs-, Land-, Forst- und Fischereiwirtschaft direkt von Bedeutung sind, oder die zur Erhaltung der Schlüsselfunktionen von Agrarökosystemen beitragen. Bei den Pflanzen zählen hierzu alle kultivierten Arten einschließlich ihrer wilden Verwandten und alle mit der Kulturlandschaft einhergehenden

Pflanzenbestände. Weiterhin zählen wir Arten dazu, die Ökosystem-Leistungen erbringen, z.B. Nützlinge, die Schädlinge kontrollieren, Bodenorganismen, die Nährstoffe für Nutzpflanzen aufschließen, Bestäuber sowie Pflanzen, die zur Erosionskontrolle beitragen oder den Wasserhaushalt stabilisieren. Diese Funktionen sind komplex, vernetzt und uns in den meisten Fällen bisher nur in Ansätzen bekannt. Aufgrund der Bedeutung der Züchtungsarbeit hat die Vielfalt von Genotypen und (Rassen und Sorten) eine große Bedeutung für die Agrobiodiversität.

Neben der reinen Anzahl von Elementen der Biodiversität ist natürlich das Funktionieren der Lebensräume von überragender Bedeutung. Neben der Stabilität von Lebensräumen als einer statischen (Erhaltungs-) Funktion spielen besonders die Leistungen, die durch Biologische Diversität für die Menschen bereitgestellt werden, eine Rolle. Für diese Leistungen hat man den Begriff der *Ecosystem Services* eingeführt (MEA 2005). Es handelt sich dabei um die Bereitstellung von Nahrung und Wasser (*provisioning*), die Regulation von Stoffkreisläufen, Nahrungsnetzen und Kalamitäten (*regulating*), das Angebot von immateriellen und kulturellen Gütern wie Erholung und Ästhetik (*cultural*) sowie die Unterstützungsleistungen des Systems z. B. bei der Primärproduktion und der Bodenbildung (*supporting*). Studien haben großes Aufsehen erregt, die einen positiven Zusammenhang von Artenzahl und einem besseren Funktionieren bzw. einer höheren Produktivität von Ökosystemen nachweisen konnten (siehe z. B. Hooper *et al.*, 2005). In Grasland-Experimenten wurden bei zunehmender Artenzahl überproportional ansteigende Biomasserträge gemessen und als Beleg für die höhere Leistungsfähigkeit diverser Systeme gedeutet (Hector *et al.*, 1999). Aus landwirtschaftlicher Sicht sind derartige Befunde nicht immer schlüssig, da „Ertrag“ im agrarischen Sinne auch bestimmten Qualitätsansprüchen genügen muss. So sind im Grünland neben dem reinen Biomassenertrag auch die Eigenschaften im Hinblick auf den Futterwert für den „Ertrag“ relevant.

Unbestritten ist jedoch für die Pflanzenproduktion die Biodiversitätsleistung in Form von Selbstregulationsprozessen und Bestäubung. Diese Leistungen werden in der Regel weniger von einzelnen Arten als vielmehr von Artengruppen bereitgestellt. Dieses Phänomen kann man auch als *Functional Biodiversity* bezeichnen (Moonen & Barberi, 2008). Die Autoren weisen aber auch darauf hin, dass der Terminus *Funktionale Gruppen* mehrdeutig ist, weil hierunter sowohl Artengruppen verstanden werden können, die bestimmte Abläufe in ähnlicher Weise organisieren (z. B. Verbreitungsmechanismen), als auch solche Gruppen, die bestimmte Ökosystemleistungen liefern.

Ecosystem functioning schließlich ist ein Konzept, dass von manchen Autoren gebraucht wird, um, ohne von vornherein direkten Bezug zur Diversität suchend, die Leistungen und Prozesse von Ökosystemen zu skizzieren (Hooper *et al.*, 2005). Eine Unterteilung wird in drei Kompartimente vorgenommen. Unter *Ecosystem properties* werden Materialvorräte (z. B. organische Substanz), Stoffflüsse und Prozesse verstanden; *Ecosystem goods* sind die Erzeugnisse und Produkte mit einem direkten Marktwert; *Ecosystem services* sind Leistungen, die direkt oder indirekt menschlichen Bedürfnissen dienen (Wasser- und Luftreinhaltung, Bodenbildung).

In jüngerer Zeit kommt es zunehmend zur Kritik an der reinen Fokussierung auf Artenzahlen, auf die vielfach die Biodiversität reduziert wird. Arten als mehr oder weniger durch den Menschen gemachte Kategorien haben geringere Bedeutung als Ökosystemfunktionen; die Diversitätsdiskussion müsse folglich vorrangig über die Funktionen als über die Artenzahlen geführt werden, so Haber (2008).

In der Agrarproduktion war die Funktion von Systemen von je her eine bedeutendere Größe als eine zahlenmäßige Menge von Arten. Landwirtschaftliche Systeme beruhen auf dem Umsatz von Stoffvorräten (*properties*), produzieren große Mengen an Nahrungs- und Futtermitteln sowie Non-Food Produkte (*goods*). Die Ansätze zur Biologischen Kontrolle von Schaderregern, sofern sie auf der natürlichen Förderung von Gegenspielern beruhen (*services*), machten sich im Grunde schon das Prinzip der *Functional Biodiversity* zunutze noch bevor dieser Begriff geprägt wurde.

Es wird deutlich, dass gleiche Leistungen (z. B. solche unter *goods* und *services* genannten) sowohl der Landwirtschaft (Stichwort *Multifunktionalität*) als auch dem Ökosystem (Stichwort *Ecosystem functioning*) zugeschrieben werden können, je nachdem, aus welchem Blickwinkel heraus diskutiert wird. Trotzdem gehen Landwirtschaft und Ökosystemleistungen nicht stets Hand in Hand. Das Missverhältnis zwischen Agrarproduktion und Biodiversität besteht darin, dass dem Nutzen, der aus dem System gezogen wird, Beeinträchtigungen gegenüber stehen, die das Funktionieren der Lebensräume betreffen. Die Leistungsfähigkeit, die anhand der Höhe der Erträge gemessen werden kann, entspricht nicht der Leistungsfähigkeit der Selbstregulation. Erst durch Fremdregulation wird die Leistungsfähigkeit der Pflanzenproduktion massiv gesteigert.

AGROBIODIVERSITÄT UND PFLANZENSCHUTZ

Pflanzenschutz und Agrobiodiversität stehen in engen Wechselbeziehungen. Tabelle 1 fasst die wesentlichen Wirkungen von Biodiversität für den Pflanzenschutz zusammen – Pflanzenschutz in seiner ganzen Bandbreite wäre ohne Agrobiodiversität tatsächlich undenkbar.

Die direkten Wirkungen des chemischen Pflanzenschutzes auf die Biodiversität sind aber überwiegend nachteilig. Werden historische Referenzszenarien gewählt, wird für den langen Zeitraum, in dem kein chemischer Pflanzenschutz, aber massiv vorbeugender Pflanzenschutz eingesetzt wurde, von einer großen Artenvielfalt in der Agrarlandschaft ausgegangen. Betrachten wir kürzere Zeiträume z.B. seit der Industrialisierung, hat die seitdem vonstatten gehende Intensivierung der Landwirtschaft zu einem Verlust der einmal erreichten Vielfalt geführt. In dieser Entwicklung hat die Beseitigung von Sonderstandorten durch Meliorationsmaßnahmen in der Landschaft einen beträchtlichen Anteil; eine allgemein intensivere Flächenbewirtschaftung hat den ihrigen. Bei der Intensivierung der Flächenbewirtschaftung in den letzten Jahrzehnten geht steigende Produktivität häufig mit der Aufgabe von vorbeugendem Pflanzenschutz einher, der durch chemischen Pflanzenschutz ersetzt wurde. Über den Anteil der Pflanzenschutzmittel am

Rückgang der Agrarbiodiversität ist es deshalb müßig zu streiten. Die Intensivierung der Flächennutzung ist letztendlich ein Gesamtpaket, in der die Verfügbarkeit von potenten Pflanzenschutzmitteln eine Schlüsselrolle spielt.

Das damit verbundene Niveau des Einsatzes von Pflanzenschutzmitteln hat ohne Zweifel seine Kehrseiten für den Arten- und Biotopschutz und für die Selbstregulationsfähigkeit der Agrarökosysteme. Wer das nicht thematisieren mag, erweist dem chemischen Pflanzenschutz einen Bärendienst und verstärkt ein bestehendes Misstrauen in die „chemische Keule“ nur noch. Flächen, die nach den Richtlinien des Ökologischen Landbaus bewirtschaftet werden, sind denn meistens auch artenreicher als konventionell bewirtschaftete. Der Beitrag des Ökolandbaus zur Förderung von Biodiversität ist deshalb unbestritten. Ob sich der konventionelle Landbau im Rahmen der Konzentration auf den Vorrang der Produktivität aus der Biodiversitätsförderung zurückziehen soll, ist dagegen nach wie vor eine diskutierte Frage.

Tabelle 1 Wirkungen der Biodiversität auf Pflanzengesundheit und Pflanzenschutz
(*Ecosystem services / Functional Biodiversity*, siehe Text)

Funktion	Wirkungen		Ebene
	Chancen	Risiken	
Selbstregulation Biologische Kontrolle	Beitrag zur Systemstabilität	Wirkungsgrad und -sicherheit schwer kalkulierbar	Schlag / Kulturarten / Landschaft
Resistenzmanagement	Populationsregulierung ohne Wirkstoffverbrauch	Wirkungsgrad und -sicherheit schwer kalkulierbar	Schlag / Kulturarten / Landschaft
Genetische Diversität	Genetische Ressource für Pflanzenzüchtung	„Neue“ Schaderreger (Genotypen, Rassen etc.)	Kulturarten / Landschaft
Phytomedizin / -pharmakologie	Neue Wirkmechanismen		Kulturarten

EBENEN DER AGRARBIODIVERSITÄT

Das Verhältnis von Agrarbiodiversität und Pflanzenschutz kann auf drei Ebenen betrachtet werden (Tab.1). Eine Ebene ist die Vielfalt auf einzelnen agrarischen Bewirtschaftungseinheiten, die genutzten Acker- oder Grünlandschläge. Agrobiodiversität auf Schlagebene wird durch das spontane Auftreten von Pflanzen und Tieren auf den Flächen bestimmt. Diese Diversität ist ein Miteinander von schädlichen, nützlichen und indifferenten Arten. Die eingesetzten Pflanzenschutzmittel greifen hier unmittelbar ein – verändern kurzfristig und verschieben auch langfristig Arten- und Genotypenspektren sowie Individuendichten. Im Rahmen der Zulassung

von Pflanzenschutzmitteln wird angestrebt, die Auswirkungen gering zu halten. Letztendlich können die Landnutzer über diese Agrobiodiversität aber verfügen, so lange sie sich dabei an die Spielregeln des Pflanzenschutzmitteleinsatzes halten (gute fachliche Praxis). Bei anhaltenden und starken Einsatz sinkt die Diversität während die Dominanz einzelner Arten oder Rassen steigt. Damit werden einerseits Selbstregulationsprozesse gestört und andererseits kann die Empfindlichkeit der Zielorganismen sinken. In Form von spontan erworbener Resistenz gegen Pflanzenschutzmittel werden Landwirte immer öfter mit dieser Konsequenz konfrontiert.

Eine zweite Ebene besteht in den verfügbaren, zeitlich und räumlich zueinander stehenden Kulturpflanzen und deren Genotypen. Die Vielfalt an Kulturarten bestimmt wie viele Optionen den Landnutzern zur Verfügung stehen, um eines der effizientesten Mittel im vorbeugenden Pflanzenschutz, die Fruchtfolge zu gestalten. Je schmaler das Spektrum an verschiedenen Pflanzenarten oder zumindest Genotypen ist, desto spezialisierter und enger wird sich die begleitende Agrobiodiversität entwickeln. Diese Spezialisten können dann extreme Individuendichten bilden – die als Schädlinge entsprechenden Regelungsbedarf in Form von Pflanzenschutz nach sich ziehen.

Die dritte Ebene ist die Agrarlandschaft mit ihrer Vernetzung von genutzten und agrarisch ungenutzten, aber doch massiv agrarisch beeinflussten Strukturen. Je weniger Kulturpflanzenarten oder –sorten weiträumig angebaut und nicht durch andere Arten oder ungenutzte diverse Elemente unterbrochen werden, desto stärker werden wiederum die sie begleitenden Spezialisten gefördert, mit den bekannten Konsequenzen für den Pflanzenschutzmitteleinsatz. Auch die Agrobiodiversität leidet darunter, weil ungenutzte oder sehr extensiv genutzte Bereiche als Rückzugs- und Austauschflächen förderlich für alle Bestandteile (nützlich, schädlich, indifferent) sind.

In der Diskussion wird häufig eine weitere Ebene angeführt, die der globalen Verteilung von Biodiversität und Pflanzenproduktion. Ziel ist dabei, die Produktion vorrangig unter dafür günstigen Bedingungen zu betreiben, um andernorts (Stichwort Regenwälder) verstärkt Biodiversität erhalten zu können. Wir vertiefen diese Ebene bewusst nicht. Dafür gibt es mehrere Gründe: (i) Marktmechanismen (die wir immer stärker zulassen müssen) bewirken sowieso, dass an den günstigen Standorten produziert wird. (ii) Mit agrarischer Produktion hängt auch immer allgemeine wirtschaftliche Entwicklung zusammen. Bei globalen Schutzkonzepten für Biodiversität muss hier unbedingt für Ausgleich gesorgt werden. (iii) Biodiversität ist auch zwingend mit dem Standort verbunden. Wir können nicht Verlust an Biodiversität hier durch verstärkten Schutz dort „wettmachen“. Das gilt auch für Konzepte der Agrobiodiversität und des *Ecosystem functioning*.

GRENZEN UND CHANCEN DER BIODIVERSITÄT IM PFLANZENSCHUTZ

Biodiversität bedeutet jedoch nicht zwangsläufig Erfolg bei Selbstregulationsprozessen, z. B. bei Schädlingskalamitäten. Die Wirkungsgrade und Wirkungssicherheit diverser Landschaften und Lebensräume gegenüber Massenvermehrungen von Schaderregerpopulationen sind oft gering und nur schwer einzuschätzen. Es ist daher wohl häufig nur eine Reduktion der Schaderreger anstatt einer Regulierung zu erwarten; die Risikotoleranz der Landwirte wird auf eine harte Probe gestellt. Man muss daher unterscheiden zwischen einfachen und preiswerten Maßnahmen zur Förderung von Biodiversität (vielfältige Wegränder, Erhalt von Hecken und Feldgehölzen), die jeder Landwirt nutzen sollte, und solchen Maßnahmen, die nur mit großem Aufwand bzw. als gemeinsame Aktion aller Anlieger zu bewerkstelligen sind (Neuanlage von Dauerstrukturen, Defragmentierung von Landschaften). Die letztgenannten sind unter den derzeitigen Produktionsbedingungen nicht realistisch bzw. wären nur mit großen finanziellen Anreizen umzusetzen.

Erschwerend kommt hinzu: Biologische Kontrolle (Bio-Control) und Biodiversität sind nicht unbedingt gleichbedeutend. Spontane und diverse Bestandteile der Landschaft sind oft nicht die richtigen Regulierer für die jeweils benötigten Lösungsansätze. Das Nachhelfen mit eigens produzierten Gegenspielern und das gezielte Gestalten von Randstreifen ist im Grunde auch nur externes Eingreifen und hat im erstgenannten Falle schon zu schwerwiegenden Verdrängungsprozessen bei autochthonen Populationen geführt (vgl. Pearson & Callaway, 2003).

WANDEL IM PFLANZENSCHUTZ?

Befindet sich die Pflanzenproduktion wirklich in einem abrupten Wandel, und wenn ja, wie werden Biodiversität und Pflanzenschutz davon betroffen sein? Zunächst einmal ist festzustellen, dass Pflanzenproduktion ständig im Wandel befindlich ist. Tabelle 2 beschreibt einige Meilensteine in der Entwicklung von Agrobiodiversität und Pflanzenschutz. Die aktuelle Situation ist gekennzeichnet von der Aktivierung von Produktionsressourcen (Wiederinkulturnahme von Stillelegungen) und in gewissem Umfang von Intensivierungen der Flächennutzung. Aufgrund der ansteigenden Preise von Vorleistungen und Produktionsfaktoren spricht jedoch vieles dafür, diese Faktoren weiterhin sparsam und effizient einzusetzen. Der Wandel wird somit überwiegend durch Nutzungswandel und die Wahl der Feldfrüchte gekennzeichnet sein. Auswirkungen auf Elemente der Biodiversität sind daher weniger durch eine Erhöhung bestimmter Pflanzenschutzmittelmengen zu erwarten als vielmehr aufgrund dieses Nutzungswandels. Eine Fläche Mais oder Weizen mag mit einem typischen und sogar einem moderaten Produktionsverfahren bestellt, keinen Anhaltspunkt für eine Intensivkultur bieten. War diese Fläche aber vorher als Grünland oder mit einer Extensivfrucht bestellt, so haben wir es sehr wohl mit einer Intensivierung zu tun. Der Verlust von Grünlandflächen, die in vielen Landschaften

extensive Elemente darstellen ist auch in den jüngst vergangenen Jahren weiter vorangeschritten und ist damit ein Indikator für die Umnutzung von Flächen.

Eine Verringerung der Fruchtartendiversität und ein Anbauwechsel zu den „großen“ Kulturen werden aber auch weiter verschärft, wenn im konventionellen Anbau Fruchtarten des Feld- oder Gartenbaus aufgrund des Fehlens von verfügbaren Pflanzenschutzmitteln aufgegeben werden. Die Einengung der Mittelpalette des chemischen Pflanzenschutzes durch scharfe Prüfbedingungen, teure Zulassungsverfahren und das geringe wirtschaftliche Interesse von Antragstellern an kleinen Kulturen ist eine negative Begleiterscheinung der anspruchsvollen aktuellen Zulassungssituation.

RECHTLICHER UND GESELLSCHAFTLICHER RAHMEN

Ein gesetzlicher Rahmen spiegelt gesellschaftliche Präferenzen wider. Zum Schutz gefährdeter Arten und Biotop, und damit auch zum Erhalt der Biodiversität, sind in den vergangenen 30 Jahren verschiedene Maßnahmen in die Gesetzgebung aufgenommen worden. Mit der EU-Vogelschutzrichtlinie und der FFH-Richtlinie (Natura, 2000) wurde europaweit ein Netz von Schutzgebieten geschaffen. Neben dieser Gebietskulisse bestehen auch allgemeine Regelungen zum Schutz des Naturhaushaltes. So müssen landwirtschaftliche Produktionsmittel, die in die Umwelt ausgebracht werden sollen, umfangreichen Prüfungen unterzogen werden, in denen die Auswirkungen auf den Naturhaushalt einen großen Stellenwert haben. Bei der Zulassung chemischer Pflanzenschutzmittel führen diese Prüfbefunde häufig zu einschränkenden Auflagen für die Ausbringung. Anwendungsbestimmungen zum Schutz von Gewässerorganismen und terrestrischer Biotop machen die praktische Anwendung der Mittel im landwirtschaftlichen Betrieb nicht gerade einfacher, ermöglichen es aber, Mittel trotz potenzieller Nebenwirkungen in der Zulassung zu behalten. Mittlerweile ist der Schutz gefährdeter Arten sogar im § 6 des Pflanzenschutzgesetzes verankert und Pläne der EU-Gesetzgebung sehen eine weitere Restriktion des PSM-Einsatzes in „sensitiven Gebieten“ (sensitive areas) vor (EU COM, 2006). Formal wird dadurch sichtbar, dass Biodiversität jedenfalls auf der Ebene des Arten- und Biotopschutzes eine zunehmende Bedeutung bekommen hat.

Auf der anderen Seite besteht eine gesellschaftliche Nachfrage nach Nahrungsmitteln und Rohstoffen und nach einer Sicherheit der Versorgung mit diesen Gütern, was sich in jüngster Zeit über gestiegen Marktpreise sichtbar macht. An der Schnittstelle zwischen Produktions- und Erhaltungsfunktion treffen diese Anforderungen zusammen. Die Landwirtschaft steht dazwischen; nicht nur als Verursacher von Störungen, sondern auch als wirtschaftlich Betroffener von Schutzmaßnahmen.

FORSCHUNGS- UND HANDLUNGSBEDARF

Die Produktion von Agrargütern wird weiterhin und zunehmend einen hohen Stellenwert haben. Pflanzenproduktion und Biodiversität können und müssen sich hierbei in vielerlei Hinsicht ergänzen. Es ist allerdings auch klar, dass hierfür ein verlässlicher Rahmen abgesteckt werden muss. Lösungsansätze, in denen mehr Agrobiodiversität hilft, die betriebswirtschaftliche Produktivität der Agrarsysteme zu verbessern, müssen identifiziert und umgesetzt werden. Gleichzeitig sollten Pflanzenschutzmittel tatsächlich für eine gezielte Bekämpfung möglichst nach Nutzung vorbeugender Maßnahmen eingesetzt werden – allein um ihre Wirksamkeit möglichst lange zu erhalten. Die beiden Konzepte bedingen sich gegenseitig und können sich entsprechend auch gegenseitig verstärken.

Auch wenn es einige gemeinsame Ansatzpunkte gibt, werden hoch produktive Landnutzung (in dem von der Gesellschaft abgesteckten gesetzlichen Rahmen) und maximale Agrobiodiversität nicht Hand in Hand gehen. Da Agrobiodiversität aber unabdingbar an den agrarischen Nutzsyste men hängt, müssen wir Modelle erproben, in denen Gesellschaft und Agrarwirtschaft aushandeln können, wie viel Agrobiodiversität und zu welchen Bedingungen gewünscht ist und ggf. auch entlohnt werden kann. Landnutzern würde dadurch die Möglichkeit gegeben, Agrobiodiversität zu fördern, gewissermaßen „zu produzieren“, um damit auch gesellschaftliche Transferzahlungen, die in die Landwirtschaft fließen, langfristig zu sichern.

Drei Gruppen von Akteuren können Impulse für ein zukünftiges Miteinander von Biodiversität und Pflanzenproduktion geben. An diese Akteure haben wir die nachfolgenden Fragen gerichtet. Mögliche Lösungswege, die auf unterschiedlichen Ebenen wirken, werden ebenfalls skizziert, wobei die Aufzählungen nur exemplarisch und keineswegs erschöpfend sind:

- **(Agrar-) Politik:** Wird der Schutz und das Management von Biodiversität künftig eher als Restriktions- oder als Anreizinstrument für die Landwirtschaft behandelt werden?
Lösungsansätze: Nachfrage nach Biodiversität schaffen und entlohnen, Diversifizierung der Flächennutzung und der Bewirtschaftungsverfahren fördern.
- **Agrar-/Landwirtschaft:** Welche Bereitschaft besteht künftig, *Ecosystem services* zu nutzen und Biodiversität zu schützen?
Lösungsansätze: Verstärkte Eigenleistungen bei der diversifizierten Nutzung von Genoty-
pen (Sortenwahl), Verbesserung der Landschaftsstruktur.
- **Agrarforschung:** Welche angewandten Konzepte zum Biodiversitätsmanagement und welche Integrationslösungen in Produktionssysteme gibt es? Wie können Selbstregulation und Resistenzmanagement quantifiziert und besser steuer- und damit nutzbar gemacht werden?
Lösungsansätze: Überwinden der disziplinären Schranken von Produktionsforschung und Ökosystemforschung bzw. Etablieren und Stärken von qualifizierten agrarökologisch arbeitenden Forschergruppen in der Agrarforschung.

Zeitraum	Ereignis	Wirkung auf Pflanzenproduktion/ Agrarstruktur	Wirkung auf Biodiversität
50er Jahre	Verbreitung des Herbizideinsatzes	Produktivitätsfortschritte, Rationalisierung	Verschiebung Artenspektrum (Pflanzen)
60er Jahre	<i>Erste Thematisierung d. Verlustes von Vielfalt (Silent Spring)</i>		
70er Jahre	Aufgabe zahlreicher Feldfutterfrüchte Flurbereinigungen Wachstum der Silomaisfläche	Vereinfachung von Fruchtfolgen Beseitigung von Saumstrukturen Daueranbau möglich	Beginn Verlust d. Agrobiodiversität Verlust von Lebensraum labile Feldbestände / Agrarökosysteme
80er Jahre	<i>Rote Listen benennen Beitrag der Landwirtschaft am Artenschwund (z. B. Pflanzen)</i>		
	Intensitätspeak (Düngung, Pflanzenschutz- mittelmengen)	Homogenisierung der Flächen und Feldbestände, Dominanz von Problemunkräutern	Reduktion auf Fragmentgesellschaften (z. B. Pflanzen) „
90er Jahre	Erste großflächige Resistenzen (Atrazin) <i>CBD*: Verpflichtung zu Maßnahmen</i>		
	EU Harmonisierung im Pflanzenschutz Natura 2000 (FFH-Richtlinie)	Nichtzulassung vieler Altwirkstoffe Ausweisung sensibler Gebiete	weniger Nebenwirkungen durch PSM** partiell bessere Lebensraumqualitäten
	Mc Sharry-Agrarreform, Extensivierungs- programme, obligatorische Flächenstilllegung	Förderung extensiver Anbauverfahren, zeitweise bis zu 1 Mio ha Stilllegungsfläche	Segregation Intensiv- und Extensivflächen
2000er Jahre	Entkopplung, Preistief für Agrarprodukte Wachstum Ökolandbau Kleinstruktorkataster, Auflagen	weiterer Verlust von Kulturartendiversität bis zu 4 % der LF Abstandsaufgaben zum Schutz von Biotopen	Vereinheitlichung von Landschaften höhere Artenvielfalt auf Öko-Äckern Schonung von Nicht-Ziel-Organismen
aktuell	Resistenzen von Schaderegern volatile Agrarpreise, Konkurrenz um Flächen	Grenzen des chemischen PSM** sichtbar wenige Fruchtarten dominieren	Enges Genotypenspektrum
	Abschaffung der obligat. Flächenstilllegung Überarbeitung EU Pflanzenschutzrecht Artenschutz im Pflanzenschutzgesetz	Ausdehnung des Ackerbaus PSM Restriktion in „sensitive areas“ geplant Bestandesschutz geschützter Arten	weiterer Verlust von Rückzugsräumen Wirkung noch nicht absehbar „

Tabelle 2 Meilensteine in der Beziehung Agrobiodiversität/Pflanzenproduktion (Auswahl mit Schwerpunkt Mitteleuropa, kursiv: prominente Publikationen / Anstöße von außerhalb des Agrarsektors) **PS: Pflanzenschutz

FAZIT

„Multifunktionalität der Landwirtschaft“ und „Ecosystem functioning“ sind Konzepte, in denen Biodiversität eine wichtige Rolle spielt. Beide Konzepte reklamieren Leistungen (Produkte, Güter) und Nebeneffekte (Mechanismen, Vielfalt) für sich und argumentieren damit auf der gleichen Ebene. Während das Multifunktionalitätskonzept bevorzugt von Seiten der Landwirtschaft z. B. in den internationalen WTO-Handelsrunden benutzt wird, ist das *Ecosystem functioning* ein ausgesprochen agrarkritisches Konzept.

Agrobiodiversität – als der Ausschnitt der Biodiversität, der direkt oder indirekt von Agrarproduktion abhängt – ist unverzichtbar für jede Form der Pflanzenproduktion; besonders auch für eine langfristig hoch-produktive. Die Systemleistungen der Agrobiodiversität müssen Landwirten von der anwendungsorientierten Agrarforschung verstärkt bewusst gemacht werden. Wenn zukünftig die Anforderungen zu Arten- und Biotopschutz an die Pflanzenproduktion zunehmen, müssen darauf aufbauend tragfähige Vereinbarungen zwischen Gesellschaft und Landwirtschaft gefunden werden.

LITERATUR

- BMELV (2007). Agrobiodiversität erhalten, Potenziale der Land-, Forst- und Fischereiwirtschaft erschließen und nachhaltig nutzen. Bonn.
- EU Com (2006). Proposal for a Directive of the European Parliament and the council establishing a framework for Community action to achieve a sustainable use of pesticides. COM (2006) 373 final; 12.7.2006. verfügbar unter: http://ec.europa.eu/environment/ppps/pdf/com_2006_0373.pdf (online 28.5.2008)
- Haber W (2008). Biological diversity – a concept going astray? *GAIA* 17, 89-94.
- Hector A; *et al.* (1999). Plant diversity and productivity experiments in European grasslands. *Science* 286, 1123-1127.
- Hooper D U; Chapin III F S; Ewel J J; Hector A; Inchausti P; Lavorel S; Lawton J H; Lodge D M; Loreau M; Naeem S; Schmid B; Seta La H; Symstad A J; Vandermeer J; & Wardl D A (2005). Effects of biodiversity on ecosystem functioning: a consensus of current knowledge. *Ecological Monographs*, 75, 3–35.
- Jackson L E; Pascual U; & Hodgkin T (2007). Utilizing and conserving agrobiodiversity in agricultural landscapes. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 121, 196-210.
- MEA (Millennium Ecosystem Assessment) (2005). Ecosystems and human well-being: Current state and trends. Eds. R Hassan, R Scholes, & N Ash. Island Press: Washington DC. Auch verfügbar unter: <http://www.millenniumassessment.org/en/Condition.aspx#download> (online 28.5.2008).

- Moonen A C; Barberi P (2008). Functional biodiversity: An agroecosystem approach. *Agriculture, Ecosystems and Environment* **127**, 7-21.
- OECD (2001). Multifunctionality or multifunctional agriculture. Glossary of statistical terms. <http://stats.oecd.org/glossary/detail.asp?ID=1699> (online 28.5.2008).
- Pearson D E; Callaway R M (2003). Indirect effects of host-specific biological control agents. *TREE* **18**, 456-461.

Christen O: Langfristige Trends und Anpassung der Anbausysteme an den Klimawandel. In: Tiedemann A v, Heitefuss R, Feldmann F (2008): Pflanzenproduktion im Wandel – Wandel im Pflanzenschutz, ISBN 978-3-941261-00-6; 57-64. © Deutsche Phytomedizinische Gesellschaft, Braunschweig, Germany

Langfristige Trends und Anpassung der Anbausysteme an den Klimawandel

O Christen

Institut für Agrar- und Ernährungswissenschaften, Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, Ludwig-Wucherer-Straße 2, 06108 Halle (Saale); Email: olaf.christen@landw.uni-halle.de

ZUSAMMENFASSUNG

Die langfristigen Entwicklungstendenzen in der europäischen Landwirtschaft werden laut Szenarien der Klimaforschung maßgeblich durch veränderte Witterungsbedingungen beeinflusst. Hierbei ist zu unterscheiden zwischen einer Entwicklung hin zu trocken-heißen Bedingungen mit ungefähr 2-4 °C höheren Jahresmitteltemperaturen und Sommertrockenheit im Laufe der nächsten 60 Jahre und einer Zunahme von Witterungsschwankungen. Anpassungsstrategien sind dabei grundsätzlich auf den drei Skalenebenen Kulturpflanze, Fruchtfolge und Gesamtbetrieb möglich.

Das Szenario mit trocken-heißen Bedingungen ist noch vergleichsweise berechenbar, da mit den Mitteln der Anbautechnik einschließlich der Züchtung gute und etablierte Verfahren zur Anpassung existieren. Allein durch trockenresistente Sorten, verminderte Saatstärken und eine in Menge und Verteilung angepasste Stickstoffdüngung kann auf trocken-heiße Bedingungen reagiert werden. Sollten die Winter deutlich milder werden, eröffnen sich Möglichkeiten zur Erweiterung des Kulturartenspektrums durch Winterhafer oder auch Winterleguminosen. Gleichzeitig stellen dann aber auch Sonnenblumen, Hirsen oder Sojabohnen eine Anbaualternative dar.

Deutlich schwieriger ist die Anpassung an stark wechselnde Bedingungen. Zum einen ist hier die Auswahl von geeigneten Sorten mit einer großen Ertragsstabilität und Stresstoleranz als Option zu nennen. Daneben sind aber auch Düngung und Pflanzenschutz für die Verminderung der Ertragsschwankungen relevant. Auf der Ebene der Fruchtfolge kann die Sicherung oder besser noch die Steigerung der Kulturpflanzenvielfalt zur Verminderung des Risikos mehr Beachtung finden.

EINLEITUNG

Landwirtschaft ist niemals statisch. Unter dem Einfluss von Standortbedingungen, Preisen und Kosten, politischen und sozialen Organisationsformen und des biologisch-technischen Fortschritts, um nur einige Faktoren zu nennen, hat sich die landwirtschaftliche Produktion in den letzten Jahrzehnten beträchtlich verändert. Zu der Auswahl der genannten Einflussfaktoren kommen nun die prognostizierten Veränderungen der klimatischen Bedingungen, und es stellt sich die Frage, inwieweit die langfristigen Trends und Entwicklungstendenzen durch diesen zusätzlichen Einflussfaktor modifiziert werden (IPCC 2007). Um sich einer Beantwortung dieser Frage zu nähern, sollen zuerst kurz die wesentlichen mittel- und langfristigen Entwicklungstendenzen der nordeuropäischen Landwirtschaft nachgezeichnet werden, um dann zu untersuchen, inwieweit diese Trends durch die sicher wandelnden klimatischen Verhältnisse verstärkt oder abgeschwächt werden könnten.

Wie bei allen derartigen Prognoseversuchen ist hier eine beträchtliche Unsicherheit gegeben und im Rückblick dürfte es schon als Erfolg angesehen werden, wenn wenigstens die Richtung der Vorhersage mit der tatsächlichen Entwicklung übereinstimmt.

WESENTLICHE ENTWICKLUNGSTENDENZEN DER PFLANZLICHEN PRODUKTION IN NORD- UND MITTELEUROPA

Ein kurzer Rückblick auf die Entwicklung der letzten Jahrzehnte muss in der hier gebotenen Kürze eher holzschnittartig bleiben. Gleichmaßen ist es kaum möglich, die verschiedenen Tendenzen und deren Einflussgrößen in ihren Beziehungen zu rangieren oder gar quantitativ zu beurteilen. Des Weiteren ist einschränkend hervorzuheben, dass die europäische Landwirtschaft sehr vielfältige ökonomische, ökologische und soziale Bedingungen aufweist, so dass sich für alle hier hervorgehobenen Tendenzen regionale oder zeitliche Ausnahmen identifizieren lassen.

Eine zentrale Tendenz der letzten Jahrzehnte ist die eindrucksvolle **Steigerung der Flächenerträge** bei nahezu allen wichtigen Kulturarten. So konnte der Durchschnittsertrag bei Weizen in der Bundesrepublik von knapp 30 dt/ha im Jahr 1962 auf mehr als 70 dt/ha im Jahr 2006 mehr als verdoppelt werden. In Europa entspricht dies einer Steigerung von 18 dt/ha auf mehr als 50 dt/ha Weizen im gleichen Zeitraum. Entsprechende Entwicklungen sind auch bei anderen Kulturen nachweisbar. Einhergehend mit dieser Ertragssteigerung war im gleichen Zeitraum eine deutliche **Verminderung des Kulturartenspektrums** zu beobachten, die in der Praxis einer Verkürzung der Fruchtfolgen entspricht. Grundsätzlich hat der Anteil an Wintergetreidearten zugenommen und auch der Anbau von Winterraps und Mais wurde deutlich ausgedehnt. Umgekehrt ist die Anbaubedeutung einiger vormals wichtiger Kulturarten oder Nutzungsrichtungen wie Kartoffeln und Futterleguminosen erheblich zurückgegangen.

Für diese Entwicklungen sind eine große Anzahl von Einflussfaktoren verantwortlich, die an dieser Stelle nicht ausführlich dargestellt werden können. Neben den Fortschritten in Züchtung und Anbautechnik, einschließlich Düngung und Pflanzenschutzmitteleinsatz sind hier exemplarisch Preis-Kosten-Verhältnisse, soziale und politische Rahmenbedingungen wie auch der Ausbildungsstand im landwirtschaftlichen Sektor zu nennen.

Auch wenn es sich hier um Einflussgrößen handelt, sollen an dieser Stelle kurz einige Entwicklungstendenzen angesprochen werden, da auch hier direkte oder indirekte Interaktionen zwischen den prognostizierten Klimabedingungen und der pflanzlichen Produktion zu erwarten sind. Hinsichtlich des Einsatzniveaus von Düngung und Pflanzenschutz ist nach einer Intensivierung bis in die 80er Jahre, gemessen an einem wachsenden Einsatzniveau pro Hektar bzw. steigenden Behandlungshäufigkeiten, eine konstante Intensität zu beobachten. Ähnlich ist die Entwicklung bei der Düngung, wobei es in den letzten Jahren zusätzlich eine deutliche Verschiebung in der Gewichtung der verschiedenen Nährstoffe gegeben hat. Es werden inzwischen deutlich weniger Grunddünger ausgebracht; die N-Düngungsmenge dagegen wurde nur geringfügig variiert. Da gleichzeitig die Erträge weiter angestiegen sind, unterstreicht dies die wachsende Effizienz bei Düngung und Pflanzenschutz. Bei der Bodenbearbeitung ist in den letzten zwei Jahrzehnten eine erhebliche Verminderung der Intensität nachweisbar. Je nach regionalem Bezug und betrachteter Kulturart haben inzwischen Verfahren der konservierenden Bodenbearbeitung einen beträchtlichen Stellenwert erreicht. Reine Direktsaatverfahren sind dagegen in Europa im Unterschied zu vielen Anbaugebieten in Nord- und Südamerika oder Australien immer noch von sehr geringer Relevanz. Ein letzter Punkt, der hier bei den langfristigen Tendenzen noch genannt werden soll, ist die verstärkte Tendenz zur Spezialisierung von Betrieben bei gleichzeitig stark wachsenden Betriebsgrößen. Auch diese Tendenz ist einerseits Reaktion auf die genannten Veränderungen, andererseits aber auch als Einflussfaktor zu betrachten und für die Möglichkeit bei der Fruchtfolgeplanung und der Intensität von Düngung und Pflanzenschutz anzusehen.

Schließlich ist bei den Erklärungsansätzen der wesentlichen Entwicklungstendenzen aus wissenschaftlicher Sicht noch die Frage interessant, ob und in welchem Ausmaß die Entwicklungen der letzten Jahrzehnte bereits durch Klimaveränderungen und / oder eine veränderte Zusammensetzung der Atmosphäre (CO₂-Düngeeffekt) hervorgerufen sind. Gerade bei der Ertragsentwicklung der letzten Jahrzehnte ist hier durchaus ein Einfluss denkbar, zumal in diesem Zeitraum eine Steigerung der Kohlendioxidgehalte der Umgebungsluft nachweisbar ist (IPCC 2007).

SZENARIEN DER KLIMAFORSCHUNG

Bei den Szenarien der Klimaveränderungen muss grundsätzlich zwischen zwei unterschiedlichen Fällen differenziert werden. Die aus landwirtschaftlicher Sicht deutlich einfachere zu handhabende Entwicklung ist eine langsame Einstellung eines neuen Gleichgewichtszustandes bei Temperatur und Niederschlag. Hierbei sagen die Szenarien der Klimaforscher für den Bereich Mitteleuropas in den nächsten Jahrzehnten eine höhere Jahresdurchschnittstemperatur von 2-4 °C vorher. Die Summe der Jahresniederschläge soll sich danach kaum verändern. Allerdings ist von höheren Niederschlägen im Winterhalbjahr und geringeren Sommerniederschlägen auszugehen. Wesentlich schwieriger sind Szenarien einzuordnen, bei denen zukünftig verstärkt mit Wetterextremen und Schwankungen in den Witterungsabläufen zu rechnen ist. Klimaforscher sind mit Vorhersagen zu diesen Phänomenen sehr vorsichtig und für die meisten Bereiche auf der Welt lässt sich trotz gegenteiliger öffentlicher Wahrnehmung ein solcher Trend noch nicht feststellen. Aus landwirtschaftlicher Sicht müssen aber auch hier Anpassungsmöglichkeiten entwickelt werden, zumal eine Adaption wesentlich schwieriger zu erreichen sein wird.

Bei den Entwicklungstendenzen und Reaktionsmöglichkeiten in der pflanzlichen Produktion müssen drei verschiedene Skalenebenen unterschieden werden. Erstens sind Veränderungen auf der Ebene der einzelnen Kulturart zu beachten. Dies betrifft z.B. Sortenwahl, N-Düngung, Pflanzenschutz und deren Interaktionen. Die nächste relevante Ebene ist die Fruchtfolge einschließlich des Kulturpflanzenpektrums, ackerbauliche Fragen sowie die Grunddüngung. Auch zwischen den beiden genannten Ebenen bestehen selbstverständlich ausgeprägte Interaktionen. Als dritte Skalenebene ist dann der Gesamtbetrieb zu betrachten, der durch Betriebsausrichtung und Betriebsorganisation wiederum direkt und indirekt betroffen ist. Und auch hier gibt es Wechselwirkungen mit den beiden anderen genannten Skalenebenen.

Im Folgenden soll nun versucht werden abzuschätzen, ob und in welchem Ausmaß die großen Trends in der pflanzlichen Produktion durch die klimatischen Veränderungen verstärkt oder vermindert werden. Unter Berücksichtigung der oben dargelegten zwei grundsätzlichen Szenarien bei den Klimaveränderungen und den drei verschiedenen Skalenebenen, auf denen eine Reaktion möglich ist, ergibt sich eine Matrix bei den langfristigen Trends der Entwicklung von Anbausystemen.

ANPASSUNG AN TROCKEN-HEIßE BEDINGUNGEN

Bei Modellrechnungen zur zukünftigen Ertragsentwicklung wird für die nächsten drei bis vier Jahrzehnte von weiter steigenden Erträgen ausgegangen (Semenov et al. 1996, Olesen & Bindi 2002). Der Grund ist einerseits die so genannte „Düngewirkung“ des CO₂. Hierbei wird allein durch eine höhere Konzentration von Kohlendioxid in der Umgebungsluft eine Ertragssteigerung erwartet. Gleichzeitig werden einige Folgen der Sommertrockenheit abgemildert (Manderscheid

& Weigel 2007). Eine zweite Ursache für tendenziell steigende Erträge sind laut den Modellberechnungen die längeren Wachstumsbedingungen im Winterhalbjahr. Einschränkend zu diesen Modellrechnungen muss allerdings gesagt werden, dass ein verändertes Auftreten von Krankheiten und Schädlingen oder eine differenzierte Unkrautkonkurrenz nur unzureichend oder gar nicht berücksichtigt werden.

Nach diesem Zeitraum kehrt sich zwischen 2040 und 2050 die Entwicklung dann aber ins Gegenteil und die trocken-heißen Sommer begrenzen einen weiteren Ertragsanstieg. Als Anpassung an solche Bedingungen ist sehr stark die Züchtung gefordert, wobei Trockenresistenz bereits heute im globalen Maßstab als wesentliches Zuchtziel angesehen werden kann. Aus pflanzenbaulicher Sicht kann eine Verminderung der Saatstärke als wesentliche Anpassung an die trocken-heißen Bedingungen angesehen werden. In begrenztem Ausmaß sind auch gewisse Kompensationen durch Düngung und Pflanzenschutz möglich.

Auf der Ebene der Fruchtfolge, des Kulturartenspektrums einschließlich ackerbaulicher Aspekte wäre bei trocken-heißen Bedingungen eine Erweiterung der Kulturartenvielfalt wünschenswert. Wärmere Winter mit weniger Frostereignissen machen auch in unseren Regionen eine Reihe von Kulturarten anbauwürdig, die deutlich zur Auflockerung der aktuell engen Situation beitragen könnten. Zu nennen sind hier Arten wie Winterhafer, aber auch Winterleguminosen. Des Weiteren werden insbesondere unter sehr trockenen Bedingungen in den Sommermonaten Kulturarten relevant, die an solche extremeren Verhältnisse besser adaptiert sind wie z.B. Hirsen auf Trockenstandorten. Problematisch wird dagegen die Entwicklung bei den Sommerzwischenfrüchten, da hier Wassermangel verstärkt als begrenzender Faktor wirksam wird. Bei der Bodenbearbeitung ist aufgrund der zu erwartenden Klimaveränderungen grundsätzlich mit einer weiteren Ausdehnung reduzierender Verfahren auszugehen, da auf diesem Wege eine bessere Wassernutzungseffizienz erreicht werden kann. Zu beachten ist hier allerdings die zukünftige Entwicklung in der Grunddüngung, da insbesondere in Situationen mit kritischer Wasserversorgung Bestände sehr sensibel auf eine geringe P und K Versorgung in Verbindung mit konservierender Bearbeitung reagieren. Hier ist der weiteren Verbreitung dieser Verfahren aus Gründen der Wechselwirkung zwischen Düngung und Bodenbearbeitungsintensität eine deutliche Grenze gesetzt.

Aussagen zu den Folgen auf der Betriebsebene sind als ausgesprochen spekulativ zu betrachten. Betrachtet man trocken-heiße Bedingungen in anderen Regionen mit intensiver Landwirtschaft, so wird deutlich, dass häufig recht einfache Organisationsformen und erhebliche Betriebsgrößen zu beobachten sind. Eine vergleichsweise geringere Anzahl von Arbeitsgängen bei Bodenbearbeitung, Düngung und Pflanzenschutz usw. ermöglicht die Bewirtschaftung großer Einheiten. Eine Trendumkehr hinsichtlich der Betriebsgrößenentwicklung für unsere Breiten ist daher aufgrund dieses Szenarios kaum zu erwarten.

ANPASSUNG AN STARK SCHWANKENDE BEDINGUNGEN UND WETTEREXTREME

Grundsätzlich ist die Anpassung an stark wechselnde Witterungsbedingungen deutlich schwieriger zu realisieren und auch eine Prognose der Entwicklung ist wesentlich problematischer. Auf der Ebene der Produktionstechnik der Kulturpflanze tragen viele Maßnahmen von Düngung und Pflanzenschutz zur Verminderung von Ertragsschwankungen bei. Deutlich besser werden die Auswirkungen von wechselnden Bedingungen kompensiert, wenn Einsatzzeitpunkt und Ausbringungsmenge an die aktuelle Witterung und damit den Pflanzenbedarf bzw. die Befallssituation angepasst werden. Hier ist die Entwicklung von dynamischen Modellen zur Prognose des Nährstoffbedarfes und der Epidemiologie von Schaderregern sinnvoll. Sollte eine solche Anpassung in den nächsten Jahrzehnten nicht gelingen, so ist mit deutlich verstärkten Schwankungen der Erträge von Jahr zu Jahr zu rechnen. Auch die Pflanzenzüchtung ist in der Frage der Witterungsschwankungen gefordert und kann hier bei der Züchtung auf Ertragsstabilität einen beträchtlichen Beitrag leisten. Untersuchungen von Calderini und Slafer (1999) haben an Weizen-Sortimenten von 21 Ländern die Entwicklung von Ertragshöhe und Ertragsstabilität untersucht und kommen zu der Schlussfolgerung, dass durchaus in der Züchtung beide Ziele verwirklicht werden können.

Auf der Ebene der Fruchtfolge ist eine vielfältige Fruchtfolge aus mindestens zwei Gründen als Möglichkeit der Verminderung von witterungsbedingten Ertragsschwankungen anzusehen. Zum einen sinkt bei einer längeren Fruchtfolge und damit einer besseren Vorfruchtsituation der einzelnen Kulturen die Schwankung in den Erträgen. Zum anderen stellt die Erweiterung der Fruchtfolge eine Risikoverteilung aufgrund eines größeren Kulturpflanzenpektrums dar (Kirkegaard et al. 2008). Ob durch diese Überlegungen der aktuelle Trend zu immer einfacheren Fruchtfolgen und einer weiteren Verengung der Rotation tatsächlich gestoppt werden kann, darf allerdings bezweifelt werden; die Erfahrung der letzten Jahrzehnte spricht eher dagegen. So sind in den letzten Jahren einige Kulturarten in Deutschland nur noch sehr begrenzt genutzt worden und teilweise aus dem Anbau vollständig verschwunden. Ein Beispiel aus der Vergangenheit ist die Sonnenblume, aktuell sind Erbsen und Ackerbohnen betroffen. Die Ursachen für diese Entwicklungen sind komplex und liegen neben den Preisen von Konkurrenzproduktion in der mangelnden kritischen Masse bei der Erzeugung, dem Fehlen von ertragreichen Sorten und einem ausreichenden Spektrum an Pflanzenschutzmitteln sowie der Bereitschaft des Handels auch mit kleineren Partien zu arbeiten. Das Endergebnis eines weiter verminderten Kulturartenspektrums ist desolat und würde die Anpassung an stark schwankende Witterungsbedingungen deutlich erschweren (Sieling et al. 2005; Kirkegaard et al. 2008). In der Konsequenz gilt hier wie bei den dynamischen Modellen: Wenn keine Erweiterung des Kulturartenspektrums stattfindet, werden die Auswirkungen von Klimaschwankungen und Witterungsextremen deutlich verstärkt (Christen 2005).

Auch auf der betrieblichen Ebene kann auf verstärkte Schwankungen reagiert werden, wobei das Instrumentarium weniger im produktionstechnischen als im ökonomischen Rahmen zu sehen ist. Wesentlichen Möglichkeiten der Risikoverteilung bei schwankenden Witterungsbedingungen sind hier so genannte Wetterderivate und / oder Mehrschadenversicherungen (Mußhoff et al. 2007). Diese Mehrschadensversicherungen werden aktuell auch auf Ebene der EU wieder intensiv diskutiert, wobei für ein auf einzelbetrieblicher Ebene mit wirtschaftlich vertretbaren Kosten aufgebautes Modell eine beträchtliche staatliche Unterstützung notwendig sein wird. Indirekt ergeben sich dann auch wieder Auswirkungen auf die Anbausysteme. So zeigen Erfahrungen aus den USA mit einem System von Mehrschadensversicherungen, dass verstärkt in risikoreichen Anbaugebieten produziert wird, da die Allgemeinheit über die Versicherung einen Teil des Risikos trägt. Ohne entsprechende Versicherungen würden manche Standorte kaum bewirtschaftet werden. Als Ergebnis kommt es zu überproportional großen Schwankungen der Produktionsmengen, da das Risiko durch staatliche Maßnahmen getragen wird. Zwischen den einzelbetrieblichen und den gesamtwirtschaftlichen Folgen einer solchen Entwicklung muss daher deutlich differenziert werden.

FAZIT

Unter Berücksichtigung des langen Prognosezeitraums sind alle bisherigen Aussagen mit Vorsicht zu betrachten: Europa ist hinsichtlich der ökonomischen Bedingungen keine Insel und so können in einer Welt der globalen Märkte Veränderungen in Asien, Nordamerika oder Afrika über veränderte Preis-Kosten-Relationen zusätzlich deutliche Einflüsse auf die hiesigen Produktionsbedingungen haben. Dass darüber hinaus auch politische Rahmenbedingungen beachtenswert sind, zeigt die aktuelle Diskussion um die so genannte „Proteinlücke“ bei Nichtzulassung von Sojaimporten mit bestimmten, neuen Genkonstrukten. Im Extremfall kann dies sogar kurzfristig zu deutlichen Umstellungen in den Anbausystemen führen.

Insgesamt ist in den nächsten Jahrzehnten bis zur Mitte dieses Jahrhunderts mit weiter steigenden Erträgen auszugehen. Aus pflanzenbaulicher Sicht sinnvoll wäre eine Ausweitung des Kulturartenspektrums aufgrund klimatischer Bedingungen aber auch aus Gründen der Risikoverteilung. Kaum eine grundsätzliche Veränderung ist bei Düngung und Pflanzenschutz zu erwarten, wobei wiederum zur Anpassung an schwankende Witterungsbedingungen eine noch bessere Reaktion an die aktuelle Witterung wünschenswert wäre. Sollte dagegen die Verengung der Fruchtfolgen und eine Verminderung des Kulturpflanzenpektrums weiter fortschreiten und auch eine deutliche bessere dynamische Anpassung von Düngung und Pflanzenschutz nicht realisiert werden, ist zukünftig mit extremen Ertrags- und Produktionsschwankungen zu rechnen. Auf diese Entwicklung ist die Landwirtschaft in Mitteleuropa bislang nur unzureichend vorbereitet.

LITERATUR

- Calderini D F; Slafer G A (1999). Changes in yield and yield stability in wheat during the 20th century. *Field Crops Research* **51**, 335-347.
- Christen O (2007). Will climate change influence cropping? *Agrifuture* **07**, 26-28.
- IPCC (Hrsg.) (2007). Climate Change 2007 – Impacts, Adaptation and Vulnerability. *Contribution of the Working Group II*.
- Kirkegaard J; Christen O; Krupinsky J; Layzell D (2008). Break crop benefits in temperate wheat production. *Field Crops Research* **107**, 185-195.
- Manderscheid R; Weigel H-J (2007). Drought stress effects on wheat are mitigated by atmospheric CO₂ enrichment. *Agronomy for sustainable development*, **27**, 79-87.
- Mußhoff O; Odening M; Xu W (2007). Management klimabedingter Risiken in der Landwirtschaft - Zum Anwendungspotenzial von Wetterderivaten. *Agrarwirtschaft und Agrarsoziologie*, 27-48.
- Olesen J; Bindi M (2002). Consequences of climate change for European agricultural productivity, land use and policy – a review. *European Journal of Agronomy* **16**, 239-262.
- Semenov M A; Wolf J; Evans L G; Eckersten H; Iglesias A (1996). Comparison of wheat simulation models under climate change. II. Application of climate change scenarios. *Climate Research* **7**, 271-281.
- Sieling K; Stahl C; Winkelmann C; Christen O (2005). Growth and yield of winter wheat in the first three years of a monoculture under varying N fertilization in NW Germany. *European Journal of Agronomy* **22**, 71-84.

Kuhlmann F: Anpassungen der speziellen Intensität der Bodennutzung an veränderte Rahmenbedingungen für die Pflanzenproduktion. In: Tiedemann A v, Heitefuss R, Feldmann F (2008): Pflanzenproduktion im Wandel – Wandel im Pflanzenschutz, ISBN 978-3-941261-00-6; 65-79. © Deutsche Phytomedizinische Gesellschaft, Braunschweig, Germany

Anpassungen der speziellen Intensität der Bodennutzung an veränderte Rahmenbedingungen für die Pflanzenproduktion

F Kuhlmann

Institut für Betriebslehre der Agrar- und Ernährungswirtschaft, Justus-Liebig-Universität, Senckenbergstr. 3, 35390 Gießen; Email: Kuhlmann.LBL1@agrar.uni-giessen.de

ZUSAMMENFASSUNG

Der vorhergesagte Klimawandel wird zu stärkeren Schwankungen der Jahreserträge, die Liberalisierung der europäischen und Weltagrarmärkte wird zu stärkeren Schwankungen der Produkt- und Faktorpreise und die erwarteten Nachfragesteigerungen werden zu tendenziell steigenden Faktor- und Produktpreisen für die Pflanzenproduktion führen. Mit Hilfe eines Simulationsmodells, das unvollkommene Informationen der Landwirte einbezieht, werden in diesem Beitrag die Auswirkungen der vorgenannten Veränderungen der Rahmenbedingungen auf die spezielle Intensität der Bodennutzung untersucht. In der Tendenz werden zunehmende Schwankungen und Spreizungen der ha-Erträge zu steigenden speziellen Intensitäten führen. Stärkere Streuungen der Produkt- und Faktorpreise beeinflussen die Intensität der Bodennutzung dagegen nicht. Produktpreissteigerungen geben Anreiz zu höheren speziellen Intensitäten, Faktorpreissteigerungen können dagegen zu geringeren Intensitäten führen. Die Analyse von auch zukünftig zu erwartenden biotechnischen Fortschritten ergibt, dass faktorseitige Fortschritte tendenziell intensitätsmindernd, produktseitige dagegen intensitätssteigernd wirken werden. Schließlich ist für diese Vorhersagen zu berücksichtigen, dass risikoscheues Verhalten der Landwirte die ermittelten Tendenzen graduell beeinflussen dürften.

EINLEITUNG UND FRAGESTELLUNG

Im Zuge des vorhergesagten Klimawandels werden zunehmende Schwankungen der Jahresniederschläge erwartet (Henseler *et al.*, 2008; Zebisch *et al.*, 2005). Als Folge davon ist mit stärkeren Schwankungen der Pflanzenerträge zu rechnen. Durch die sukzessive Liberalisierung des europäischen Agrarmarktes und auch der Weltagrarmärkte werden zunehmende Produkt- und

Faktorpreisschwankungen erwartet. Infolge des Weltbevölkerungswachstums, der überproportional steigenden Nachfrage nach tierischen Veredelungsprodukten und des rasch wachsenden Bioenergiesektors ist zusätzlich von tendenziell steigenden Produktpreisen für pflanzliche Produktionsprozesse auszugehen (Braun, 2008). Damit werden auch Faktorpreissteigerungen nicht ausbleiben.

Aus diesen Veränderungen der Rahmenbedingungen ergibt sich die betriebswirtschaftliche Frage, ob – und gegebenenfalls wie – daraus für die Produzenten Anpassungen der speziellen Intensität der Bodennutzung erforderlich werden, wenn sie weiterhin das Ziel der nachhaltigen Einkommensmaximierung verfolgen wollen. Die spezielle Intensität der Bodennutzung ist dabei seit Theodor Brinkmann als Produktionskosten je Nutzflächeneinheit definiert und wird auf jeweils einen Produktionsprozess und ein Hauptprodukt bezogen. Um die Frage zu konkretisieren: Sollten die Landwirte den Einsatz der die Kosten verursachenden Produktionsmittel und insbesondere der ertragsteigernden Mittel je Flächeneinheit erhöhen, senken oder unverändert beibehalten? Dazu werden im Folgenden verschiedene Prognoserechnungen durchgeführt.

BISHERIGE ENTWICKLUNG VON ERTRAGSSCHWANKUNGEN

Zur Beantwortung der Frage nach den Konsequenzen zukünftig erwarteter stärkerer Ertragsschwankungen kann von Interesse sein, wie sich die Ertragsschwankungen bisher tatsächlich entwickelt haben. Dazu zeigt Tabelle 1 für Schleswig-Holstein, Hessen und Bayern sowie die Produkte Winterweizen und Winterraps Streuungsmaße für die Erntejahre 1997 – 2006 im Vergleich zu den Erntejahren 1951 – 1960. Die Erträge wurden vorher jeweils trendbereinigt. Aus den Zahlen für Schleswig-Holstein für Weizen geht hervor, dass die absoluten Werte der Streuungsmaße – Standardabweichung, mittlere Abweichung in dt/ha und Varianz – zwar vom früheren zum späteren Zeitraum zugenommen haben, dass aber die Werte der relativen Streuungsmaße – mittlere Abweichung in Prozent und Variationskoeffizient – sogar geringer geworden sind. Diese Aussage trifft für alle drei Bundesländer zu. Bei Winterraps wird sie für Schleswig-Holstein ebenfalls bestätigt. In Hessen und Bayern sind die Tendenzen uneinheitlich. Insgesamt kann aber bisher nicht von zunehmenden Ertragsschwankungen gesprochen werden. Für die Zukunft werden indessen – wie gesagt – zunehmende Schwankungen erwartet.

DIE LIEBIG-ERTRAGSFUNKTION ALS BASIS FÜR DIE PROGNOSERECHNUNGEN

Zur Ableitung möglicher Intensitätsanpassungen wird hier von der linear-limitationalen Produktionsfunktion („Linear response and plateau function“ oder Liebig-Ertragsfunktion) ausgegangen (zur Liebig-Ertragsfunktion und ihrer Beziehung zur Mitscherlich-Ertragsfunktion vgl. z. B. Kuhlmann, 2006). Diese Funktion erfasst den Tatbestand, dass der Ertrag durch zahlreiche Wachstumsfaktoren (Produktionsfaktoren) gebildet wird, wobei sich die Faktoren in

ihrer Wirkung auf den Ertrag nicht gegenseitig ersetzen können. Aufgrund dieses Sachverhaltes wird der maximal je Flächeneinheit realisierbare Ertrag durch den im relativen Minimum befindlichen Faktor bestimmt („Minimumgesetz“). Bei den Faktoren ist dabei zwischen solchen zu unterscheiden, die der Landwirt nach Menge und Einsatzpunkt steuern kann (kontrollierbare Faktoren, z. B. Bodenbearbeitung oder Nährstoffangebot) und solchen, die er nicht steuern kann (nichtkontrollierbare Faktoren als den Boden-Klima-Faktoren). Als Minimumfaktor, der den maximal realisierbaren Ertrag bestimmt, wirkt i. d. R. ein nichtkontrollierbarer Faktor (z. B. das pflanzenverfügbare Wasser). Im einfachsten Fall lässt sich die linear-limitationale Produktionsfunktion wie folgt ausdrücken:

$$(1) \quad x = \min(x \max, \frac{1}{a} \cdot r)$$

Tabelle 1 Statistische Kennwerte der Ertragsvariabilität von Winterweizen und Winterraps in den Ländern Schleswig-Holstein, Hessen und Bayern in den Jahren in den Jahren 1997 bis 2006 im Vergleich zu den Jahren 1951 bis 1960

	Winterweizen		Winterraps	
	Erntejahre 1951 - 1960	Erntejahre 1997 -2006	Erntejahre 1951 - 1960	Erntejahre 1997 -2006
Schleswig-Holstein				
Ertragssteigung in dt/ha*Jahr ⁻¹	0,5473	0,2618	0,5012	0,1133
Erwartungswerte der Trend bereinigten Erträge in dt/ha*Jahr ⁻¹ :	33,7873	87,9818	19,0945	37,6600
Standardabweichung:	4,5355	5,6681	3,0959	2,9773
Mittlere Abweichung in dt/ha:	2,9447	4,6815	2,2395	1,9093
Varianz:	20,5706	32,1276	9,5844	8,8646
Mittlere Abweichung in %:	8,7155	5,3209	11,7286	5,0699
Variationskoeffizient:	13,4237	6,4424	16,2134	7,9059
Hessen				
Ertragssteigung in dt/ha*Jahr ⁻¹	0,7521	0,8200	0,4248	0,6739
Erwartungswerte der Trend bereinigten Erträge in dt/ha*Jahr ⁻¹ :	28,7855	70,7600	15,6582	30,3473
Standardabweichung:	2,6510	5,4200	1,9847	2,6755
Mittlere Abweichung in dt/ha:	1,9839	4,5360	1,4625	1,8910
Varianz:	7,0280	29,3769	3,9389	7,1583
Mittlere Abweichung in %:	6,8919	6,4104	1,4625	1,8910
Variationskoeffizient:	9,2096	7,6598	12,6749	8,8163
Bayern				
Ertragssteigung in dt/ha*Jahr ⁻¹	0,8558	0,7085	0,4939	0,5255
Erwartungswerte der Trend bereinigten Erträge in dt/ha*Jahr ⁻¹ :	23,6291	64,6018	15,4273	30,4655
Standardabweichung:	2,3879	6,0233	1,1044	4,0352
Mittlere Abweichung in dt/ha:	1,8263	4,4531	0,8273	2,7353
Varianz:	5,7022	36,2798	1,2197	16,2825
Mittlere Abweichung in %:	7,7290	6,8931	5,3624	8,9783
Variationskoeffizient:	10,1059	9,3237	7,1586	13,2450

Der Ertrag (x) je ha LF wird unterhalb des aufgrund des begrenzten Angebotes eines nichtkontrollierbaren Faktors vorgegebenen maximal realisierbaren Ertrages (x_{max}) durch die Angebotsmengen des hier in sachgerechter Zusammensetzung angenommenen „Pakets“ der kontrollierbaren Faktoren (r) unter Berücksichtigung des Input-Output-Koeffizienten (a) begrenzt.

Der Koeffizient (a) gibt den Faktorbedarf je Produkteinheit an. Ab einer bestimmten Faktorangebotsmenge r wird die Begrenzung x_{max} wirksam. Weitere Steigerungen der Faktorangebotsmenge führen zu keinen weiteren Ertragsteigerungen. Die überschüssigen Faktormengen wären verschwendet. Grafisch ergeben sich für Gleichung (1) bei z. B. je nach Standortbedingungen zwischen 40 und 120 dt/ha variierenden, maximal realisierbaren Erträgen (z. B. für Wintergetreide) die in Abb. 1 dargestellten Verläufe.

In Abb. 1 wurde das kontrollierbare Faktorpaket (r) mit „ertragsabhängiger Aufwand“ bezeichnet. Dieser Ausdruck bezieht sich auf eine Gliederung innerhalb der kontrollierbaren Wachstumsfaktoren. Für die betriebswirtschaftliche Analyse ist zwischen solchen Faktoren zu unterscheiden, die direkt das Ertragsniveau bis zum maximal realisierbaren Ertrag bestimmen und solchen, die vom Ertragsniveau unabhängig sind und nur mit dem Anbauflächenumfang in ihren Einsatzmengen variieren. Im Rahmen der hier auf eine Flächeneinheit bezogenen Analyse entstehen für den ertragsabhängigen Aufwand variable Kosten, wohingegen es sich – für ein definiertes Produktionsverfahren – bei den Kosten der flächengebundenen Faktoren um Fixkosten handelt.

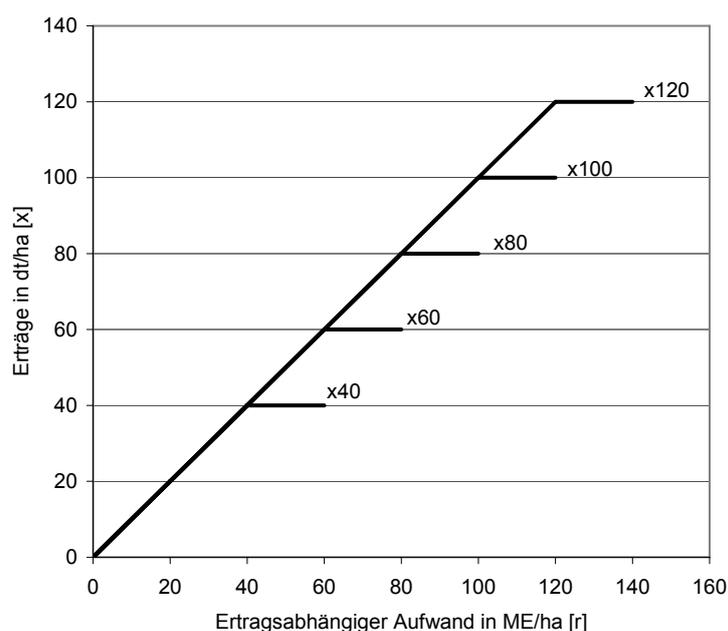


Abb.1 Linear-limitationale Produktionsfunktionen

Der Zusammenhang zwischen den beiden Faktorgruppen geht als Beispiel für ein Anbauverfahren des Wintergetreides aus Abb. 2 hervor. Dort sind die Kostenverläufe auf der Basis von KTBL-Verfahrensdaten und Preisen von 2006 (KTBL, 2006) in Abhängigkeit vom Ertragsniveau dargestellt. Der Ertragsanstieg von 60 auf 100 dt/ha um 40 dt/ha führt zu einem Gesamtkostenanstieg von ca. 1200,00 auf ca. 1400,00 €/ha. Die ertragsabhängigen Kosten (vorwiegend Dünge- und Pflanzenschutzmittelkosten sowie kleinere Teile der

Arbeits erledigungskosten) betragen also ca. 200,00 €/ha. Dividiert man die Kostendifferenz von 200,00 €/ha durch die Ertragsdifferenz von 40 dt/ha, dann ergeben sich variable Stückkosten von ca. 5,00 €/dt Ertrag. Setzt man nun den Wert des Input-Output-Koeffizienten in Gleichung (1) mit $a = 1$ an, dann beträgt der Preis des ertragsabhängigen Faktorpaketes 5,00 €/ME (ME = Mengeneinheit). Hiermit wird im weiteren gerechnet.

Die flächenabhängigen Kosten bleiben dagegen unberücksichtigt, weil sie als Fixkosten die relative Vorzüglichkeit unterschiedlicher Handlungsalternativen in Form unterschiedlicher Intensitätsstufen nicht beeinflussen. Als Zielgröße für das Einkommen aus unterschiedlichen speziellen Intensitäten der Bodennutzung wird deshalb der Deckungsbeitrag als Differenz aus den Leistungen (Ertrag in dt/ha · Produktpreis in €/dt) und den variablen Kosten (ertragsabhängiger Aufwand in ME/ha · Faktorpreis in €/ME) angenommen.

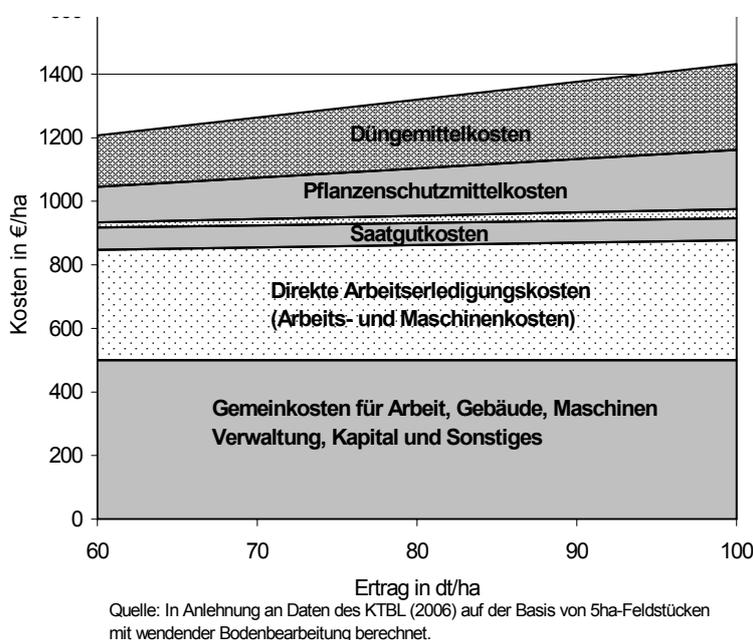


Abb. 2 Produktionskosten für ein Verfahren des Wintergetreidebaus in Abhängigkeit vom Ertragsniveau

Für die Liebig-Ertragsfunktion wäre das betriebswirtschaftliche Problem der Bestimmung der optimalen speziellen Intensität dann sehr einfach zu lösen, wenn man den maximal realisierbaren Ertrag für eine Vegetationsperiode sicher vorhersagen könnte. Man würde den ertragsabhängigen Aufwand jeweils soweit treiben, bis der Knickpunkt der jeweiligen Ertragsfunktion in *Abb. 1* erreicht ist. Vorher würde Ertragspotenzial vergehen, hinterher Aufwand verschwendet. Mit anderen Worten: Das eigentliche Problem bei der Bestimmung der optimalen speziellen Intensität entsteht erst dadurch, dass die maximal realisierbaren Erträge von Jahr zu Jahr schwanken, aber in jedem einzelnen Jahr nicht sicher vorhergesagt werden können.

DER EINFLUSS DER ZUNEHMENDEN STREUUNG UND SPREIZUNG DER ERTRÄGE AUF DIE SPEZIELLE INTENSITÄT DER BODENNUTZUNG

Aus der mangelhaften Vorhersehbarkeit der Erträge entsteht prinzipiell das in Tab. 2, oberer Teil I, dargestellte Entscheidungsproblem.¹⁾ Mit den drei oberen Zeilen wird davon ausgegangen, dass fünf verschiedene Klassen des realisierbaren Maximalertrages (x_{\max_j}) zwischen 40 und 120 dt/ha, verbunden mit unterschiedlichen Wahrscheinlichkeiten ($p(x_{\max_j})$) eintreten können. Der Entscheider kennt nur die Verteilung der Erträge, weiß aber in einem Jahr nicht, welcher Ertrag eintreten wird.

In der linken Spalte sind die Handlungsalternativen in Form ansteigender Angebotsmengen des ertragsabhängigen Aufwandes (r_i) aufgeführt. Aus den verschiedenen Maximalerträgen und den Handlungsalternativen ergibt sich die Ergebnismatrix für die eintretenden Einzelerträge (x_{ji}). Sie wurden – ausgehend von Gleichung (1) – konkret wie folgt bestimmt:

$$(2) \quad x_{ji} = \min(x_{\max_j}, \frac{1}{a} \cdot r_i)$$

In der Spalte rechts der Ergebnismatrix sind die Erwartungswerte der Erträge (x_i) für die Handlungsalternativen aufgeführt. Sie errechnen sich wie folgt:

$$(3) \quad x_i = \sum_{j=1}^J [p(x_{\max_j}) \cdot x_{ji}]$$

Aus der anschließenden Spalte „Verschwendete Menge r“ geht hervor, dass bei größeren Angebotsmengen des ertragsabhängigen Aufwandes im Mittel der Jahre gewisse Aufwandsmengen nicht produktiv genutzt werden können. Das ist in der Tabelle ab der Handlungsalternative $r_4 = 60$ ME/ha der Fall, weil bei dem Input-Output-Koeffizienten von $a = 1$ in Jahren mit einem Maximalertrag von nur 40 dt/ha 20 ME/ha des Aufwandes nicht benötigt worden wären. Da diese Situation nur mit einer Wahrscheinlichkeit von $p(x_{\max_1}) = 0,05$ eintritt, ergibt sich die mittlere Verschwendung von 1 ME/ha. Entsprechend ergeben sich die übrigen Verschwendungsmengen bei den höheren ertragsabhängigen Aufwänden (r_5 bis r_8).

Der Entscheider wird nach Maßgabe der LAPLACE-BAYES-Regel diejenige Handlungsalternative wählen, die über eine Reihe von Jahren den höchsten Einkommensbeitrag – hier der Deckungsbeitrag – erwarten lässt. Zur Berechnung des Deckungsbeitrages wurden in den anschließenden Spalten die Leistungen (L_i) und die variablen Kosten (KV_i) der Handlungsalternativen bestimmt.

Für die Leistungen gilt:

$$(4) \quad L_i = x_i \cdot ep, \quad \text{wobei } ep = \text{Produktpreis (hier 20,00 €/dt)}$$

¹⁾ Dieser und den folgenden Tabellen liegen einfache Simulationsmodelle als Excel-Anwendungen zugrunde. Dafür wurden die Felder der (exogenen) Eingabevariablen jeweils grau unterlegt. Die Felder der jeweils unter sonst gleichbleibenden Bedingungen variierten Variablen wurden zusätzlich gepunktet.

Für die variablen Kosten gilt:

$$(5) \quad KV_i = r_i \cdot fp, \quad \text{wobei } fp = \text{Faktorpreis (hier 5,00 €/ME)}$$

Die Deckungsbeiträge der Handlungsalternativen (DB_i) sind dann:

$$(6) \quad DB_i = L_i - KV_i$$

Aus der Spalte für die Deckungsbeiträge geht hervor, dass der Entscheider die Handlungsalternative r_5 als optimale spezielle Intensität wählt, weil sie mit 1120,00 €/dt den maximalen Deckungsbeitrag erwarten lässt, obwohl er eine mittlere Verschwendung von 4 ME/ha des ertragsabhängigen Aufwandes in Kauf nehmen muss.

Tabelle 2 Wirkungen zunehmender Streuungen und Spreizungen der Erträge auf die optimale spezielle Intensität der Bodennutzung

Teil I	Maximalertragsklassen:	1	2	3	4	5	Input-Output-Koeffizient	Preis des ertragsabhängigen			
	Maximalerträge [xmax _i]:	40,00	60,00	80,00	100,00	120,00	d. ertragsabhängigen Auf-	Aufwandes in €/ME [fp]:		5,00	
	Eintrittswahrscheinlichkeiten [p(xmax _i)]:	0,05	0,10	0,70	0,10	0,05	wandes [a]:	1,00	Produktpreis in €/dt [ep]:		20,00
Handlungsalternativen:		Ergebnismatrix:					Erträge	Ver-	Leistungen	Ertragsabh.	Deckungs-
Angebotsmengen [r _i] in		Erträge [x _{ij}] in dt/ha									
ME/ha des ertragsab-		bei Eintritt der Maximalerträge [xmax _i]					[x _i]	Menge r	in €/ha	in €/ha	in €/ha
hängigen Aufwandes:		für die Handlungsalternativen [r _i]:									
r ₁	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
r ₂	20	20	20	20	20	20	20	0	400	100	300
r ₃	40	40	40	40	40	40	40	0	800	200	600
r ₄	60	40	60	60	60	60	59	1	1.180	300	880
r ₅	80	40	60	80	80	80	76	4	1.520	400	1.120
r ₆	100	40	60	80	100	100	79	21	1.580	500	1.080
r ₇	120	40	60	80	100	120	80	40	1.600	600	1.000
r ₈	140	40	60	80	100	120	80	60	1.600	700	900

Teil II	Maximalertragsklassen:	1	2	3	4	5	Input-Output-Koeffizient	Preis des ertragsabhängigen			
	Maximalerträge [xmax _i]:	40,00	60,00	80,00	100,00	120,00	d. ertragsabhängigen Auf-	Aufwandes in €/ME [fp]:		5,00	
	Eintrittswahrscheinlichkeiten [p(xmax _i)]:	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	wandes [a]:	1,00	Produktpreis in €/dt [ep]:		20,00
Handlungsalternativen:		Ergebnismatrix:					Erträge	Ver-	Leistungen	Ertragsabh.	Deckungs-
Angebotsmengen [r _i] in		Erträge [x _{ij}] in dt/ha									
ME/ha des ertragsab-		bei Eintritt der Maximalerträge [xmax _i]					[x _i]	Menge r	in €/ha	in €/ha	in €/ha
hängigen Aufwandes:		für die Handlungsalternativen [r _i]:									
r ₁	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
r ₂	20	20	20	20	20	20	20	0	400	100	300
r ₃	40	40	40	40	40	40	40	0	800	200	600
r ₄	60	40	60	60	60	60	56	4	1.120	300	820
r ₅	80	40	60	80	80	80	68	12	1.360	400	960
r ₆	100	40	60	80	100	100	76	24	1.520	500	1.020
r ₇	120	40	60	80	100	120	80	40	1.600	600	1.000
r ₈	140	40	60	80	100	120	80	60	1.600	700	900

Teil III	Maximalertragsklassen:	1	2	3	4	5	Input-Output-Koeffizient	Preis des ertragsabhängigen			
	Maximalerträge [xmax _i]:	20,00	50,00	80,00	110,00	140,00	d. ertragsabhängigen Auf-	Aufwandes in €/ME [fp]:		5,00	
	Eintrittswahrscheinlichkeiten [p(xmax _i)]:	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	wandes [a]:	1,00	Produktpreis in €/dt [ep]:		20,00
Handlungsalternativen:		Ergebnismatrix:					Erträge	Ver-	Leistungen	Ertragsabh.	Deckungs-
Angebotsmengen [r _i] in		Erträge [x _{ij}] in dt/ha									
ME/ha des ertragsab-		bei Eintritt der Maximalerträge [xmax _i]					[x _i]	Menge r	in €/ha	in €/ha	in €/ha
hängigen Aufwandes:		für die Handlungsalternativen [r _i]:									
r ₁	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
r ₂	20	20	20	20	20	20	20	0	400	100	300
r ₃	40	20	40	40	40	40	36	4	720	200	520
r ₄	60	20	50	60	60	60	50	10	1.000	300	700
r ₅	80	20	50	80	80	80	62	18	1.240	400	840
r ₆	100	20	50	80	100	100	70	30	1.400	500	900
r ₇	120	20	50	80	110	120	76	44	1.520	600	920
r ₈	140	20	50	80	110	140	80	60	1.600	700	900

Die beiden unteren Teile II und III der *Tab. 2* simulieren dann die Auswirkungen einer zunehmenden Streuung der Erträge (Teil II) und deren zunehmende Spreizung (Teil III) unter sonst gleichbleibenden Bedingungen. Die zunehmende Streuung führt zu einer höheren optimalen speziellen Intensität (r_6 im Vergleich zu vorher r_5) bei gleichzeitig abnehmendem Erwartungswert für den Deckungsbeitrag auf 1020,00 €/ha und einer höheren Faktorverschwendung von nunmehr 24 ME/ha. Die zusätzlich stärkere Spreizung der realisierbaren Maximalerträge führt zu einer weiteren Steigerung der optimalen speziellen Intensität auf r_7 bei gleichzeitig weiter abnehmendem Deckungsbeitrag auf 920,00 €/ha und einer noch höheren Faktorverschwendung von 44 ME/ha. Das Ergebnis der Simulationen lässt sich wie folgt verallgemeinern: Als Folge der zukünftig erwarteten zunehmenden Streuung und Spreizung der maximal realisierbaren Erträge wäre die spezielle Intensität der Bodennutzung zu erhöhen, wenn weiterhin der maximale Deckungsbeitrag realisiert werden soll. Die zunehmende Streuung und Spreizung der Maximalerträge führt jedoch trotz höherer Intensität c. p. zu abnehmenden Deckungsbeiträgen und zunehmenden Faktorverschwendungen. Letzteres kann u. U. zu steigenden Umweltbelastungen führen, wenn man z. B. an nicht genutzte Düngermengen denkt.

DER EINFLUSS DER ZUNEHMENDEN STREUUNG DER PRODUKTPREISE AUF DIE SPEZIELLE INTENSITÄT DER BODENNUTZUNG

Mit *Tab. 3* wird simuliert, wie sich zunehmende Streuungen der Produktpreise bei gegebener Streuung der maximal realisierbaren Erträge auf die optimale spezielle Intensität auswirken. Mit dem Teil I wurde die Streuung der maximal realisierbaren Erträge – analog zur Vorgehensweise in *Tab. 2* – simuliert. Mit dem Teil II wird zusätzlich davon ausgegangen, dass der bisher mit $ep = 20,00$ €/dt fest vorgegebene Produktpreis nunmehr mit bestimmten Eintrittswahrscheinlichkeiten zwischen 10 und 30,00 €/dt variiert. Die jetzt in der Ergebnismatrix als Einzelleistungen (LE_{jik}) aufgeführten Werte ergeben sich deshalb nach folgender Gleichung:

$$(7) \quad LE_{jik} = \sum_{j=1}^J \left[p(x \max_j) \cdot \min(x \max_j, \frac{1}{a} \cdot r_i) \cdot ep_k \right]$$

Die Summe der mit den Eintrittswahrscheinlichkeiten für die maximal realisierbaren Erträge ($p(x \max_j)$) gewichteten Einzelerträge ($\min(x \max_j, 1/a \cdot r_i)$) wird mit dem zugehörigen Produktpreis (ep_k) multipliziert. Für den Erwartungswert der Leistungen je Handlungsalternative gilt dann:

$$(8) \quad L_i = \sum_{k=1}^K [p(ep_k) \cdot LE_{jik}]$$

Als Erwartungswert der Leistung (L_i) einer Handlungsalternative wird die Summe der mit den Eintrittswahrscheinlichkeiten für die Produktpreise ($p(ep_k)$) gewichteten Einzelleistungen (LE_{jik}) bestimmt.

Tabelle 3 Wirkung zunehmender Streuung der Produktpreise auf die optimale spezielle Intensität der Bodennutzung

Teil I		Maximalertragsklassen	Maximalerträge [x _{maxj}]	Eintrittswahrscheinlichkeiten [p(x _{maxj})]
Input-Outputkoeffizient des ertragsabhängigen Aufwandes [a]	Preis des ertragsabhängigen Aufwandes [fp]	1	40,00	0,20
		2	60,00	0,20
		3	80,00	0,20
		4	100,00	0,20
		5	120,00	0,20
1,00	5,00			

Teil II	Produktpreisklassen:	1	2	3	4	5	Erwartungswerte der Leistungen in €/ha [L _j]	Variable Kosten in €/ha [KV]	Erwartungswerte der Deckungsbeiträge in €/ha [DB _j]
	Produktpreise[ep _k]:	10,00	15,00	20,00	25,00	30,00			
	Eintrittswahrscheinlichkeiten [p(ep _k)]:	0,05	0,10	0,70	0,10	0,05			
Handlungsalternativen: Angebotsmengen [r _j] in ME/ha des ertragsabhängigen Aufwandes:		Ergebnismatrix: Zu erwartende Einzelleistungen [LE _{jk}] in €/ha bei den Eintrittswahrscheinlichkeiten [p(x _{maxj})] der Maximalerträge [x _{maxj}] für die Handlungsalternativen [r _j] und die Produktpreise [ep _k]:							
r ₁	0	0	0	0	0	0	0	0	0
r ₂	20	200	300	400	500	600	400	100	300
r ₃	40	400	600	800	1.000	1.200	800	200	600
r ₄	60	560	840	1.120	1.400	1.680	1.120	300	820
r ₅	80	680	1.020	1.360	1.700	2.040	1.360	400	960
r ₆	100	760	1.140	1.520	1.900	2.280	1.520	500	1.020
r ₇	120	800	1.200	1.600	2.000	2.400	1.600	600	1.000
r ₈	140	800	1.200	1.600	2.000	2.400	1.600	700	900

Teil III	Produktpreisklassen:	1	2	3	4	5	Erwartungswerte der Leistungen in €/ha [L _j]	Variable Kosten in €/ha [KV]	Erwartungswerte der Deckungsbeiträge in €/ha [DB _j]
	Produktpreise[ep _k]:	10,00	15,00	20,00	25,00	30,00			
	Eintrittswahrscheinlichkeiten [p(ep _k)]:	0,00	0,00	1,00	0,00	0,00			
Handlungsalternativen: Angebotsmengen [r _j] in ME/ha des ertragsabhängigen Aufwandes:		Ergebnismatrix: Zu erwartende Einzelleistungen [LE _{jk}] in €/ha bei den Eintrittswahrscheinlichkeiten [p(x _{maxj})] der Maximalerträge [x _{maxj}] für die Handlungsalternativen [r _j] und die Produktpreise [ep _k]:							
r ₁	0	0	0	0	0	0	0	0	0
r ₂	20	200	300	400	500	600	400	100	300
r ₃	40	400	600	800	1.000	1.200	800	200	600
r ₄	60	560	840	1.120	1.400	1.680	1.120	300	820
r ₅	80	680	1.020	1.360	1.700	2.040	1.360	400	960
r ₆	100	760	1.140	1.520	1.900	2.280	1.520	500	1.020
r ₇	120	800	1.200	1.600	2.000	2.400	1.600	600	1.000
r ₈	140	800	1.200	1.600	2.000	2.400	1.600	700	900

Aus Teil II der Tab. 3 geht hervor, dass die optimale spezielle Intensität bei einer Faktorangebotsmenge von r₆ = 100 ME/ha und einem zu erwartenden Deckungsbeitrag von DB₆ = 1020,00 €/ha erreicht wird.

Tabelle 4 Die Wirkungen steigender Faktor- und Produktpreise auf die optimale spezielle Intensität der Bodennutzung

Teil I	Maximalertragsklassen:	1	2	3	4	5	Input-Output-Koeffizient	Preis des ertragsabhängigen					
	Maximalerträge [xmax _j]:	40,00	60,00	80,00	100,00	120,00	d. ertragsabhängigen Auf-	Aufwandes in €/ME [fp]:				5,00	
	Eintrittswahrscheinlichkeiten p(xmax _j):	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	wandes [a]:	1,00	Produktpreis in €/dt [ep]:				20,00
	Handlungsalternativen: Angebotsmengen [r _j] in ME/ha des ertragsabhängigen Aufwandes:	Ergebnismatrix: Erträge [x _{ij}] in dt/ha bei Eintritt der Maximalerträge [xmax _j] für die Handlungsalternativen [r _j]:					Erträge in dt/ha [x _i]	Ver-schwendete Menge r in ME/ha	Leistung in €/ha [L _i]	Ertragsabh. Kosten in €/ha [KV _i]	Deckungsbeiträge in €/ha [DB _i]		
r ₁	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
r ₂	20	20	20	20	20	20	20	0	400	100	300		
r ₃	40	40	40	40	40	40	40	0	800	200	600		
r ₄	60	40	60	60	60	60	56	4	1.120	300	820		
r ₅	80	40	60	80	80	80	68	12	1.360	400	960		
r ₆	100	40	60	80	100	100	76	24	1.520	500	1.020		
r ₇	120	40	60	80	100	120	80	40	1.600	600	1.000		
r ₈	140	40	60	80	100	120	80	60	1.600	700	900		

Teil II	Maximalertragsklassen:	1	2	3	4	5	Input-Output-Koeffizient	Preis des ertragsabhängigen					
	Maximalerträge [xmax _j]:	40,00	60,00	80,00	100,00	120,00	d. ertragsabhängigen Auf-	Aufwandes in €/ME [fp]:				10,00	
	Eintrittswahrscheinlichkeiten p(xmax _j):	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	wandes [a]:	1,00	Produktpreis in €/dt [ep]:				20,00
	Handlungsalternativen: Angebotsmengen [r _j] in ME/ha des ertragsabhängigen Aufwandes:	Ergebnismatrix: Erträge [x _{ij}] in dt/ha bei Eintritt der Maximalerträge [xmax _j] für die Handlungsalternativen [r _j]:					Erträge in dt/ha [x _i]	Ver-schwendete Menge r in ME/ha	Leistung in €/ha [L _i]	Ertragsabh. Kosten in €/ha [KV _i]	Deckungsbeiträge in €/ha [DB _i]		
r ₁	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
r ₂	20	20	20	20	20	20	20	0	400	200	200		
r ₃	40	40	40	40	40	40	40	0	800	400	400		
r ₄	60	40	60	60	60	60	56	4	1.120	600	520		
r ₅	80	40	60	80	80	80	68	12	1.360	800	560		
r ₆	100	40	60	80	100	100	76	24	1.520	1.000	520		
r ₇	120	40	60	80	100	120	80	40	1.600	1.200	400		
r ₈	140	40	60	80	100	120	80	60	1.600	1.400	200		

Teil III	Maximalertragsklassen:	1	2	3	4	5	Input-Output-Koeffizient	Preis des ertragsabhängigen					
	Maximalerträge [xmax _j]:	40,00	60,00	80,00	100,00	120,00	d. ertragsabhängigen Auf-	Aufwandes in €/ME [fp]:				5,00	
	Eintrittswahrscheinlichkeiten p(xmax _j):	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	wandes [a]:	1,00	Produktpreis in €/dt [ep]:				40,00
	Handlungsalternativen: Angebotsmengen [r _j] in ME/ha des ertragsabhängigen Aufwandes:	Ergebnismatrix: Erträge [x _{ij}] in dt/ha bei Eintritt der Maximalerträge [xmax _j] für die Handlungsalternativen [r _j]:					Erträge in dt/ha [x _i]	Ver-schwendete Menge r in ME/ha	Leistung in €/ha [L _i]	Ertragsabh. Kosten in €/ha [KV _i]	Deckungsbeiträge in €/ha [DB _i]		
r ₁	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
r ₂	20	20	20	20	20	20	20	0	800	100	700		
r ₃	40	40	40	40	40	40	40	0	1.600	200	1.400		
r ₄	60	40	60	60	60	60	56	4	2.240	300	1.940		
r ₅	80	40	60	80	80	80	68	12	2.720	400	2.320		
r ₆	100	40	60	80	100	100	76	24	3.040	500	2.540		
r ₇	120	40	60	80	100	120	80	40	3.200	600	2.600		
r ₈	140	40	60	80	100	120	80	60	3.200	700	2.500		

In Teil III wurde dann unter sonst beibehaltenen Bedingungen die Streuung des Produktpreises extrem auf den mittleren Wert eingengt. Die optimale spezielle Intensität und der zu erwartende Deckungsbeitrag bleiben unverändert.

Als Ergebnis lässt sich verallgemeinern, dass die optimale spezielle Intensität der Bodennutzung von zukünftig zu erwartenden zunehmenden Streuungen der Produktpreise nicht beeinflusst wird. Das gleiche gilt auch für zunehmende Streuungen der Faktorpreise, wie man sich leicht selbst verdeutlichen mag.

DER EINFLUSS STEIGENDER PRODUKT- UND FAKTORPREISE AUF DIE SPEZIELLE INTENSITÄT DER BODENNUTZUNG

Mit Tab. 4 werden die Auswirkungen der vorhergesagten, tendenziell steigenden Faktor- und Produktpreise auf die spezielle Intensität der Bodennutzung simuliert. Sie entspricht in ihrem Aufbau und in ihren Eingabedaten dem mittleren Teil II der Tab. 2. Teil II der Tab. 4 zeigt c. p. die Verdoppelung des Faktorpreises von $f_p = 5,00$ auf $f_p = 10,00$ €/ME. Die optimale spezielle Intensität geht zurück, verbunden mit einem drastischen Rückgang des zum Optimum gehörenden Deckungsbeitrages. Teil III der Tabelle zeigt c. p. die Wirkung einer Verdoppelung des Produktpreises von $e_p = 20,00$ auf $e_p = 40,00$ €/dt. Die optimale spezielle Intensität nimmt ebenso wie der Deckungsbeitrag zu, verbunden allerdings mit einer zunehmenden Faktorverschwendung.

Als Ergebnis lässt sich verallgemeinern, dass steigende Faktorpreise zu einer Abnahme, steigende Produktpreise dagegen zu einer Zunahme der optimalen speziellen Intensität führen. Da jedoch beide Preiskategorien in der Tendenz steigen dürften, hängt es von dem Verhältnis der Preissteigerungen ab, ob die spezielle Intensität insgesamt zu- oder abnehmen wird.

DER EINFLUSS BIOTISCH-TECHNISCHER FORTSCHRITTE AUF DIE SPEZIELLE INTENSITÄT DER BODENNUTZUNG

In der Analyse wurde bisher von einem gegebenen Stand der Produktionstechnik ausgegangen. Weitere biotisch-technische Fortschritte sind jedoch zu erwarten. Sie manifestieren sich generell in sinkenden Faktorverbräuchen je Ertragseinheit und/oder in steigenden Maximalerträgen je Flächeneinheit. Mit Tab. 5 wurden beide Wirkungen simuliert. Teil I als Ausgangssituation ist identisch mit Teil I der Tab. 4. In Teil II wurde c. p. der Faktorverbrauch je Produkteinheit von $a = 1$ auf $a = 0,5$ halbiert. Die optimale spezielle Intensität wird dadurch zurückgeführt. Der Erwartungswert des Deckungsbeitrages nimmt zu, verbunden mit der erwünschten Nebenwirkung einer abnehmenden Faktorverschwendung. Mit Teil III werden Züchtungserfolge bei den Erträgen simuliert. Die Maximalerträge wurden im Vergleich zur Ausgangssituation um 20 dt/ha angehoben. Dieser Fortschritt bewirkt eine Steigerung der optimalen speziellen Intensität. Die Faktorverschwendung bleibt im Vergleich zur Ausgangssituation unverändert, nimmt also je Produkteinheit deutlich ab. Das Ergebnis lässt sich wie folgt verallgemeinern: Faktorsparende Fortschritte senken tendenziell die spezielle Intensität der Bodennutzung, ertragssteigernde Fortschritte steigern sie. Beide Fortschrittsarten sind geeignet, die Faktorverschwendung zu vermindern.

Tabelle 5 Die Wirkung biotisch-technischer Fortschritte auf die optimale spezielle Intensität der Bodennutzung

Teil I		Maximalertragsklassen:					Input-Output-Koeffizient		Preis des ertragsabhängigen			
Maximalerträge [x _{max,i}]:		1	2	3	4	5	d. ertragsabhängigen Auf-		Aufwandes in €/ME [fp]:			
Eintrittswahrscheinlichkeiten [p(x _{max,i})]:		40,00	60,00	80,00	100,00	120,00	wandes [a]:		1,00	Produktpreis in €/dt [ep]:		20,00
Handlungsalternativen: Angebotsmengen [r _i] in ME/ha des ertragsab- hängigen Aufwandes:		Ergebnismatrix: Erträge [x _{ij}] in dt/ha bei Eintritt der Maximalerträge [x _{max,i}] für die Handlungsalternativen [r _j]:					Erträge in dt/ha [x _i]	Ver- schwendete Menge r in ME/ha	Leistungen in €/ha [L _i]	Ertragsabh. Kosten in €/ha [KV _i]	Deckungs- beitrag in €/ha [DB _i]	
r ₁	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
r ₂	20	20	20	20	20	20	20	0	400	100	300	
r ₃	40	40	40	40	40	40	40	0	800	200	600	
r ₄	60	40	60	60	60	60	56	4	1.120	300	820	
r ₅	80	40	60	80	80	80	68	12	1.360	400	960	
r ₆	100	40	60	80	100	100	76	24	1.520	500	1.020	
r ₇	120	40	60	80	100	120	80	40	1.600	600	1.000	
r ₈	140	40	60	80	100	120	80	60	1.600	700	900	

Teil II		Maximalertragsklassen:					Input-Output-Koeffizient		Preis des ertragsabhängigen			
Maximalerträge [x _{max,i}]:		1	2	3	4	5	d. ertragsabhängigen Auf-		Aufwandes in €/ME [fp]:			
Eintrittswahrscheinlichkeiten [p(x _{max,i})]:		40,00	60,00	80,00	100,00	120,00	wandes [a]:		0,50	Produktpreis in €/dt [ep]:		20,00
Handlungsalternativen: Angebotsmengen [r _i] in ME/ha des ertragsab- hängigen Aufwandes:		Ergebnismatrix: Erträge [x _{ij}] in dt/ha bei Eintritt der Maximalerträge [x _{max,i}] für die Handlungsalternativen [r _j]:					Erträge in dt/ha [x _i]	Ver- schwendete Menge r in ME/ha	Leistungen in €/ha [L _i]	Ertragsabh. Kosten in €/ha [KV _i]	Deckungs- beitrag in €/ha [DB _i]	
r ₁	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
r ₂	20	40	40	40	40	40	40	0	800	100	700	
r ₃	40	40	60	80	80	80	68	6	1.360	200	1.160	
r ₄	60	40	60	80	100	120	80	20	1.600	300	1.300	
r ₅	80	40	60	80	100	120	80	40	1.600	400	1.200	
r ₆	100	40	60	80	100	120	80	60	1.600	500	1.100	
r ₇	120	40	60	80	100	120	80	80	1.600	600	1.000	
r ₈	140	40	60	80	100	120	80	100	1.600	700	900	

Teil III		Maximalertragsklassen:					Input-Output-Koeffizient		Preis des ertragsabhängigen			
Maximalerträge [x _{max,i}]:		1	2	3	4	5	d. ertragsabhängigen Auf-		Aufwandes in €/ME [fp]:			
Eintrittswahrscheinlichkeiten [p(x _{max,i})]:		60,00	80,00	100,00	120,00	140,00	wandes [a]:		1,00	Produktpreis in €/dt [ep]:		20,00
Handlungsalternativen: Angebotsmengen [r _i] in ME/ha des ertragsab- hängigen Aufwandes:		Ergebnismatrix: Erträge [x _{ij}] in dt/ha bei Eintritt der Maximalerträge [x _{max,i}] für die Handlungsalternativen [r _j]:					Erträge in dt/ha [x _i]	Ver- schwendete Menge r in ME/ha	Leistungen in €/ha [L _i]	Ertragsabh. Kosten in €/ha [KV _i]	Deckungs- beitrag in €/ha [DB _i]	
r ₁	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
r ₂	20	20	20	20	20	20	20	0	400	100	300	
r ₃	40	40	40	40	40	40	40	0	800	200	600	
r ₄	60	60	60	60	60	60	60	0	1.200	300	900	
r ₅	80	60	80	80	80	80	76	4	1.520	400	1.120	
r ₆	100	60	80	100	100	100	88	12	1.760	500	1.260	
r ₇	120	60	80	100	120	120	96	24	1.920	600	1.320	
r ₈	140	60	80	100	120	140	100	40	2.000	700	1.300	

DIE EINFLUSS DES RISIKOVERHALTENS DER ENTSCHEIDER AUF DIE SPEZIELLE INTENSITÄT DER BODENNUTZUNG

Die optimale spezielle Intensität der Bodennutzung wird nicht zuletzt auch durch das Risikoverhalten der Landwirte beeinflusst. In der Analyse wurde bisher davon ausgegangen, dass sich die jeweilige optimale spezielle Intensität dadurch ergibt, dass die Entscheider den Erwartungswert des Deckungsbeitrages maximieren wollen, dabei aber die Varianz der Einzelergebnisse nicht berücksichtigen. Damit wurde risikoneutrales Verhalten unterstellt. In der Realität herrscht indessen risikoscheues Verhalten vor: Viele Landwirte sind zugunsten einer eingeschränkten Streuung der Jahresergebnisse zu Zugeständnissen bei der Höhe des

Erwartungswertes bereit. Die damit verbundenen Konsequenzen wurden mit *Tab. 6* simuliert. Sie ist im Prinzip ebenso aufgebaut wie die vorhergehenden Tabellen. In der Ergebnismatrix werden nunmehr jedoch nicht die Erträge, sondern unmittelbar die Einzeldeckungsbeiträge berechnet, wie sie sich für die verschiedenen Maximalerträge bei den unterschiedlichen Angebotsmengen für den ertragsabhängigen Aufwand ergeben. Die Faktor- und Produktpreise (f_p und e_p) sind fest vorgegeben.

Die Einzeldeckungsbeiträge (DBE_{ji}) errechnen sich wie folgt:

$$(9) \quad DBE_{ji} = \min(x \max_j, \frac{1}{a} \cdot r_i) \cdot e_p - r_i \cdot f_p$$

Für die rechts neben der Ergebnismatrix aufgeführten Erwartungswerte der Deckungsbeiträge gilt:

$$(10) \quad DB_i = \sum_{j=1}^J [p(x \max_j) \cdot DBE_{ji}]$$

Tabelle 6 Erwartungswerte und Varianzen der Deckungsbeiträge für die Handlungsalternativen zur speziellen Intensität

Maximalertragsklassen:	1	2	3	4	5	Input-Output-Koeffizient	Preis des ertragsabhängigen		
Maximalerträge [xmax _j]:	40,00	60,00	80,00	100,00	120,00	d. ertragsabhängigen Auf-	Aufwandes in €/ME [f _p]:	5,00	
Eintrittswahrscheinlichkeiten [p(xmax _j)]:	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	wandes [a]:	1,00	Produktpreis in €/dt [e _p]:	20,00
Handlungsalternativen: Angebotsmengen [r _i] in ME/ha des ertragsab- hängigen Aufwandes:	Ergebnismatrix: Einzeldeckungsbeiträge [DBE _{ji}] in €/ha bei Eintritt der Maximalerträge [xmax _j] für die Handlungsalternativen [r _i]:					Erwartungs- werte der Deckungs- beiträge in €/ha [DB _i]	Zu den r _i gehörende Varianzen der DB _i		
r ₁	0	0	0	0	0	0	0	0	
r ₂	20	300	300	300	300	300	300	0	
r ₃	40	600	600	600	600	600	600	0	
r ₄	60	500	900	900	900	900	820	25.600	
r ₅	80	400	800	1.200	1.200	1.200	960	102.400	
r ₆	100	300	700	1.100	1.500	1.500	1.020	217.600	
r ₇	120	200	600	1.000	1.400	1.800	1.000	320.000	

Zusätzlich wurde in die Tabelle eine Spalte aufgenommen, in der die zu den Handlungsalternativen gehörenden Varianzen der Deckungsbeiträge aufgeführt sind. Aus einem Vergleich der Erwartungswerte der Deckungsbeiträge mit den Werten der Varianzen lässt sich ablesen, dass zunehmende spezielle Intensitäten und damit zunehmende Erwartungswerte der Deckungsbeiträge mit zunehmenden Varianzen dieser Zielgröße verbunden sind. Der Zusammenhang lässt sich als stochastische Effizienzgrenze darstellen (siehe Abb. 3). Aus Abb. 3 geht hervor, dass die Handlungsalternativen r₁ und r₂ von der Alternative r₃ stochastisch dominiert werden, weil sie bei gleicher Varianz – hier 0 – geringere Erwartungswerte des Deckungsbeitrages erbringen. Das Gleiche gilt für die hoch intensive Alternative r₇ im Vergleich zur deckungsbeitragsmaximalen Alternative r₆. r₇ weist bei höherer Varianz einen geringeren Erwartungswert des Deckungsbeitrages auf als r₆.

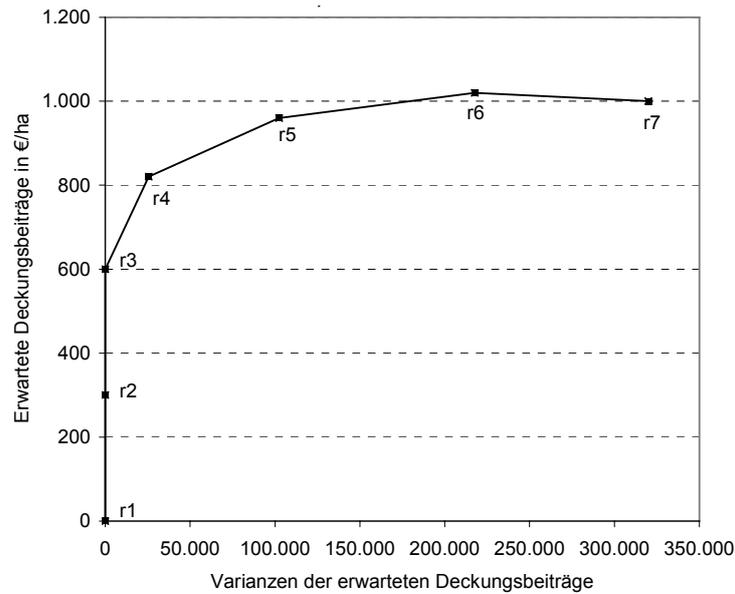


Abb. 3 Stochastische Effizienzgrenze für Handlungsalternativen zur speziellen Intensität

Die Alternativen r_3 bis r_6 dominieren einander dagegen nicht. Steigende Erwartungswerte der Deckungsbeiträge sind nur um den Preis steigender Varianzen erhältlich. Je risikoscheuer ein Landwirt ist, desto eher wird er statt der deckungsbeitragsmaximalen Alternative r_6 die weniger intensiven Alternativen r_5 , r_4 oder gar r_3 wählen. Risikoscheues Verhalten der Landwirte hebt zwar die in den vorhergehenden Abschnitten abgeleiteten Tendenzen zur Entwicklung der speziellen Intensität der Bodennutzung nicht auf, weil dieses Verhalten selbstverständlich auch bisher schon gegeben ist, es sollte jedoch bei diesbezüglichen Prognosen berücksichtigt werden.

LITERATUR

- Braun J v (2008). Die Weltmärkte bewegen sich – Herausforderungen für die Produktion. In: *Agrarpotenziale nutzen! Herausforderungen für Landwirte und Gesellschaft*, eds DLG. *Archiv der DLG*, **102**, 13 ff
- Henseler M; Wirsig A; Krimly T; Dabbert S (2008). The influence of climate change, technological progress and political change on agricultural land use: calculated scenarios for the upper Danube catchment area. *Agrarwirtschaft* **57**, 207 ff.
- Kuhlmann F (2007). Betriebslehre der Agrar- und Ernährungswirtschaft, 3. Aufl, S. 388 ff., Frankfurt/Main
- Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V. (KTBL) Darmstadt (Hrsg.) (2006/07). *Betriebsplanung Landwirtschaft 2006/07*, 20. Aufl.
- Zebisch M; Grothmann T; Schröder D; Habe C; Fritsch U; Cramer W (2005): Climate Change in Germany – Vulnerability and Adaptation of Climate Sensitive Sectors. Umweltbundesamt. <http://www.umweltdaten.de/publikationen/fpdf-k/k2974.pdf>

Tiedemann A v, Ulber B: Verändertes Auftreten von Krankheiten und Schädlingen durch Klimaschwankungen. In: Tiedemann A v, Heitefuss R, Feldmann F (2008): Pflanzenproduktion im Wandel – Wandel im Pflanzenschutz, ISBN 978-3-941261-00-6; 79-89. © Deutsche Phytomedizinische Gesellschaft, Braunschweig, Germany

Verändertes Auftreten von Krankheiten und Schädlingen durch Klimaschwankungen

A von Tiedemann, B Ulber

Department für Nutzpflanzenwissenschaften, Fachgebiet Pflanzenpathologie und Pflanzenschutz, Georg-August- Universität Göttingen; Grisebachstr. 6, 37077 Göttingen; Email: atiedem@gwdg.de

ZUSAMMENFASSUNG

Veränderte Jahreswitterungsverläufe wirken sich direkt und indirekt auf die Produktivität des Pflanzenbaus aus. Unter den indirekten Effekten spielt der Einfluss auf das Schaderregerauftreten eine dominierende Rolle. Schaderreger sind wiederum direkt und indirekt von Klimaveränderungen betroffen. Die Lebens- und Vermehrungszyklen bestimmter Erreger können direkt von der Witterung beeinflusst werden, Beispiele sind Blattlausgradationen im Getreide, die Entwicklung des Maiszünslers und anderer tierischer Schaderreger. Diese kurzfristigen Effekte werden mittel- und langfristig von Reaktionen in der Anbautechnik überlagert, bei denen zum Beispiel Saat- und Erntezeiten, Bodenbearbeitung und Sortenwahl der veränderten Witterung angepasst werden. Bei langfristiger und substantieller Klimaveränderung ist sogar mit neuen Fruchtarten zu rechnen. Die klimabedingten Anpassungen in der Anbautechnik werden zudem durch Entwicklungen moduliert, die durch den technischen Fortschritt oder als Reaktion auf marktpolitische Gegebenheiten ausgelöst werden. Daraus ergibt sich ein komplexes Wirkungsgefüge, in welchem der Klimaeffekt von den Anpassungen in der Produktionstechnik nicht klar getrennt werden kann. Das verstärkte bzw. verminderte Auftreten verschiedener Schaderreger in den vergangenen Jahren lässt sich deshalb in den meisten Fällen nicht allein auf Klimaeffekte zurückführen. Die erwarteten Extreme im Witterungsverlauf und die allgemeine weitere Intensivierung der Fruchtfolgen werden einen effizienten und flexiblen Pflanzenschutz erforderlich machen, dessen wesentliche Elemente ein ausreichendes Wirkungsspektrum, verstärkt genutzte vorbeugende Maßnahmen und die Verfügbarkeit zuverlässiger Prognoseverfahren sind.

EINLEITUNG

Die Pflanzenproduktion in Ackerbausystemen ist wie kaum ein anderer Wirtschaftsbereich von Witterung und Klima abhängig. Die Witterung bestimmt im Wesentlichen über die Wasserversorgung und die Temperatur die Produktivität von Nutzpflanzen. Neben diesen direkten Effekten auf das Pflanzenwachstum sind aber auch die indirekten Klimawirkungen zu bedenken, die durch Veränderung des Schaderregerdrucks entstehen. Durch die gegenwärtige Spezialisierung und Intensivierung der Pflanzenproduktion nehmen die Ertragsrisiken durch agrarische Schaderreger (Schädlinge, Krankheitserreger, Unkräuter) insgesamt zu. Abgesehen von Bodenart und Anbausystem bestimmen aber in erster Linie die Witterungsbedingungen das Auftreten und das Schadpotential von Schaderregern. Daher ist das Schaderregerauftreten einer der wichtigsten Faktoren einer möglichen Beeinflussung der Pflanzenproduktion durch Klimaveränderungen.

Das Schaderregerauftreten hat unmittelbare Bedeutung für die Produktivität der Pflanzenproduktion. Unter den Bedingungen der gemäßigten Klimazonen können agrarische Schaderreger Ertragsverluste von 20 bis über 50% bewirken. Die Hauptschaderreger in den vier wichtigsten Ackerbaukulturen Weizen, Mais, Raps und Zuckerrübe sind pilzliche und viröse Pathogene, Insekten und Unkräuter. Unter europäischen Anbaubedingungen wurden für Weizen mögliche Verluste durch die genannten Schaderregergruppen von insgesamt 48% errechnet, für Mais lagen diese bei 53%, für Zuckerrübe bei 80% (Oerke & Steiner, 1995; Oerke & Dehne, 2003). Für den Raps sind solche Zahlen nicht verfügbar, jedoch lässt sich anhand der bekannten Schadwirkung einzelner Hauptschaderreger ebenfalls ein Potential von bis zu 50% mögliche Ertragsverluste abschätzen. Durch direkte Pflanzenschutzmaßnahmen können in der Regel deutlich mehr als die Hälfte der potentiellen Schäden vermieden werden.

PROGNOSEN ZUM KLIMAWANDEL

Bezüglich der Verbesserung der Klimamodellierung hat es in den vergangenen Jahren intensive Entwicklungen gegeben (IPCC 2007). Voraussagen zur zukünftigen Klimaentwicklung auf Basis von Klimamodellen sind gegenwärtig aber noch mit hohen Unsicherheiten behaftet. Je nach den zugrunde liegenden Algorithmen und Grundannahmen und den einbezogenen Teilprozessen der Klimabildung ergeben sich große Abweichungen bei den prognostizierten Szenarien. Besonders gravierend ist, dass die für die Klimabildung auf der Erde bedeutenden, extraterrestrischen Einflussfaktoren, wie Sonnenaktivität und kosmische Strahlung, kaum berücksichtigt werden. Neuere Ansätze bemühen sich dennoch um stärker regionalisierte Klimaprognosen, die für eine handlungsorientierte Nutzung von Klimaszenarien auf regionaler Ebene geeignet sind. Auch diese sind allerdings mit hoher Unsicherheit behaftet.

Für die vorausschauende Betrachtung möglicher Effekte von Klimaschwankungen auf das Schaderregergeschehen besteht damit eine hohe Unsicherheit. Aus den vorliegenden Modellierungen wird gegenwärtig die Annahme abgeleitet, dass neben langfristig steigenden mittleren Temperaturen für Mitteleuropa insbesondere mildere, feuchtere Winter und Perioden mit extrem wechselnden Niederschlagsbedingungen (z.B. wechselnde Hitze-/Trockenperioden, Starkniederschläge) im Frühling und Frühsommer verstärkt auftreten werden.

Es ist unausweichlich, dass solche markanten Veränderungen des Witterungsverlaufs einerseits das Pflanzenwachstum, andererseits aber auch die Populationsdynamik von Schädlingen und Epidemieverläufe von Pflanzenkrankheiten sowie die daraus resultierenden Schadwirkungen auf Nutzpflanzen beeinflussen werden. Solche Effekte sind in zahlreichen Übersichtsartikeln betrachtet worden (Patterson *et al.*, 1999; Coakley *et al.*, 1999; Chakraborty *et al.*, 2000; Bale *et al.*, 2002; Scherm & Coakley, 2003; Fuhrer, 2003; Garrett *et al.*, 2006; Harrington *et al.*, 2007), allerdings können bisher entweder nur globale und hypothetische Aussagen getroffen oder monokausale Beziehungen aus einzelnen gezielten Simulationsversuchen beschrieben werden. Eine integrative Betrachtung der Gesamtauswirkungen des Klimawandels auf das Schaderregerauftreten in den wichtigen Ackerbaukulturen fehlt dagegen bisher. Zwar existieren in der neueren Literatur auch qualitative Hinweise, wie sich die vorausgesagten Änderungen des Klimas auf das Krankheitsauftreten in bestimmten Gebieten auswirken könnte, z. B. für Mitteleuropa (Tiedemann, 1996) oder Ontario (Boland *et al.*, 2004), umfassende quantitative Aussagen sind aber noch nicht möglich.

ANSÄTZE DER KLIMAFOLGENFORSCHUNG FÜR LANDWIRTSCHAFTLICHE SCHADERREGER

Die durch den globalen Klimawandel ausgelösten Studien über mögliche Folgen für die Landwirtschaft betrachten entweder generelle Reaktionen von Agrarökosystemen (Newton *et al.*, 2007) oder richten sich auf Klimaeffekte im Kontext mit erhöhten Spurengasgehalten in der Troposphäre (Kohlendioxid, Ozon), über die bereits seit den 1980er Jahren umfangreiche Ergebnisse vorliegen (Manning & Tiedemann, 1995). Da Spurengase im engeren Sinn keine Klimafaktoren sind, werden sie in der hier vorgenommenen Betrachtung nicht berücksichtigt. Für die Betrachtung der unmittelbaren Schaderregerdynamik ist nicht das Klima, sondern die Witterung maßgebend. Demzufolge muss sich das Hauptaugenmerk auf den Einfluss der agrarmeteorologischen Hauptvariablen **Temperatur** (Luft, Boden), **Niederschlag** und **Bodenfeuchte** richten. Die Entwicklung und Schadwirkung der wichtigsten Schaderreger im Ackerbau wird wesentlich von diesen vier Variablen gesteuert. Zu den Einflüssen dieser Hauptfaktoren liegen für viele Schaderreger umfangreiche Daten vor, die im Rahmen von epidemiologischen und populationsdynamischen Studien erarbeitet worden sind. Allerdings existieren diese Daten in stark fragmentierter Form und sind von unterschiedlicher Qualität.

Ein möglicher Ansatz besteht darin, solche ökophysiologischen Daten für die Entwicklung von Populations- oder Epidemiemodellen zu nutzen, wie dies in den letzten Jahren bereits für einige Schaderreger erfolgt ist. Solche Modelle für die umweltbedingte Veränderung von Schaderregerpopulationen haben bereits als Instrumente des gezielten Pflanzenschutzes zunehmende Bedeutung erlangt (siehe auch neueste Entwicklungen unter: www.zepp.info). Nach entsprechender Anpassung könnten sie auch für die Umsetzung von Klimaszenarien in Prognosen des zukünftigen Schaderregerauftretens genutzt werden und damit ein wichtiges Instrument der Global Change Forschung werden. Simulationsmodelle unterschiedlicher Komplexität existieren für wichtige Schädlinge und Krankheiten in verschiedenen bedeutenden Kulturen des Acker-, Obst- und Gemüsebaus (Racca & Jörg, 2007; Kleinhenz & Jörg, 1998; Kleinhenz & Rossberg, 2000; Kluge *et al.*, 1996; Koch *et al.*, 2007; Räder *et al.*, 2007).

Eine weitere Möglichkeit besteht darin, die bereits jetzt erkennbaren Veränderungen im Auftreten von Schadern mit den aktuellen Witterungsverläufen der letzten Jahre in Beziehung zu setzen. Die Notwendigkeit solcher Betrachtungen drängt sich angesichts der jüngsten Entwicklungen im Schaderregerauftreten auf. So wirken sich offensichtlich bereits jetzt die außergewöhnlich milden Winter der letzten Jahre auf die Lebens- und Vermehrungszyklen verschiedener Schadpilze und Schadinsekten aus. Solche spezifischen Zusammenhänge lassen sich relativ sicher kausalanalytisch aus der Kenntnis der Lebensansprüche der betrachteten Organismen ableiten. Für die Prognose zukünftiger Schaderregerentwicklungen taugen sie allerdings nur mit der oben gemachten Einschränkung unsicherer Klimavorhersagen.

DIREKTE UND INDIREKTE KLIMAEFFEKTE AUF DAS SCHADERREGER-AUFTRETEN

Direkte Klimaeffekte betreffen unmittelbar die Entwicklung von Schaderregerpopulationen am Standort und können sich kurzfristig in verstärkten oder gehemmten Verläufen von Epidemien oder Schädlingsabundanzen niederschlagen. Ist das Spektrum der angebauten Kulturpflanzenarten prinzipiell unverändert, kommt es hauptsächlich zu quantitativen Verschiebungen im standortspezifischen Schaderregerspektrum. Beispiele hierfür wären Blattlausgradationen im Herbst im Getreide, die Ausbreitung des Maiszünslers oder das verstärkte Auftreten verschiedener Rapschädlinge. Langfristige, substantielle Klimaveränderungen dagegen können zur Etablierung völlig neuer Schaderreger führen und dadurch das SE-Spektrum auch qualitativ verändern. In vielen Fällen können solche Veränderungen im Erregerspektrum nicht allein auf direkte Klimaeffekte zurückgeführt werden. So sind die in der Praxis in den letzten Jahrzehnten beobachteten Verschiebungen zum Beispiel vom Gelbrost zum Braunrost oder vom Mehltau zu Blattfleckenregern im Getreide oder das verstärkte Auftreten neuer Schadpilze z. B. in der Gerste (*Ramularia collo-cygni*), der Zuckerrübe (*Cercospora*, *Rhizoctonia*) und im Raps (*Verticillium*) aufgrund des langen Betrachtungszeitraums kaum von den Einflüssen veränderter Anbautechnik zu trennen.

Tabelle 1 Kurz- bzw. -langfristige Veränderungen in der Bedeutung von Schaderregern (SE) durch direkte und indirekte Wirkungen von Klimaveränderungen

Wirkungspfade für kurz- oder langfristige Effekte von Klimaschwankungen auf das Schaderregervorkommen		
	Kurzfristig	Langfristig
Direkt	Verstärkung oder Hemmung der Entwicklung vorhandener SE	Etablierung neuer SE durch Invasion und/oder Verschiebungen im SE-Spektrum
Indirekt	Anpassung der Produktionstechnik (Saat- und Erntezeiten, Bodenbearbeitung, Sortenwahl, Beregnung, etc.)	Anpassung der Produktionstechnik einschließlich Veränderung des Spektrums angebaute Kulturpflanzenarten (neue Fruchtfolgen)

Zweifelsohne wirken Klimaveränderungen nicht nur direkt und isoliert auf Schaderregerpopulationen. Vielmehr ergibt sich in der Praxis ein komplexes Wirkungsgefüge von direkten und indirekten, sowie kurz- und langfristigen Effekten (Tabelle 1). Ein wesentlicher Faktor hierbei ist die permanente Anpassung der Produktionstechnik an die aktuellen Bedingungen, die der Landwirt im Zuge seiner wirtschaftlichen Optimierungsbestrebungen vornimmt. Dieser Prozess wird noch überlagert vom produktionstechnischen Fortschritt und Reaktionen auf die aktuelle Marktlage, woraus schon für sich genommen eine Veränderung des Schaderregerauftretens resultieren kann, etwa durch Einführung neuer Sorten, Pflanzenschutzmittel oder Anbautechniken.

Typische Beispiele kurzfristiger indirekter Anpassungen an Klimaveränderungen sind veränderte Saat- und Erntezeiten und modifizierte Formen der Bodenbearbeitung, sowie ein Wechsel im Sortenspektrum innerhalb der angebauten Kulturpflanzenarten. Sind die Klimaveränderungen substantiell und halten längerfristig an, dann können auch Verschiebungen im Artenspektrum der angebauten Kulturpflanzen und damit völlig veränderte Fruchtfolgen die Folge sein. All diese Veränderungen im Anbauverfahren sind ebenfalls klimaabhängig und lassen sich in den meisten Fällen vom direkten Klimaeinfluss auf Schaderregerpopulationen nicht trennen (Tabelle 2).

VERÄNDERTES SCHADERREGERAUFTRETEN AUFGRUND AKTUELLER KLIMASCHWANKUNGEN

In einigen Winterrapsanbauregionen wurden 2007 bereits im Februar/März erste Apothezien von *Sclerotinia* beobachtet. Im Frühjahr desselben Jahres wurden in Frankreich bereits zu Vegetationsbeginn frühe *Sclerotinia*-Infektionen mit bis zu 20% Pflanzenausfällen festgestellt. Auch werden neben der klassischen Blüteninfektion zunehmend Wurzelinfektionen beobachtet,

deren Bezug zur Witterung allerdings noch unklar ist. Insgesamt hat sich aber das Infektionsfenster für diesen wichtigen Schadpilz im Raps deutlich aufgeweitet und das Schadpotential entsprechend erhöht (Tabelle 2). Aus seinen Lebensansprüchen lässt sich auch für Phoma ableiten, dass milde, kühl-feuchte Winter die Epidemieentwicklung deutlich fördern werden. Diese Tatsache ist der Grund für die große Bedeutung von Phoma auf den britischen Inseln. In der Tat beobachten wir auch in Deutschland in den letzten Jahren eine Ausbreitung von Phoma in den Wintermonaten und eine dementsprechend verstärkte Epidemiebildung in der nachfolgenden Vegetationsphase im Frühjahr und Frñhsommer. Auch bei dem bodenbürtigen Schadpilz *Verticillium longisporum* deuten neuere Untersuchungen darauf hin, dass Frñhsaat oder höhere Bodentemperaturen im Frñhsommer den Befall und die Ausbreitung in der Pflanze beschleunigen (Dunker *et al.*, 2008). Bezüglich der Rapsschädlinge ist die Vorhersage schwierig. Warme Spätsommer- und Herbstwitterung könnte den Befall durch Rapserrdfloh, Kohlerdfloh und Kohlfliege fördern, früh ansteigende Temperaturen im Frühjahr Stängelrüssler und Rapsglanzkäfer. Andererseits kann es bei kühl-feuchten und relativ milden Wintern auch zu verringerten Überlebensraten der überwinternden Insekten kommen, wie es beim Rapsglanzkäfer vermutet wird (Vietinghoff 1985, Kdimati 1990). Daneben dringt der Rapsstängelrüssler, ursprünglich ein Hauptschädling im Weinbauklima, gegenwärtig weiter in den Nordwesten Deutschlands vor.

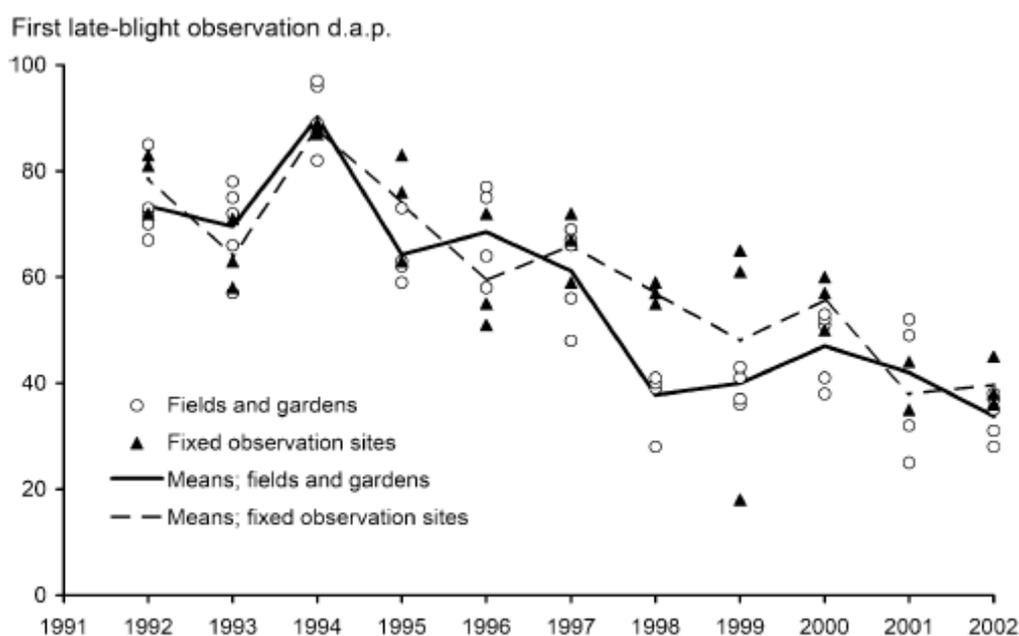


Abb 1 Veränderung des Erstauftretens von *Phytophthora infestans* in Kartoffeln in Finnland zwischen 1993 und 2002 in Feldern und Hausgärten (Angaben in d.a.p., Tagen nach Pflanzung; Hannukkala *et al.*, 2007).

Eine neuere Studie in Kartoffeln ergab, dass sich der Zeitpunkt des Erstauftretens von *Phytophthora infestans* in Finnland zwischen 1933 und 2002 um 2-4 Wochen vorverlagert hat. Allerdings konnte auch dies wiederum nicht allein auf den direkten Effekt von

Klimaveränderungen bezogen werden, da im gleichen Zeitraum eine Einengung der Fruchtfolge erfolgte. Die mögliche Rolle veränderter Pflanzzeiten wurde nicht untersucht (Abb. 1, aus: Hannukkala *et al.*, 2007).

Unter der Annahme milder, kühl-feuchter Winter und wechselfeuchter warmer Frühjahre werden vermutlich auch Erreger von Blattfleckenkrankheiten im Getreide zunehmen. Lange frostfreie und kühlfeuchte Phasen erlauben es Erregern wie Septoria in Weizen oder Rhynchosporium-Blattflecken in der Gerste, sich schon während der Wintermonate stärker zu etablieren und Inokulum aufzubauen. Gefördert wird dies durch zum Teil dichte und wüchsige Wintergetreidebestände. Frühe Wärmeperioden können insbesondere Braunrostepidemien anfachen, wie im Jahr 2007 beobachtet, während der an kühlere Bedingungen angepasste Gelbrost eher zurückgedrängt wird. Auch der Mehлтаudruck dürfte bei extremer Frühjahrswärme mit einzelnen Starkniederschlägen eher zurückgehen. In der Tat hat Mehltau stark an Bedeutung verloren, allerdings müssen hier auch die Fortschritte in der Resistenzzüchtung gesehen werden. Eine verlängerte milde Herbstwitterung wird den Blattlausdruck erheblich erhöhen und damit die Gefahr der Übertragung von Gelbverzwergungsvirus; gleiches gilt auch für die Zikaden (*Psammotettix alienus*) als Vektoren des Weizenverzwergungsvirus.

Erhöhte Blattlaus- und Virusgefahr besteht auch in der Zuckerrübe. Dort werden aber auch Blattflecken durch Cercospora sowie bodenbürtige Krankheiten wie Rizomania und Rhizoctonia (Späte Rübenfäule) zunehmende Probleme bereiten, da sie von der Bodentemperatur abhängig sind. Erste Anzeichen für eine solche Entwicklung lassen sich aus den letzten Jahren für viele Anbauregionen ablesen. Die Antwort darauf sind erheblich verstärkte Bemühungen der Züchter um verbesserte Sortenresistenzen. Dagegen geht der klassische Wurzelbrand, eine besonders bei verzögertem Auflaufen in kalten Böden auftretende und durch einen Komplex von boden- und samenbürtigen Schadpilzen verursachte Keimlingskrankheit zurück. Allerdings ist *Aphanomyces sp.* als daran beteiligtes Pathogen durchaus wärmeliebend und könnte evtl. gefördert werden.

Im Mais dringt der Maiszünsler (*Ostrinia nubilalis*) seit einigen Jahren nach Norden vor. Diese Entwicklung ist wesentlich, aber nicht allein durch die Ausbreitung des Maisanbaus bedingt. Ein Übriges tut vermutlich auch die mildere Witterung. In Sachsen traten 2006 aufgrund der hohen Temperaturen erstmals zwei Generationen des Maiszünslers auf. Zudem wurde der Maiszünsler vermehrt an alternativen Wirtspflanzen wie Gemüsepaprika gefunden. Auch die Kartoffel kann unter wärmeren Bedingungen von dem Falter als Wirtspflanze angenommen werden. Dadurch erhöht sich das Vermehrungs- und Schadpotential erheblich. Inzwischen ist der Maiszünsler an Nord- und Ostseeküste angekommen. Nicht ganz soweit ist in Deutschland bisher ein weiterer Maisschädling verbreitet, der Westliche Maiswurzelbohrer (*Diabrotica virgifera virgifera*). Im Sommer 2007 wurde dieser von Süden und Südosten vordringende Käfer erstmals in mehreren grenznahen Orten in Baden-Württemberg und Bayern gefunden. Mit seinem weiteren Vordringen in die nördlichen Maisanbaugelände ist zu rechnen. Dabei werden auch die Witterungsbedingungen eine wichtige Rolle spielen, auch wenn das Klima in ganz Deutschland

bereits in der Vergangenheit ausreichende Entwicklungsmöglichkeiten für diesen Schädling bot. Dennoch kann bei warmer Frühjahrswitterung der Larvenschlupf früher erfolgen und die Gefahr des Befalls von alternativen Wirten wie dem Weizen ansteigen.

Der Wandel in der Pflanzenproduktion aufgrund marktpolitischer Faktoren könnte durch den Klimawandel eine zusätzliche Triebkraft erhalten. Bei anhaltenden Veränderungen der Witterung ist mit zum Teil erheblichen Verschiebungen in der relativen Bedeutung und der Intensität des Auftretens einzelner Schaderreger zu rechnen. In der Gesamtbilanz kommen auf den Pflanzenschutz aufgrund der witterungsbedingten Veränderungen in Kombination mit der vermutlich weiter zunehmenden Anbauintensität erheblich steigende Anforderungen zu. Die zunehmenden Probleme mit Schadpilzen und Insekten vor allem in Raps und Getreide, aber auch in Mais oder Zuckerrübe machen schon jetzt deutlich, dass eine frühzeitige Erkennung der zu erwartenden Entwicklungen für die Anpassung entsprechender Pflanzenschutzstrategien von ausschlaggebender Bedeutung sein wird, um die Ertragssicherheit in den wichtigen Ackerbaukulturen auch weiterhin zu gewährleisten.

SCHLUSSFOLGERUNGEN

- Effizienter Pflanzenschutz wird unter veränderten marktpolitischen und klimatischen Bedingungen zukünftig noch mehr zum ausschlaggebenden Faktor einer leistungsfähigen Pflanzenproduktion werden. Einem effizienten chemischen Pflanzenschutz mit ausreichend breitem Wirkstoffspektrum wird dabei eine zentrale Rolle zukommen, allerdings wird dies allein nicht ausreichen, um die Erträge zu sichern.
- Chemischer Pflanzenschutz muss mehr denn je durch Instrumente des vorbeugenden Pflanzenschutzes unterstützt werden. Hierzu zählt zuvorderst eine weiter verbesserte Sortenresistenz, für die langfristig auch die Biotechnologie verantwortungsbewusst und konsequent genutzt werden muss. Dies muss mit biologischen oder anbautechnischen Maßnahmen kombiniert werden, um die Infektketten und das Befallspotential auf den Anbauflächen zu vermindern.
- Dem vermehrten Auftreten von Witterungsextremen muss ein möglichst flexibles System von Pflanzenschutzmaßnahmen entgegen gesetzt werden. Das situationsbedingt stark schwankende Schaderregerauftreten macht die Entwicklung zuverlässiger Prognosesysteme für den gezielten Pflanzenschutz in besonderem Maße erforderlich. Hierin liegt eine wichtige Zukunftsaufgabe der phytomedizinischen Agrarforschung.

Tabelle 2 Geschätzter kausaler Einfluss der Veränderungen von Witterung/Klima gegenüber veränderter Anbautechnik/Fruchtfolge auf die beobachtete Zunahme einiger Schaderreger im Ackerbau in den letzten Jahren in Deutschland.

Kultur/Schaderreger	Bestimmender Einflussfaktor	
	Witterung/Klima	Anbautechnik/Fruchtfolge
Getreide		
Blattflecken	+?	+++
Braunrost	+?	+?
Ährenfusarium	+?	+++
Blattläuse/Virosen	++	+
Zikaden/Virosen	++	+
Gallmücken	+	++
Raps		
<i>Sclerotinia</i>	+	+++
<i>Phoma</i>	+?	++
<i>Verticillium</i>	+?	+++
Kohlfliege	+?	++
Kohlerdfloh	++	+
Stängelrüssler	+	++
Rapsglanzkäfer	+?	+
Zuckerrübe		
<i>Cercospora</i>	+	-
<i>Rhizoctonia</i>	+	-
Rizomania	+?	+
Blattläuse	++	-
Mais		
Fusarium	+	++
Maiszünsler	++	++
Maiswurzelbohrer	+?	++
Kartoffel		
Krautfäule	++	+
<i>Alternaria</i> -Blattflecken	+	+
Blattläuse	++	+
Wirtspflanzenunabhängig:		
Schnecken	+	++
Feldmäuse	+	++

+ = Einfluss vorhanden; ++ = starker Einfluss; +++ = bestimmender Einfluss; (?) = Datenlage nicht eindeutig oder unzureichend

LITERATUR

- Bale J S; Masters G J; Hodkinson I D; et al. (2002). Herbivory in global climate change research: direct effects of rising temperature on insect herbivores. *Global Change Biology* **8**, 1-16.
- Boland G J; Melzer M S; Hopkin A; Higgins V; Nassuth A (2004). Climate change and plant diseases in Ontario. *Can. J. Plant Pathol.* **26**, 335-350.
- Chakraborty S; v. Tiedemann A; Teng P S (2000). Climate change: potential impact on plant diseases. *Environmental Pollution* **108**, 317-326.
- Coakley S M; Scherm H; Chakraborty S (1999). Climate change and plant disease management. *Annu. Rev. Phytopathol.* **37**, 399-426.
- Dunker S; Keunecke H; Steinbach P; Tiedemann A v.(2008). Impact of *Verticillium longisporum* on yield and morphology of winter oilseed rape (*Brassica napus*) in relation to systemic spread in the plant. *Journal of Phytopathology* (in press)
- Fuhrer J (2003). Agroecosystem responses to combinations of elevated CO₂, ozone, and global climate change. *Agriculture, Ecosystems and Environment* **97**, 1-20.
- Garrett K A; Dendy S P; Frank E E; Rouse M N; Travers S E (2006). Climate change effects on plant disease: genomes to ecosystems. *Annu. Rev. Phytopathol.* **44**, 489-509.
- Hannukkala A O; Kaukoranta T; Lehtinen A; Rahkonen A (2007). Late-blight epidemics on potato in Finland, 1933–2002; increased and earlier occurrence of epidemics associated with climate change and lack of rotation. *Plant Pathology* **56**, 167-176.
- Harrington R; Clark S J; Welham S J; Verrier P J; Denholm C H; Hullé M; Maurice D; Rounsevell M D; Cocu N (2007). Environmental change and the phenology of European aphids. *Global Change Biology* **13**, 1550-1564.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) (2007). Climate change 2007: Impacts, adaptation and vulnerability. Contribution of working group II to the fourth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, eds. M L Parry, O F Canziani, J P Palutikof, P J van der Linden & C E Hanson. Cambridge: Cambridge University Press.
- Kdimati H (1990). Untersuchungen zur Befallsprognose des Rapsglanzkäfers (*Meligethes aeneus* F.) an Winterraps. *Dissertation Universität Rostock*.
- Kleinhenz B; Jörg E (1998). Integrierter Pflanzenschutz - Rechnergestützte Entscheidungshilfen. *Schriftenreihe des Bundesministerium für Ernährung Landwirtschaft und Forsten: Angewandte Wissenschaft, Vol. 473*. Bonn.
- Kleinhenz B; Roßberg D (2000). Structure and development of decision-support systems and their use by the State Plant Protection Services in Germany. *Bulletin OEPP/EPPO* **30**, 93-97.
- Kluge E; Gutsche V; Kleinhenz B (1996). SIMCERC ein Prognosemodell für *Pseudocercospora herpotrichoides*. *Mitteilungen aus der Biologischen Bundesanstalt für Land- und Forstwirtschaft*, **321**, 357.

- Koch S; Dunker S; Kleinhenz B; Röhrig ; Tiedemann A v.(2007). A crop loss-related forecasting model for Sclerotinia stem rot in winter oilseed rape. *Phytopathology* **97**, 1186-1194.
- Manning W J; Tiedemann A v.(1995). Climate change: potential effects of increased atmospheric carbon dioxide (CO₂), ozone (O₃) and ultraviolet-B (UV-B) radiation on plant diseases. *Environmental Pollution* **88**, 219-245.
- Newton P C D; Carran R A; Edwards G R; Niklaus P A (Eds.) (2007). Agroecosystems in a Changing Climate. CRC Press, Taylor & Francis: Boca Raton.
- Oerke E C; Steiner U (1995). Ertragsverluste und Pflanzenschutz. Die Anbausituation für die wirtschaftlich wichtigsten Kulturpflanzen. Schriftenreihe der Deutschen Phytomedizinischen Gesellschaft, Bd. 6. Ulmer: Stuttgart.
- Oerke E C; Dehne H W (2003). Safeguarding production – losses in major crops and the role of crop protection. *Crop Protection* **23**, 275-285.
- Patterson D T; Westbrook J K; Joyce R J V; Lingren P D; Rogasik J (1999). Weeds, insects, and diseases. *Climatic Change* **43**, 711-727.
- Racca P; Jörg E (2007). CERCBET 3 – a forecaster for epidemic development of *Cercospora beticola*. *Bulletin OEPP/EPPO Bulletin* **37**, 344–349.
- Räder T; Racca P; Jörg E; Hau B (2007). PUCREC/PUCTRI – a decision support system for the control of leaf rust of winter wheat and winter rye. *Bulletin OEPP/EPPO Bulletin* **37**, 378–382.
- Scherm H; Coakley S M (2003). Plant pathogens in a changing world. *Australasian Plant Pathology* **32**, 157-165.
- Tiedemann A v. (1996). Globaler Wandel von Atmosphäre und Klima – welche Folgen ergeben sich für den Pflanzenschutz? *Nachrichtenb. d. deutsch. Pflanzenschutzd.* **48**, 73-79.
- Vietinghoff J (1985). Untersuchungen zur Schadwirkung und Befallsprognose des Rapsglanzkäfers (*Meligethes aeneus* F.). *Dissertation Universität Rostock*.

Ordon F: Pflanzenzüchterische Möglichkeiten der Anpassung von Nutzpflanzen an zukünftige Produktionsbedingungen. In: Tiedemann A v, Heitefuss R, Feldmann F (2008): Pflanzenproduktion im Wandel – Wandel im Pflanzenschutz, ISBN 978-3-941261-00-6; 90-102. © Deutsche Phytomedizinische Gesellschaft, Braunschweig, Germany

Pflanzenzüchterische Möglichkeiten der Anpassung von Nutzpflanzen an zukünftige Produktionsbedingungen

F Ordon

*Julius Kühn-Institut (JKI) – Bundesforschungsinstitut für Kulturpflanzen, Institut für Resistenzforschung und Stresstoleranz, Erwin-Baur-Str. 27, 06484 Quedlinburg
Email: frank.ordon.@jki.bund.de*

ZUSAMMENFASSUNG

Im Rahmen der Bewältigung der durch den Klimawandel und die steigende Weltbevölkerung - verbunden mit einem erhöhten Nahrungsmittel- und Bioenergiebedarf - entstehenden Herausforderungen kommt der Pflanzenzüchtung eine Schlüsselrolle zu, da das Saatgut und sein genetisches Potential am Anfang der Produktionskette stehen und einen entscheidenden Einfluss auf den Ertrag und die Qualität des Ernteproduktes haben. Die Verfügbarkeit effektiver molekularer Markertechniken, die steigende Sequenzinformation, die heute auch bei bedeutenden Kulturpflanzen zur Verfügung steht, die steigende Anzahl isolierter Gene und die Verfügbarkeit von Hochdurchsatzmarkertechnologien verlagern die Züchtung in zunehmendem Maße vom Phänotyp zum Genotyp, d.h. auf die DNA bzw. RNA Ebene und werden zukünftig eine allelbasierte Selektion ermöglichen. Daneben stehen der Züchtung heute gentechnische Verfahren zur Verfügung, die zusätzlich zur Nutzung vorhandener genetischer Variation neue Möglichkeiten eröffnen. Züchterische Möglichkeiten zur Verbesserung der Resistenz- bzw. Toleranzeigenschaften gegen abiotischen und biotischen Stress werden aufgezeigt.

EINLEITUNG

Der Klimawandel ist in der öffentlichen Diskussion und der Forschung eines der herausragenden Themen. Klimamodelle des Max Planck Institutes und Vorhersagen des IPCC (IPCC 2007) gehen für Deutschland bei der Annahme einer weltweit nicht wesentlich reduzierten anthropogenen Emission von Treibhausgasen und der Annahme, dass es nicht durch Veränderungen von Meeresströmungen oder verstärkten Vulkanismus zu einer Abkühlung kommt, von einem Anstieg

der Mitteltemperatur um 2,5-3,5 °C bis zum Jahr 2100 aus (für Einzelheiten vgl. Groß, 2007). Weiterhin ist mit diesem Temperaturanstieg eine Veränderung der Niederschlagsmenge- bzw. verteilung in Deutschland verbunden, d.h. in einigen Regionen wird eine Reduktion der Gesamtniederschlagsmenge zu beobachten sein, während sich in anderen Gebieten lang anhaltende Trockenphasen mit Perioden extremer Niederschläge abwechseln können.

Als Reaktion auf diese Szenarien ist es ein erklärtes Ziel der Industrieländer, insbesondere den Ausstoß des klimaschädlichen CO₂ drastisch zu reduzieren. Vor diesem Hintergrund kommt der landwirtschaftlichen Biomasseproduktion und deren Nutzung als Energieträger, sei es die Nutzung von Rapsmethylester als sog. „Biodiesel“, die Nutzung von Stärke und Zucker zur Bioethanolerzeugung oder die Nutzung der gesamten Biomasse in Biogasanlagen, eine besondere Bedeutung zu, da die Verwendung pflanzlicher Biomasse zur Energieerzeugung im Gegensatz zum Einsatz fossiler Brennstoffe als CO₂-neutral zu betrachten ist. Einer ungebremsen Ausdehnung der Biomasseproduktion zur Energieerzeugung steht jedoch die Notwendigkeit entgegen, bereits im Jahre 2050 bei einer weltweit nur begrenzt zu erweiternden landwirtschaftlichen Nutzfläche 9Mrd. Menschen ernähren zu müssen. Diese Konkurrenzsituation wird weiter verschärft durch eine steigende Nachfrage nach Fleischerzeugnissen insbesondere in den aufstrebenden Entwicklungsländern.

Neben einer Ausdehnung der landwirtschaftlichen Nutzfläche und pflanzenbaulichen Maßnahmen, d.h. veränderten Fruchtfolgen und Produktionsmethoden (Aussaatzeit, Aussaatstärke, Bewässerung etc.; vgl. Christen, 2007), liegt ein Schlüssel für die Bewältigung dieser Herausforderungen in der züchterischen Verbesserung der Kulturpflanzen im Hinblick auf eine Anpassung an sich verändernde Klimabedingungen und Nutzungsrichtungen. Diese züchterischen Verbesserungen umfassen einerseits eine Steigerung der Ertragsleistung in Abhängigkeit vom jeweiligen Verwendungszweck, sowie andererseits eine Anpassung an sich verändernde abiotische Stressbedingungen wie Trockenheit und Hitze. Darüber hinaus ist zukünftig – wie bereits heute - die Verbesserung der Resistenzeigenschaften allgemein sowie im Besonderen gegen neu auftretende bzw. bisher wenig bedeutende Schaderreger im Hinblick auf eine Ertragssicherung sowie eine umwelt- und verbraucherfreundliche Pflanzenproduktion essentiell.

Zum Erreichen dieser Ziele stehen der Pflanzenzüchtung heute, neben den klassischen Selektionsmethoden, die bereits zu deutlichen Verbesserungen in der Ertragsleistung und den Resistenz- und Qualitätseigenschaften unserer Kulturpflanzen geführt haben (Fufa *et al.*, 2005; Ordon *et al.*, 2005), verschiedenste molekulare Methoden und Erkenntnisse der Genomanalyse ebenso wie gentechnische Verfahren zur Verfügung.

KLASSISCHE SELEKTIONSMETHODEN UND GENOMANALYSE

Die klassischen Selektionsmethoden - wie die Pedigreeselktion bei Selbstbefruchtern – bilden nach wie vor das Rückgrat auch der modernen Pflanzenzüchtung und haben in der Linienzüchtung, Populationszüchtung, Klonzüchtung und Hybridzüchtung in den vergangenen Jahrzehnten weltweit zu erheblichen Ertragssteigerungen und Verbesserungen in der Qualität und Resistenz geführt. In den verschiedenen Phasen der Sortenzüchtung, d.h. (i) der Schaffung genetischer Variation, (ii) der Selektion von Sortenkandidaten und (iii) der Erhaltung und Vermehrung von Sortenkandidaten, werden heute - neben Verfahren der Zell- und Gewebekultur, z.B. zur Erzeugung haploider bzw. doppelhaploider Pflanzen, welche in der Linien- und Hybridzüchtung zu einer wesentlichen Beschleunigung des Zuchtganges führen, oder der Nutzung der Protoplastenfusionen bzw. gentechnischer Verfahren zur Erzeugung neuer genetischer Variation (vgl. Friedt & Ordon, 2006) - in erheblichem Umfang molekulare Methoden eingesetzt bzw. Erkenntnisse aus der Genomanalyse genutzt. Einen Überblick über diese Verfahren und deren Einsatzmöglichkeiten gibt Abbildung 1.

Bis in die 1990er Jahre war die Selektion ausschließlich auf den Phänotyp, d.h. das Erscheinungsbild der Pflanze, welches vom Genotyp einerseits und den Umweltbedingungen andererseits determiniert wird, beschränkt. Der Erfolg der phänotypischen Selektion ist in entscheidendem Maße abhängig von der Sicherheit, mit welcher vom Phänotyp auf den Genotyp zurückgeschlossen werden kann, d.h. der Heritabilität. Molekulare Methoden, seien es Amplified Fragment Length Polymorphisms (AFLPs), Simple Sequence Repeats (SSRs), oder andere Markertechniken beruhen dagegen auf Unterschieden in der DNA- bzw. RNA-Sequenz kontrastierender Phänotypen und erlauben bei hinreichend enger Kopplung mit Majorgenen bzw. Quantitative trait loci (QTL), insbesondere jedoch bei Kenntnis der Sequenz entsprechender Gene, eine sichere, auf dem Genotyp beruhende, umweltunabhängige Selektion in frühen Entwicklungsstadien der Pflanzen (z.B. Friedt & Ordon, 2007). Waren zu Beginn der Nutzung molekularer Techniken in der Pflanzenzüchtung lediglich wenige Marker für einfach vererbte Merkmale, z.B. Resistenzen, bekannt (z.B. Graner & Bauer, 1993), so stehen heute - z.B. in der Gerste - dichte, genomabdeckende genetische Karten zur Verfügung (Rostocks *et al.*, 2005; Stein *et al.*, 2007; Varshney *et al.*, 2007), und molekulare Marker konnten für eine Vielzahl von Majorgenen und QTL entwickelt werden (Friedt & Ordon, 2007), welche effektive markergestützte Selektionsverfahren im Hinblick auf die verschiedensten Zuchtziele erlauben. Molekulare Techniken wie DArTs (Diversity Array Technology, Wenzl *et al.*, 2004), oder der auf Single Nucleotide Polymorphisms (SNPs) beruhende Illumina GoldenGate Assay (Hyten *et al.*, 2008), ermöglichen heute weiterhin eine Genotypisierung im Hochdurchsatzverfahren und ebnen den Weg für eine Nutzung assoziationsgenetischer Verfahren in der Pflanzenzüchtung (Caldwell *et al.*, 2006; Rostocks *et al.*, 2006; Comadran *et al.*, 2008).

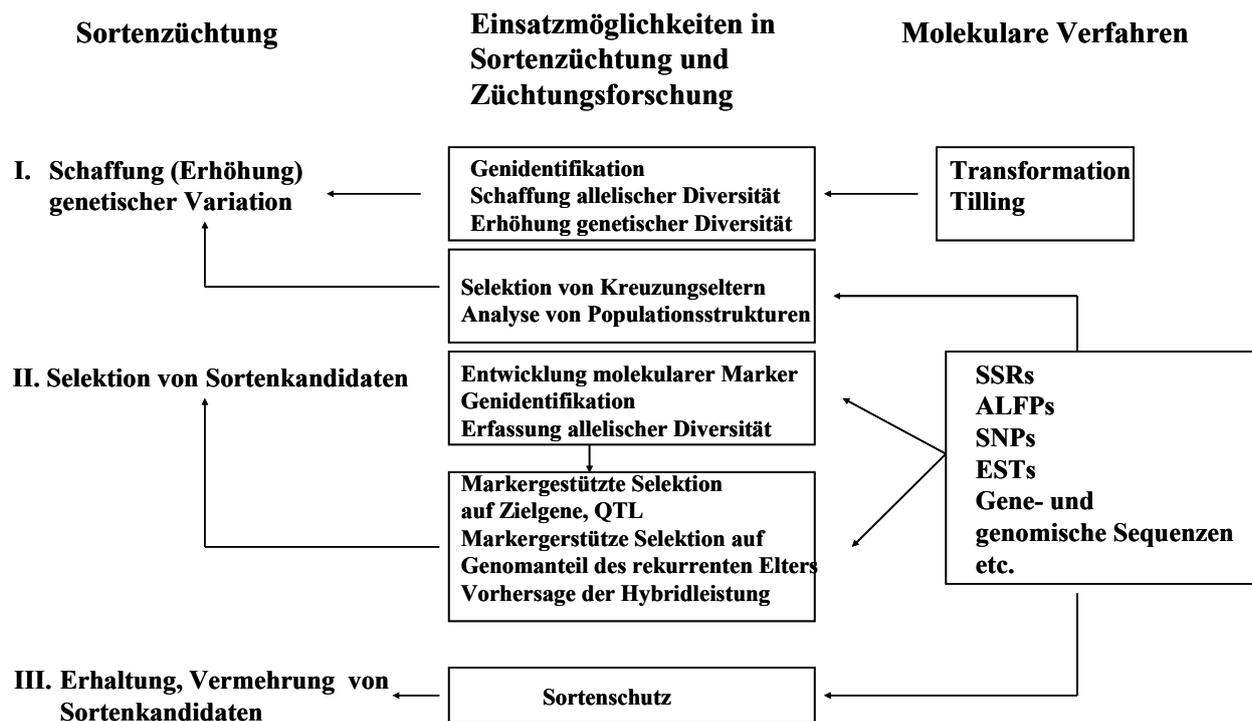


Abb. 1: Ausgewählte molekulare Methoden und deren Einsatzmöglichkeiten in Züchtungsforschung und Sortenzüchtung

Insbesondere jedoch die Fortschritte in der Genomsequenzierung, - die Sequenzen der Modellpflanzen *Arabidopsis thaliana* (Arabidopsis Genome Initiative 2001) und Reis (*Oryza sativa*, Goff *et al.*, 2002) sind seit Anfang der 2000er bekannt und auch bei unseren Hauptkulturarten steigt die Sequenzinformation ständig (vergleiche NCBI-Datenbank, <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/>) – haben im Zusammenspiel mit der Entwicklung von Verfahren zur Identifikation differentiell exprimierter Gene (z.B. Kong *et al.*, 2007) und zum Funktionsnachweis entsprechender Gene mittels TILLING (Targeted Induced Local Lesions in Genomes, Till *et al.*, 2006) bzw. gentechnischer Verfahren (Stein *et al.*, 2005), zur Identifikation einer Vielzahl von Genen geführt, welche heute gezielt in konventionellen und gentechnischen Verfahren im Hinblick auf eine Verbesserung der Anpassung von Kulturarten an heutige und zukünftige Herausforderungen genutzt werden können.

ABIOTISCHER STRESS – TROCKENTOLERANZ

Pflanzen haben komplexe Mechanismen für die Anpassung an Trockenheit entwickelt. Faktoren, welche diese Anpassung bedingen, sind z.B. das Wasseraufnahmevermögen durch die Wurzel, das Wasserhaltevermögen in den Zellen, die Wasserabgabe durch die Stomata sowie der Blühzeitpunkt in Abhängigkeit vom Auftreten der Trockenheit. Im Rahmen dieser Anpassungsprozesse produzieren Wurzeln Moleküle, welche eine Wasseraufnahme aus immer trockener werdenden Böden ermöglichen, Zellen entgiften reaktive Sauerstoffradikale, welche

während der Dehydration entstehen, und produzieren Moleküle, welche das Wasser in den Zellen halten (Pennisi, 2008). Es sind also komplexe Vorgänge, welche die Trockentoleranz bedingen an der eine Vielzahl von Genen beteiligt sind. Dementsprechend ist dieses Merkmal züchterisch in landwirtschaftlich bedeutenden Kulturarten nur schwierig zu bearbeiten, da gleichzeitig eine Vielzahl von QTL markergestützt zu bearbeiten sind, deren Expression stark umweltabhängig ist und die häufig nur einen kleinen Teil der phänotypischen Varianz erklären. Vergleichende Analysen von verschiedenen QTL-Studien in öffentlichen Datenbanken (GRAMENE: <http://www.gramene.org/>; GRAINGENES: <http://wheat.pw.usda.gov/GG2/>; Cattivelli *et al.*, 2008) zeigen häufig, dass an der genetischen Variation bezüglich agronomischer und physiologischer Parameter der Trockenstresstoleranz große Teile des gesamten Genoms beteiligt sind.

Inzwischen konnten jedoch - im Wesentlichen in Modellpflanzen - eine Vielzahl von Genen, welche an diesem komplexen Merkmal beteiligt sind, identifiziert werden. Es sind dies einerseits Gene, welche für Osmolyte wie Prolin, Gylcin-Betain, Mannitol, Trehalose oder Galactinol kodieren, andererseits Gene für Enzyme, welche an der Eliminierung freier Sauerstoffradikale, die als Reaktion auf den Trockenstress entstehen, beteiligt sind, wie Superoxid Dismutase oder Glutathion Oxidase. Ebenso die sogenannten LEA (Late embryogenesis abundant proteins) Proteine, die eine erhöhte Wasserbindungskapazität in den Zellen bedingen. Weiterhin sind Gene für sogenannte „Heat shock Proteine“ bekannt, denen insbesondere im Rahmen der Adaption an Hitzestress eine Bedeutung zukommt. Neben diesen Genen, die für einzelne Proteine bzw. Moleküle kodieren, die im Zusammenhang mit der Trockentoleranz von Bedeutung sind, konnten Transkriptionsfaktoren aus verschiedenen Familien, wie AP2/ERF, bZIP, NAC, MYB oder WRKY, identifiziert werden, welche eine gesamte Kaskade von Genen steuern, die an der Trockentoleranz beteiligt sind, ebenso wie Gene, welche in die Signaltransduktion involviert sind. Eine Übersicht über diese Gene und ihre Nutzung geben z.B. Cattivelli *et al.* (2008), Friedt und Link (2007), Bhatnagar-Mathur *et al.* (2007).

Ist in der Kulturpflanzenart selbst genetische Variation für Trockentoleranz vorhanden, die sich auf diese Gene zurückführen lässt, so kann diese effektiv in markergestützten Selektionsverfahren genutzt werden. In diesem Zusammenhang konnten beispielweise jüngst in der Gerste im Rahmen umfassender Transkriptom-Analysen (Talame *et al.*, 2007) Gene bzw. mittels assoziationsgenetischer Verfahren (Comadran *et al.* 2008) Chromosomenbereiche identifiziert werden, die an der Trockentoleranz beteiligt sind.

Die umfangreichsten Erkenntnisse über die Mechanismen der Trockentoleranz und deren Regulation liegen jedoch aus der Modellpflanze *Arabidopsis thaliana* vor. Diese können heute über gentechnische Verfahren auch zur Verbesserung der Trockentoleranz von Kulturpflanzen genutzt werden. So konnte beispielsweise gezeigt werden, dass mit dem aus *Arabidopsis thaliana* stammenden Transkriptionsfaktor DREB1A transformierter Weizen unter

Gewächshausbedingungen deutlich verzögert Welkesymptome zeigt im Vergleich zur nicht transformierten Kontrolle (Pellegrineschi *et al.*, 2004).

Neben der züchterischen Anpassung etablierter Kulturarten an Dürre und steigende Temperaturen besteht eine weitere Möglichkeit, den sich ändernden Klimabedingungen zu begegnen in der Einführung neuer, trockenoleranterer Kulturarten, z.B. der Sorghum-Hirse (*Sorghum bicolor*) – insbesondere im Hinblick auf die Bioenergieerzeugung. Ein wesentliches Zuchtziel in diesem Zusammenhang ist, vergleichbar mit dem Mais, die Verbesserung der Kühletoleranz. Hier liegen insbesondere beim Mais bereits umfangreiche Arbeiten zur Genetik der Kühletoleranz und deren Nutzung vor (Presterl *et al.*, 2007; Leipner *et al.*, 2008). Entsprechende Erkenntnisse können, bedingt durch die Syntenie zwischen den *Poaceae* (Moore *et al.*, 1995), u. U. in Sorghum genutzt werden.

BIOTISCHER STRESS – PATHOGENRESISTENZ

In den vergangenen Jahrzehnten hat die Pflanzenzüchtung im Bereich der Resistenz bzw. der Kombination von Resistenzeigenschaften mit Ertrag und Qualität bereits erhebliche Erfolge erzielt. Waren beispielsweise bei der Wintergerste 1985 lediglich zwei ertragsschwache von insgesamt 38 in Deutschland zugelassenen Sorten hinreichend resistent gegen Mehltau (1-3), so waren es 2007 bereits 30 Sorten mit z.T. hervorragenden Ertragsseigenschaften und weiteren Resistenzen gegenüber Zwergrost (*Puccinia hordei*), *Rhynchosporium secalis* und der Gelbmosaikvirose (vgl. Anonymus, 1985, 2007).

Ausgangspunkt einer erfolgreichen Resistenzzüchtung ist die Identifikation von Resistenzträgern, gefolgt von der Aufklärung der Genetik der Resistenz und deren züchterischer Nutzbarmachung, für die heute effektive Zell- und Gewebekulturtechniken sowie insbesondere molekulare Markertechniken zur Verfügung stehen (s.o., Ordon, 2006). Bedingt durch die Fortschritte in der Genomanalyse wird die Anzahl isolierter Resistenzgene auch aus komplexen Genomen von Kulturpflanzen in den nächsten Jahren steigen und basierend auf allelspezifischen Sequenzunterschieden können entsprechende Gene/Allele im Selektionsprozess dann ohne störende Rekombinationsereignisse zwischen Marker und Zielgen verfolgt werden. Andererseits erlauben es heute gentechnische Verfahren in genetischen Ressourcen identifizierte Gene bzw. wirksamere Allele in adaptiertes Zuchtmaterial einzubringen, ohne weitere erwünschte Merkmalskomplexe durch Rekombination zu zerstören.

Gentechnische Verfahren ermöglichen darüber hinaus - neben der bereits weltweit genutzten *Bt*-Resistenz – die Nutzung weiterer innovativer Ansätze zur Verbesserung von Resistenzeigenschaften, wie z.B. die Nutzung weiterer insektenpathogener Proteine (Whitehouse *et al.*, 2007), die Expression spezifischer Antikörper, gekoppelt mit antifungalen Proteinen, welche in *Arabidopsis thaliana* zu einer gesteigerten Fusarium-Resistenz führt (Peschen *et al.*,

2004), oder die Nutzung des gene silencing durch die Übertragung kurzer sogenannter „interfering RNAs (RNAi)“ zur Erzeugung von Virusresistenz (Bonfim *et al.*, 2007) und Insektenresistenz (Baum *et al.* 2007). Der Pflanzenzüchtung steht somit über Zell- und Gewebekulturtechniken, molekulare Marker und gentechnische Verfahren ein breites methodisches Repertoire im Hinblick auf eine Verbesserung der Resistenzeigenschaften zur Verfügung.

Die prognostizierte Erwärmung, welche regional stark differenziert, jedoch im allgemeinen durch mildere und feuchtere Winter bzw. wärmere und trockenere Sommer gekennzeichnet sein wird, hat nicht nur einen direkten Einfluss auf das Wachstum und die Ertragsleistung der Kulturpflanzen selbst, sondern entsprechende Klimaänderungen haben auch erhebliche Auswirkungen auf das Auftreten phytopathogener Insekten, Pilze, Viren und Bakterien. So ist einerseits mit dem Vordringen wärmeliebender Pathogene nach Norden zu rechnen sowie andererseits mit Verschiebungen in der Bedeutung bereits etablierter Pathogene. Im Bereich des Getreides und der pilzlichen Schaderreger werden milde Winter mit einem frühzeitigen und starken Auftreten von Mehltau und Rosten einhergehen (Patterson *et al.*, 1999) – so könnte auch in Deutschland der Schwarzrost (*Puccinia graminis*) zu einem bedeutenden Schaderreger werden - während bei einem warmen, trockenem Frühjahr von einer Reduktion des Befalls insbesondere mit *Rhynchosporium secalis*, *Septoria* spp. und *Pyrenophora* spp. auszugehen ist und bei trockenem warmen Sommern auch von einer Reduktion der Fusarium Infektionen. Insbesondere gegenüber pilzlichen Schaderregern sind z.B. in der Gerste (vgl. Friedt & Ordon, 2007), aber auch bei anderen bedeutenden Kulturarten molekulare Marker für eine Vielzahl von Resistenzgenen und QTL bekannt, und es konnten bereits verschiedene Resistenzgene isoliert werden, z.B. gegenüber dem Mehltau der Gerste (*Blumeria graminis* f. sp. *hordei*) die Resistenzgene *mlo*, *Mla6* und *Mla1* (Übersicht, Stein & Graner, 2004) oder gegenüber der Gelbmosaikvirose der Resistenzlocus *Rym4* (Stein *et al.*, 2005). Sind entsprechende Resistenzgene bekannt, so kann einerseits in TILLING-Populationen (s. o.) nach neuen u. U. wirksameren Allelen gesucht werden (Kanyuka *et al.*, 2005), oder es können große Genbankkollektionen im Hinblick auf allelische Diversität analysiert werden. Entsprechende in nicht adaptierten Genotypen identifizierte Gene oder Allele können in einem nächsten Schritt effektiv markergestützt in adaptiertes Zuchtmaterial eingebracht werden, z.B. durch markergestützte Rückkreuzungsprogramme (vgl. Ordon *et al.*, 2003), bzw. es können Resistenzgene gegen verschiedene Pathogene effektiv markergestützt kombiniert werden.

Weiterhin erlauben entsprechende Marker insbesondere in Verbindung mit Haploidtechniken die Kombination von Resistenzgenen gegen ein Pathogen (Pyramidisierung), wodurch die Nutzungsdauer gegen bestimmte Isolate bzw. Rassen unwirksamer Resistenzgene verlängert werden kann. Abbildung 2 zeigt die markergestützte Identifikation von Genotypen, welche nach einer Kreuzung für ein Resistenzgen (*rym4*) homozygot und für die beiden anderen (*rym9* und *rym11*) heterozygot sind. Wird eine solche Pflanze zur DH-Linien Produktion herangezogen, so entstehen zu 25% DHs, welche alle drei Resistenzgene homozygot tragen, und zu 50% DHs mit zwei homozygoten Resistenzgenen (Werner *et al.*, 2005, 2007).

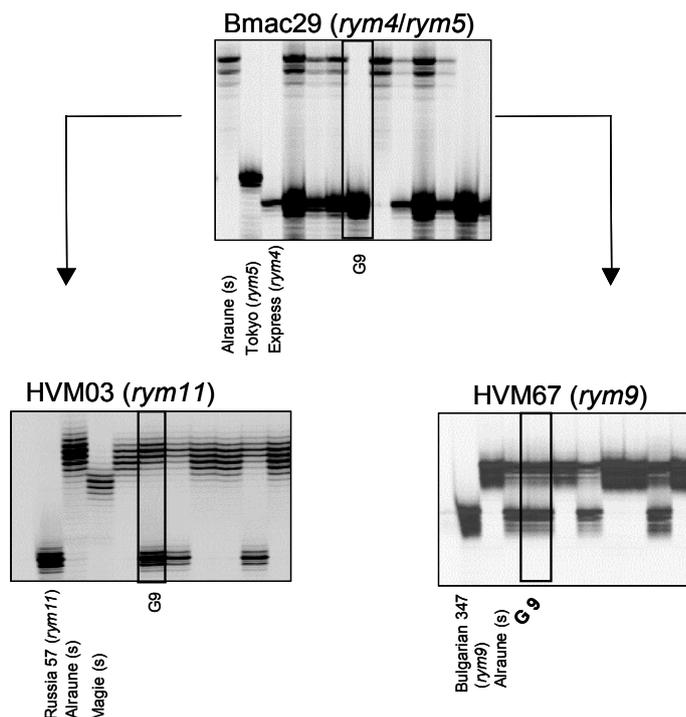
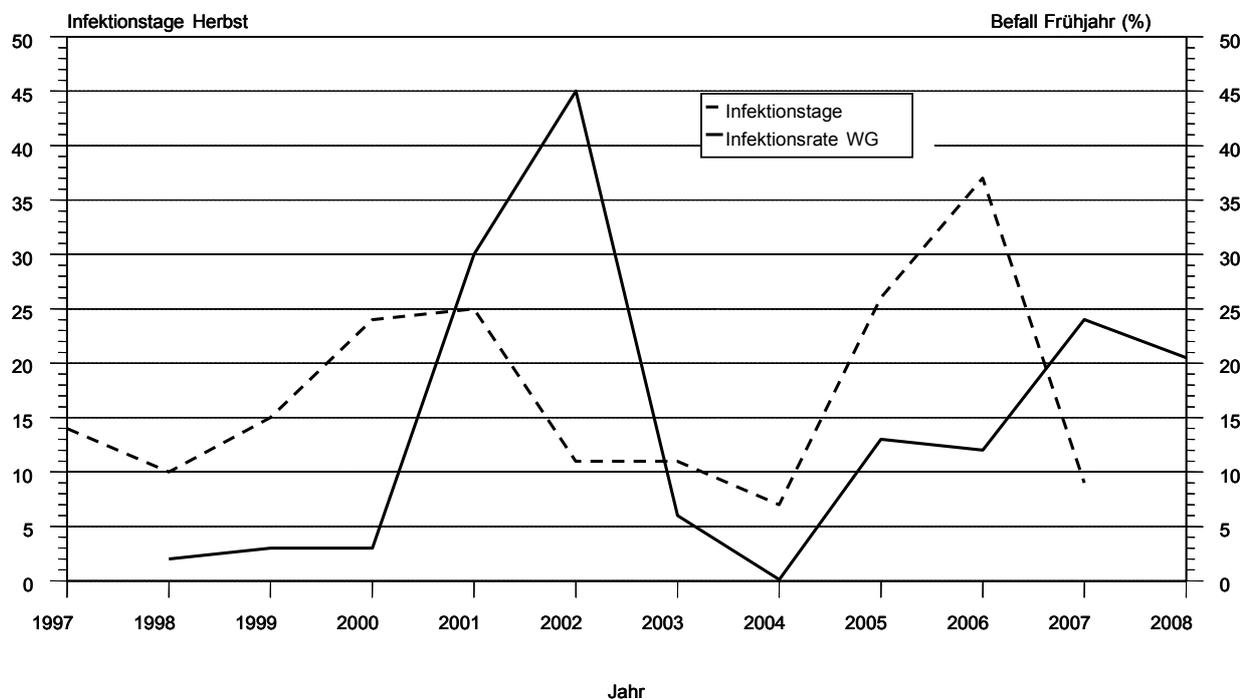


Abb. 2: Markergestützte Identifikation eines am *Rym4/Rym5* Locus homozygoten und an den Loci *Rym11* und *Rym9* heterozygoten Genotyps als Ausgangspunkt für eine Pyramidisierung dieser drei rezessiven Gelbmosaikvirus-Resistenzgene mittels DH-Linien und molekularen Markern (Werner et al. 2007)

Eine Erhöhung der Durchschnittstemperaturen hat insbesondere Einfluss auf das Auftreten von Schadinsekten und insektenübertragenen Viren. Ein Anstieg der Durchschnittstemperatur um 3-6°C kann bei Insekten eine Arealerweiterung von bis zu 1000 km nördlich ermöglichen (Chimelewski, 2007), so dass anholozyklisch überwintrende Arten wie die Maisblattlaus (*Rhopalosiphum maidis*) oder die Russische Weizenlaus (*Diuraphis noxia*) als Direktschädlinge bzw. Virusvektoren an Bedeutung gewinnen. In Bezug auf *Diuraphis noxia*, welche in vielen Anbaugebieten der Erde ein Direktschädling ist, liegen bereits umfangreiche Erkenntnisse zur Genetik der Resistenz und entsprechende molekulare Marker vor (Peng et al., 2007; Liu et al., 2005), welche eine beschleunigte Introgression dieser Resistenz in adaptierte Weizensorten ermöglichen. Weiterhin können sich bei milden Wintertemperaturen bei bisher holozyklisch überwintrenden Arten anholozyklische Populationen bilden, die keinen Wirtswechsel mehr benötigen und somit den ganzen Winter permanent auf ihren Wirtspflanzen verbringen, so dass davon auszugehen ist, dass insbesondere insektenübertragene Viren aufgrund der länger andauernden Vektoraktivität und der u. U. anholozyklischen Überwinterung von Blattläusen an Bedeutung gewinnen werden. Im Getreideanbau ist hier in erster Linie die blattlausübertragene Gerstengelbverzwergung zu nennen, welche durch verschiedene Stämme des *Barley yellow dwarf virus* (BYDV) und des *Cereal yellow dwarf virus* (CYDV) verursacht wird, wobei unter den jetzigen klimatischen Bedingungen BYDV-PAV in unseren Breiten am bedeutendsten ist. In

Abbildung 3 wird deutlich, dass bereits heute ein Zusammenhang zwischen der Anzahl der Infektionstage im Herbst und dem Befall der Wintergerstenflächen mit BYDV im Frühjahr nachweisbar ist.



Infektionstage= Anzahl Tage mit Tagesmitteltemperaturen $\geq 10^{\circ}\text{C}$ vom 1.10. bis 31.12.

Abb. 3: Beziehung zwischen BYDV-Befall von Wintergerste im Frühjahr und Herbsttemperatur (Habekuß und Schliephake, in Vorbereitung)

Bezüglich der Toleranz gegenüber BYDV konnten verschiedene Gene bzw. QTL im Gerstengenom lokalisiert und eng gekoppelte Marker entwickelt werden; es sind dies *Ryd2* (Ford *et al.*, 1996), *Ryd3* (Niks *et al.*, 2004) und ein QTL aus der Sorte 'Post' (Scheurer *et al.*, 2001). Weitergehende Arbeiten zielen nun darauf ab, mittels entsprechender DH-Linien und eng gekoppelter Marker diese Loci in einem Genotyp zu kombinieren, sogenannte Pyramidisierung, um durch eine Kombination dieser Loci das Resistenzniveau gegenüber BYDV zu verbessern. Loci für Toleranz gegenüber BYDV und entsprechende Marker sind ebenfalls in Weizen (z.B. Zhang *et al.*, 2001) und Hafer (Jin *et al.*, 2001) bekannt.

Neben der blattlausübertragenen Gelbverzwergung der Gerste ist in Deutschland bei steigenden Temperaturen ebenfalls von einem verstärkten Auftreten des *Wheat dwarf virus* (WDV) auszugehen, welches von der Zikadenart *Psammotettix alienus* übertragen wird. Im Gegensatz zu BYDV sind jedoch bisher für eine Toleranz gegenüber WDV keine QTL bekannt. In umfangreichen Screeningprogrammen konnte lediglich die Sorte 'Post' als tolerant identifiziert werden, die nun weitergehenden genetischen Analysen unterzogen wird (Habekuß *et al.*, 2008).

Demgegenüber sind für die Resistenz des Rapses gegenüber dem aphidenübertragenen *Turnip yellows virus* (TuYV) bereits cosegregierende molekulare Marker bekannt, welche eine effektive

markergestützte Selektion und damit eine gezielte Inkorporation dieser Resistenz, der vor dem Hintergrund des Klimawandels und der zu erwartenden Ausdehnung der Rapsanbaufläche eine steigende Bedeutung zukommen wird, ermöglichen (Jürgens *et al.*, 2007).

LITERATUR

- Anonymus (1985, 2007). Beschreibende Sortenliste für Getreide, Mais, Ölfrüchte, Leguminosen (großkörnig), Hackfrüchte (außer Kartoffeln), hrsg. Bundessortenamt. Deutscher Landwirtschaftsverlag: Hannover.
- Arabidopsis Genome Initiative (2001). Analysis of the genome sequence of the flowering plant *Arabidopsis thaliana*. *Nature* **408**, 796-815.
- Baum J A; Bogaert T; Clinton W; Heck G R; Feldmann P; Johnson S; Plaetinck G; Munyikwa T; Pleau M; Vaughn T; Roberts J (2007). Control of coleopteran insect pests through RNA interference. *Nature Biotechnology* **25**, 1322-1326.
- Bhatnagar-Mathur P; Vadez V; Sharma K K (2008). Transgenic approaches for abiotic stress tolerance in plants: retrospect and prospects. *Plant Cell Rep* **27**, 411-424 .
- Bonfim K; Faria J C; Nogueira E O P L; Mendes E A; Aragao F J L (2007). RNAi-mediated resistance to Bean golden mosaic virus in genetically engineered common bean (*Phaseolus vulgaris*). *Molecular Plant-microbe interactions* **20**, 717-726.
- Caldwell K S; Russell J; Langridge P; Powell W 2006. Extreme population-dependent linkage disequilibrium detected in an inbreeding plant species, *Hordeum vulgare*. *Genetics* **172**, 557-567.
- Cattivelli L; Rizza F; Badeck F; Mazzucotelli E; Mastrangelo A M; Francia E; Mare C; Tondelli A; Stanca A M 2008. Drought tolerance improvement in crop plants: An integrated view from breeding to genomics. *Field Crops Research* **105**, 1-14.
- Chmielewski F M (2007). Folgen des Klimawandels für Land- und Forstwirtschaft. In: Der Klimawandel. Einblicke, Ausblicke und Rückblicke, eds F Endlicher, F W Gerstengarbe, pp. 81-83. Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung e.V.: Potsdam.
- Christen O (2007). Auswirkungen des Klimas auf die Pflanzenproduktion. *Vorträge Pflanzenzüchtung* **72**, 15-17.
- Comadran J; Russel J R; van Eeuwijk F A; Cecacarelli S; Grando S; Baum M; Stanca A M; Peccioni N; Mastrangelo A M; Akar T; Al Yassin A; Benbelkacem A; Choumane W; Ouabbou H; Dahan R; Bort J; Araus J L; Pswarayi A; Romagosa I; Hackett C A; Thomas W T B (2008). Mapping adaptation of barley to droughted environments. *Euphytica* **161**, 35-45.
- Ford C M; Paltridge N G; Rathjen J P; Moritz R L; Simpson R J; Symons R H (1998). Rapid and informative assays for Yd2, the barley yellow dwarf virus resistance gene, based on the nucleotide sequence of a closely linked gene. *Mol Breeding* **4**, 23-31

- Friedt W; Ordon F (2006). Pflanzenzüchtung – Klassische und moderne Methoden. In: *Lehrbuch des Pflanzenbaues, Bd. 1. Grundlagen*, N Lütke Entrup, N Oehmichen, pp. 713-772. AgroConcept: Bonn.
- Friedt W; Ordon F (2007). Molecular markers for gene pyramiding and disease resistance breeding in barley. In: *Genomics assisted crop improvement*, eds R Varshney, R Tuberosa, pp. 81-101. Springer: Berlin.
- Friedt W; Link K (2007). Ansätze der Züchtung auf Stresstoleranz. *Vorträge Pflanzenzüchtung* **72**, 69-77.
- Fufa H; Baenzinger P S; Beecher B S; Graybosch R A; Eskridge K M; Nelson L A (2005). Genetic improvement trends in agronomic performances and end-use quality characteristics among hard red winter wheat cultivars. *Euphytica* **144**, 187-198.
- Graner A; Bauer E (1993). RFLP mapping of the ym4 virus resistance gene in barley. *Theor. Appl. Genet* **86**, 689-693.
- Goff S A; et al. (2002). A draft sequence of the rice genome (*Oryza sativa* L. ssp. *japonica*). *Science* **296**, 92-100.
- Groß G (2007). Klimaperspektiven für das 21. Jahrhundert. *Votr Pflanzenzüchtung* **72**, 9-14.
- Habekuß A; Riedel C; Ordon F (2008). Wheat dwarf virus on barley in Germany - Importance and screening for resistance. *10th International Barley Genetics Symposium, Alexandria (Egypt), 5-10 April 2008*, Abstract 6&7-14.
- Hyten D L; Song Q; Choi I Y; Yoon M S; Specht J E; Matukumalli L K; Nelson R L; Shoemaker R C; Young N D; Cregan P B (2007). High-throughput genotyping with the GoldenGate assay in the complex genome of soybean. *Theor Appl Genet* **116**, 945-952.
- IPCC (2007). Summary for Policymakers. In: *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, eds M L Parry, O F Canziani, J P Palutikof, P J van der Linden, C E Hanson. Cambridge University Press: Cambridge, United Kingdom, and New York, NY, USA
- Jin H; Domier L L; Kolb F L; Brown C M 1998. Identification of quantitative loci for tolerance to barley yellow dwarf virus in oat. *Phytopathology* **88**, 410-415
- Juergens M; Krämer R; Snowdon R; Rabenstein F; Ordon F (2006). Genetische Untersuchungen zur Turnip yellows virus (TuYV) Resistenz bei Winterraps (*Brassica napus* L.) und Entwicklung molekularer Marker. *Bericht über die 57. Pflanzenzüchertagung, 21.-23.11.2006, Gumpenstein, Österreich*, 106.
- Kanyuka K; Druka A; Caldwell D G; Tymon A; McCallum N; Waugh R; Adams M J (2005). Evidence that the recessive bymovirus resistance locus *rym4* in barley corresponds to the eukaryotic translation initiation factor 4E gene. *Mol Plant Pathol* **6**, 449-458.
- Kong L; Ohm H W; Anderson J M (2007). Expression analysis of defense-related genes in wheat in response to infection by *Fusarium graminearum*. *Genome* **50**, 1038-1048.

- Leipner J; Jompuk C; Camp K H; Stamp; P; Fracheboud Y (2008). QTL studies reveal little relevance of chilling-related seedling traits for yield in maize. *Theor Appl Genet* **116**, 555-562.
- Liu X M; Smith C M; Friebe B R; Gill B S (2005). Molecular mapping and allelic relationships of Russian wheat aphid-resistance genes. *Crop Science* **45**, 2273-2280.
- Moore, G 1995. Cereal genome evolution: pastoral pursuits with "Lego" genomes. *Cur Opin Genetics & Development* **5**,717-724.
- Niks R E; Habekuss A; Bekele B; Ordon F (2004). A novel major gene on chromosome 6H for resistance of barley against the barley yellow dwarf virus. *Theor Appl Genet* **109**, 1536-1543.
- Ordon F (2006). Züchtungsstrategien zur Verbesserung der Pathogenresistenz von Kulturpflanzen. *Agrarspectrum* **39**, 103-114.
- Ordon F; Werner K; Pellio B; Schiemann A; Friedt W; Graner A (2003). Molecular breeding for resistance to soil-borne viruses (BaMMV, BaYMV, BaYMV-2) of barley (*Hordeum vulgare* L.). *J Plant Dis Prot.* **110**, 287-295.
- Ordon F; Ahlemeyer J; Köhler W K; Friedt W (2005). Molecular assessment of genetic diversity in winter barley and its use in breeding. *Euphytica* **146**, 21-28.
- Patterson D T; Westbrook J K; Joyce R J V; Lindgren P D; Rogasik J (1999). Weeds, insects, and diseases. *Climatic Change* **43**, 711-727.
- Pellegrineschi A; Reynolds M; Pacheco M; Brito R M; Almeraya R; Yamaguchi-Shinozaki K; Hoisington D (2004). Stress-induced expression in wheat of the Arabidopsis thaliana DREB1A gene delays water stress symptoms under greenhouse conditions. *Genome* **47**, 493-500.
- Peng J; Wang H; Haley S D; Peairs F B; Lapitan N L V (2007). Molecular mapping of the Russian wheat aphid resistance gene Dn2414 in wheat. *Crop Science* **47**, 2418-2429.
- Pennisi E (2008). Plant genetics: The blue revolution, drop by drop, gene by gene. *Science* **320**, 171-173.
- Peschen D; Li H P; Fischer R; Kreuzaler F; Liao Y C (2004). Fusion protein comprising a Fusarium-specific antibody linked to antifungal peptides protect plants against a fungal pathogen. *Nature Biotechnology* **22**, 732-738.
- Presterl T; Ouzunova M; Schmidt W; Moller E M; Roeber F K; Knaak C; Ernst K; Westhoff P; Geiger H H (2007). Quantitative trait loci for early plant vigour of maize grown in chilly environments. *Theor Appl Genet* **114**, 1059-1070.
- Rostocks N; Mudie S; Cardle L; Russell J; Ramsay L; Booth A; Svensson J; Wanamaker S; Walia H; Rodriguez E; Hedley P; Liu H; Morris J; Close T; Marshall D; Waugh R (2005). Genome-wide SNP-discovery and linkage analysis in barley based on genes responsive for abiotic stress. *Mol Gen Genomics* **274**, 515-527.

- Rostoks N; Ramsay L; MacKenzie K; Cardle L; Bhat P R; Roose, M L; Svensson J T; Stein N; Varshney R K; Marshall D F; Graner A; Close T J; Waugh R (2006). From the Cover: Recent history of artificial outcrossing facilitates whole-genome association mapping in elite inbred crop varieties. *PNAS* **103**, 18656-18661.
- Scheurer K S; Friedt W; Huth W; Waugh R; Ordon F (2001). QTL analysis of tolerance to a German strain of BYDV-PAV in barley (*Hordeum vulgare* L.). *Theor Appl Genet* **103**, 1074–1083.
- Stein N; Graner A (2004). Map-based gene isolation in cereal genomes. In: *Cereal Genomics*, eds P Gupta, R Varshney, pp. 331-360. Kluwer Academic Publishers.
- Stein N; Peroic D; Kumlehn J; Pellio B; Stracke S; Streng S; Ordon F; Graner A (2005). The eukaryotic translation initiation factor 4E confers multiallelic recessive bymovirus resistance in *Hordeum vulgare* (L.). *Plant J.* **42**, 912-922.
- Stein N; Prasad M; Scholz U; Thiel T; Zhang H; Wolf M; Kota R; Varshney K; Perovic D; Grosse I; Graner A (2007). A 1000-loci transcript map of the barley genome: new anchoring points for integrative grass genomics. *Theor Appl Genet* **114**, 823-839.
- Talame V; Ozturk N Z; Bohnert H J; Tuberosa R (2007). Barley transcript profiles under dehydration shock and drought stress treatments: a comparative analysis. *J Exp Botany* **58**, 229-240.
- Till B J; Zerr T; Comai L; Henikoff S (2006). A protocol for TILLING and Ecotilling in plants and animals. *Nature Protocols* **1**, 2465-2477.
- Varshney R K; Marcel T C; Ramsay L; Russell J; Röder M S; Stein N; Waugh R; Langridge P; Nix R E; Graner A (2007). A high density barley microsatellite consensus map with 775 SSR loci. *Theor Appl Genet* **114**, 1091-1103.
- Wenzl P; Carling J; Kudrna D; Jaccoud D; Huttner E; Kleinhofs A; Kilian A (2004). Diversity Arrays Technology (DART) for whole-genome profiling of barley. *PNAS* **101**, 9915-9920.
- Werner K; Friedt W; Ordon F (2005). Strategies for pyramiding resistance genes against the barley yellow mosaic virus complex (BaMMV, BaYMV, BaYMV-2). *Mol. Breeding* **16**, 45-55.
- Werner K; Friedt W; Ordon F (2007). Localisation and combination of resistance genes against soil-borne viruses of barley (BaMMV, BaYMV) using doubled haploids and molecular marker. *Euphytica* **158**, 323-329.
- Whitehouse M E A; Wilson L J; Constable G A (2007). Target and non-target effects on the invertebrate community of Vip cotton, a new insecticidal transgenic. *Australian Journal of Agricultural Research*, **58**, 273-285.
- Zhang W; Carter M; Matsay S; Stoutjesdijk P; Potter R; Jones M G K; Kleven S; Wilson R E; Larkin P J; Turner M; Gale K R (2008). Implementation of probes for tracing chromosome segments conferring barley yellow dwarf virus resistance. *Aust J Agr Res* **52**, 1389-1392.

Stahl D, Schmidt K, Nehls R, Moeser J, Varrelmann M, Scheel D: Innovative Perspektiven durch Biotechnologie – Einsatz gentechnischer Methoden zur Verbesserung der Kulturpflanzenresistenz. In: Tiedemann A v, Heitefuss R, Feldmann F (2008): Pflanzenproduktion im Wandel – Wandel im Pflanzenschutz, ISBN 978-3-941261-00-6; 103-121. © Deutsche Phytomedizinische Gesellschaft, Braunschweig, Germany

Innovative Perspektiven durch Biotechnologie – Einsatz gentechnischer Methoden zur Verbesserung der Kulturpflanzenresistenz

D Stahl, K Schmidt, R Nehls

PLANTA Angewandte Planzengenetik und Biotechnologie GmbH, Grimsehlstrasse 31, 37555 Einbeck

Email: d.stahl@kws.com

J Moeser

SAATEN-UNION GmbH, Eisenstraße 12, 30916 Isernhagen;

Email: joachim.moeser@saaten-union.de

M Varrelmann

Institut f. Zuckerrübenforschung, Abt. Phytopathologie, Holtenser Landstr. 77, 37079 Göttingen

Email: varrelmann@ifz-goettingen.de

D Scheel

Leibniz-Institut f. Pflanzenbiochemie, Abt. Stress- und Entwicklungsbiologie, Weinberg 3, 06120

Halle; Email: dscheel@ipb-halle.de

ZUSAMMENFASSUNG

Die Biotechnologie wird als Schlüsseltechnologie des 21. Jahrhunderts bezeichnet. Moderne Biotechnologie verbindet klassische Züchtungsmethoden mit den Weiterentwicklungen in der Markertechnologie und der Gentechnik. Dabei erweitert die Züchtung mit Hilfe gentechnischer Verfahren die genetische Basis für Neukombinationen mit Genen, die oft durch konventionelle Kreuzung nicht übertragbar sind. Im Gegensatz zur klassischen Züchtung, in der über Jahrtausende aus der genetischen Formenvielfalt über Auslese selektiert worden ist, können über Gentechnik als Methode der modernen Biotechnologie Änderungen schneller und effizienter herbeigeführt und züchterisch genutzt werden. Über die verschiedenen phytomedizinischen Facetten der Biotechnologie wurde kürzlich bereits ausführlich an anderer Stelle berichtet (von Tiedemann & Feldmann, 2006).

Pilzresistente transgene Nutzpflanzen sind ein Ziel, an dem seit Anfang der 90er Jahre wissenschaftlich gearbeitet wird. Die Erstellung einer breiten, möglichst dauerhaften Resistenz mittels gentechnischer Methoden ist eine hohe Herausforderung an die pflanzliche Molekularbiologie. Trotz Erfolgen in der Forschung bei der Übertragung erwünschter Resistenzeigenschaften stehen bisher noch keine gentechnologisch verbesserten, pilzresistenten Kulturpflanzen für den Anbau zur Verfügung. Technische Konzepte zur Erstellung transgener, pilzresistenter Pflanzen nutzen die Erkenntnisse der Grundlagenforschung zum Verständnis der Wirt-Pathogen Interaktionen. Unterschiedliche Ansätze beruhen u.a. auf der Überexpression von Genen, die zum Abbau der pilzlichen Zellwand oder zur Bildung fungitoxischer Phytoalexine führen. Eine breite Aktivierung der Pathogenabwehr wird über die Expression mikrobieller Avirulenzgene in Anwesenheit der korrespondierenden Resistenzgene versucht. Um die Komplexität zu reduzieren und bedingt durch die Verfügbarkeit von entsprechenden genomischen Sequenzen ist in den letzten Jahren die Nutzung natürlicher R-Gene zur Bekämpfung einzelner Krankheiten in den Vordergrund gerückt. Die Modifikation von R-Genen oder die Eliminierung eines Anfälligkeitsfaktors stellen weitere Möglichkeiten dar.

Virusresistente transgene Nutzpflanzen sind besonders deshalb erwünscht, weil eine chemische Bekämpfung von Viruskrankheiten bisher nicht möglich ist. Obwohl aus phytopathologischer Sicht eine Infektionsresistenz zu bevorzugen ist, wird in kommerziellen Zuchtprogrammen oftmals eine Ausbreitungsresistenz oder eine Ertragstoleranz gegenüber Virusinfektionen für eine Erhöhung der Widerstandsfähigkeit gegenüber Pflanzenviren genutzt. Großes Potential, eine Vielzahl von Virusproblemen in der Pflanzenproduktion dauerhaft zu lösen, bietet die RNA-vermittelte Resistenz bzw. das sogenannte RNA-silencing. Ältere Ansätze, wie die Protein-vermittelte Resistenz wurden dadurch weitgehend abgelöst. Weitere Verfahren zur gentechnischen Erzeugung von Virusresistenz, z.B. die Expression von rekombinanten Antikörpern oder die direkte Übertragung von R-Genen mittels Pflanzentransformation befinden sich noch weitgehend im Versuchsstadium. Die Nachhaltigkeit und Dauerhaftigkeit der Resistenz ist sowohl bei klassischen als auch bei biotechnologischen Verfahren ein wichtiges Zuchtziel. Mit transgenen Verfahren kann jedoch schneller auf neu auftretende Isolate reagiert werden, so dass ein flexibleres Resistenzmanagement ermöglicht wird.

Insektenresistente transgene Nutzpflanzen, vor allem Mais und Baumwolle, sind bereits seit Mitte der 90er Jahre weltweit großflächig im Anbau, in Europa allerdings noch sehr begrenzt. Als Zielorganismen der Resistenzzüchtung sind hier beim Mais vor allem der Maiszünzler (*Ostrinia nubilalis*) und der Westliche Maiswurzelbohrer (*Diabrotica virgifera*) wichtig. Im Zuge der starken Ausdehnung des Anbaus von Mais als Energiepflanze auch in Deutschland wird diesen Schädlingen und deren

Bekämpfung voraussichtlich in Zukunft große Bedeutung zukommen. In transgene Maispflanzen der ersten Generation wurden einzelne Gene von verschiedenen *Bacillus thuringiensis* (Bt) Stämmen in das Pflanzengenom eingebracht. Diese Gene kodieren für sogenannte Cry-Toxine, die, von den Insekten aufgenommen, zu Porenformation im Darm und anschließender Sepsis führen. Als transgene Pflanzen der zweiten Generation gelten solche, in die mehrere Gene in einer Gen-Kassette innerhalb eines Züchtungsschrittes eingebaut werden. Das Verfahren wird als „gene-stacking“ oder Pyramidisierung von Genen bezeichnet, wird vor allem in den USA genutzt und gilt als sehr aussichtsreich im Hinblick auf die Stabilität der Resistenz. Neuere Entwicklungen setzen auf Modifizierung der Cry-Toxine oder die RNA-Interferenztechnik (gene-silencing). Weltweit führend bei der Entwicklung transgener Pflanzen mit Resistenz gegen Insekten und bestimmte Herbizide sind in den USA die Firmen Monsanto und Dow Agrosience.

Nicht-Wirtsresistenz wird als die dauerhafteste Form der pflanzlichen Pathogenabwehr betrachtet, deren Mechanismen im Rahmen der Grundlagenforschung intensiv untersucht werden. Entsprechende Modelle postulieren die Erkennung von typischen mikrobiellen Signalen mit Hilfe von Plasmamembran-lokalisierten Rezeptoren. Dies führt zur Initiierung zeitlich und räumlich koordinierter Abwehrprogramme. Eine Übertragung von Mechanismen der Nichtwirtsresistenz auf Nutzpflanzen ist nicht nur von großem wissenschaftlichen Interesse, sondern hätte auch große praktische Bedeutung.

PILZRESISTENTE TRANSGENE NUTZPFLANZEN (D Stahl, K Schmidt, R Nehls)

Ziel einer gentechnologischen Pilzresistenz muss es sein, Pflanzen zu entwickeln, die ein hohes Maß an Resistenz aufweisen ohne dabei negative Auswirkungen auf andere Parameter der Pflanzenentwicklung zu haben. An diesem Ziel wird seit Veröffentlichung der ersten Arbeit zur Verbesserung der Pilzresistenz durch gentechnologische Methoden gearbeitet (Broglie *et al.*, 1991). Durch die hohe Komplexität des Themas, bedingt durch die Vielzahl pilzlicher Schaderreger mit z.T. sehr unterschiedlichen Lebensweisen, ist bisher noch keine gentechnologisch verbesserte, pilzresistente Kulturpflanze auf dem Markt. Trotz des hohen Forschungsbedarfs besteht jedoch ein starkes wirtschaftliches Interesse an der Einführung einer gentechnologischen Pilzresistenz, so dass neben der Grundlagenforschung an öffentlichen Instituten die angewandte Forschung bei Biotechnologie-, Pflanzenschutz- und Saatgutunternehmen einen hohen Stellenwert einnimmt.

Technische Konzepte zur Erstellung pilzresistenter Pflanzen

Die technischen Anwendungen zur Erstellung einer pilzresistenten Pflanze nutzen stets die Erkenntnisse der Grundlagenforschung zum Verständnis der Wirt-Pathogen-Interaktion. So wurde

zunächst versucht durch die Überexpression einzelner Gene der pflanzlichen Pathogenabwehr (Chitinasen, Glucanasen und anderer PR-Proteine) eine breit wirksame Resistenz zu erzielen. Es folgten zahlreiche weitere Ansätze mit einzelnen Genen und Kombinationen unterschiedlicher Gene. Eine Zusammenfassung der veröffentlichten Arbeiten zu diesem Teilgebiet ist bei Stahl *et al.* (2006) dargestellt.

Neben der Überexpression von Genen, die zu einer Degradierung der pilzlichen Zellwand führen, wurde auch versucht die Pflanze mit fungitoxischen Phytoalexinen anzureichern. Bekanntestes Beispiel ist die Produktion von Resveratrol durch die Expression von zwei Resveratrolsynthesegenen aus der Weinrebe in Tabak (Hain *et al.*, 1993). Hier konnte eine deutliche Reduktion des Befalls mit *Botrytis cinerea* beobachtet werden (Hain *et al.*, 1993). Ebenso konnte durch die Expression der Gene in Tomate, Kartoffel und Raps mit diesem Ansatz eine Reduktion des Befalls mit *Phytophthora infestans* (Thomzik *et al.*, 1997; Stahl unveröffentlicht) bzw. *Phoma lingam* und *Verticillium dahliae* festgestellt werden (Stahl unveröffentlicht). Trotz der erzielten Erfolge war das erreichte Resistenzniveau nicht ausreichend, um daraus ein marktfähiges Produkt zu entwickeln.

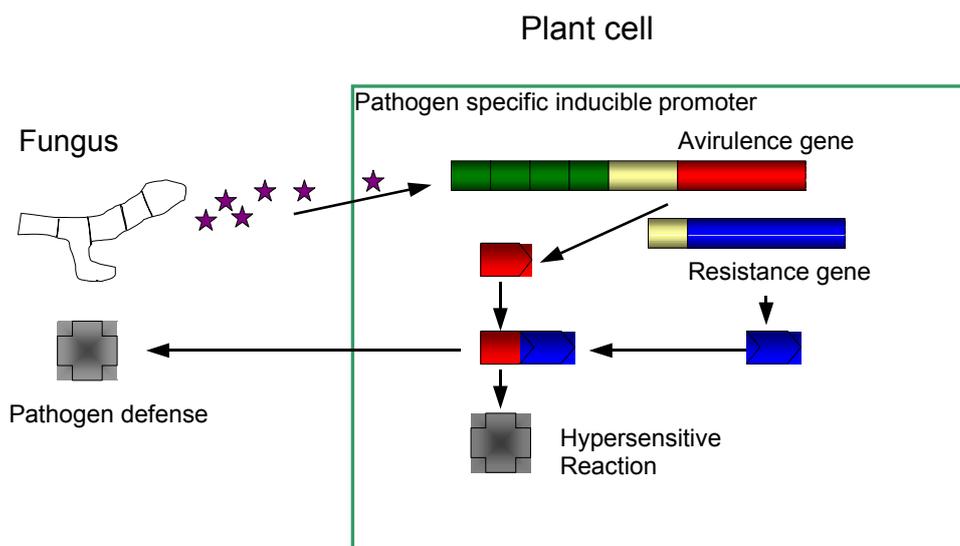


Abb. 1 Herbeiführung einer Hypersensitiven Reaktion durch Coexpression eines R- und eines Avr-Gens nach de Wit (1992)

Bedingt durch die Erkenntnis, dass eine Vielzahl von Genen an der Pathogenabwehr beteiligt sind und somit die Überexpression einzelner Gene möglicherweise nicht zu einer ausreichenden Resistenzsteigerung führt, wurde in einer zweiten Phase zur Erstellung pilzresistenter Pflanzen versucht, die pflanzliche Pathogenabwehr gezielt nach Pathogenbefall in ihrer ganzen Breite zu aktivieren. Durch Expression von mikrobiellen Avirulenzgenen in Anwesenheit des korrespondierenden Resistenzgens (R-Gens) soll die Pathogenabwehr der Pflanze breit aktiviert werden (siehe Abb. 1, de Wit, 1992). Voraussetzung für das Konzept ist jedoch, dass die

Expression des mikrobiellen Avr-Gens strikt reguliert ist, um negative Auswirkungen der Expression auf die Entwicklung der Pflanze zu vermeiden. Es ist somit notwendig, das Avr-Gen unter der Kontrolle eines Pathogen-spezifischen Promotors zu exprimieren, der lediglich am Ort der Infektion aktiv ist und somit die Auslösung der Pathogenabwehrmaßnahmen lokal begrenzt bleibt. Neben der Möglichkeit natürliche Promotoren zu identifizieren, die die gewünschte Spezifität aufweisen, stellt die Entwicklung von synthetischen Promotoren hier eine interessante Alternative dar (Rushton *et al.*, 2002). Eine detaillierte Übersicht über das Konzept und Modifikationen des Konzeptes ist ebenfalls in Stahl *et al.* 2006 dargestellt.

Nutzung natürlicher Resistenzquellen für die Erstellung transgener Pflanzen

Da die Gentechnologie grundsätzlich nur ein neues Werkzeug in der Pflanzenzüchtung darstellt, kann diese genutzt werden, um schnell neue Eigenschaften in Elitematerial einzubringen. Durch immer bessere Sequenzinformationen verschiedener Kulturpflanzen ist es heute möglich, einzelne Gene zu identifizieren und zu klonieren. Dies trifft auch für R-Gene zu, die in Wildformen für eine Resistenz gegenüber spezifischen pilzlichen Schaderregern verantwortlich sind. Durch klassische Züchtung ist die Überführung dieser R-Gene in das Elitematerial schwierig, da häufig negative Eigenschaften der Wildform mit in das Elitematerial übertragen werden (linkage drag). Diese müssen dann durch aufwändige Rückkreuzungen wieder entfernt werden. Außerdem können nur R-Gene aus kreuzbaren Arten in die Kulturformen eingeführt werden, was die Nutzung einiger Resistenzquellen ausschließt.

So konnte in *Solanum bulbocastanum* ein breit wirksames R-Gen (*Rpi-blb1*) gegenüber *Phytophthora infestans* identifiziert werden, dass nach Übertragung in Kartoffel ebenfalls zu einer breit wirksamen, rassenunabhängigen Resistenz gegenüber *P. infestans* führte (Song *et al.*, 2003; van der Vossen *et al.*, 2003). Durch klassische Kreuzungen konnte die Resistenz zwar ebenfalls in Kartoffeln eingekreuzt werden, die agronomischen Eigenschaften der neuen Linien waren jedoch nicht akzeptabel, so dass auch 40 Jahre nach Durchführung der Kreuzungen noch keine Sorten auf dem Markt vorhanden sind (van der Vossen *et al.*, 2003). Ermutigt durch den Erfolg, werden mittlerweile zahlreiche wilde Verwandte der Kartoffel auf mögliche Resistenzgene durchsucht, mit dem Ziel, eine breit wirksame Resistenz gegenüber *P. infestans* zu erzielen (Fry, 2008). Nach den anfänglichen, sehr positiven Ergebnissen konnten mittlerweile jedoch Rassen von *P. infestans* identifiziert werden, die die *Rpi-blb1* bedingte Resistenz durchbrochen haben (Fry, 2008), so dass es unwahrscheinlich erscheint, tatsächlich ein R-Gen zu identifizieren, welches eine dauerhafte, breite Resistenz gegenüber *P. infestans* verursacht. Dazu müsste das R-Gen einen Faktor von *P. infestans* erkennen, der durch das Pathogen nicht modifiziert werden kann, da dies zu einem Verlust der Virulenz oder Vitalität führen würde. Da Pathogene über ein großes Repertoire an Effektoren verfügen, die den pflanzlichen Stoffwechsel und auch die Pathogenabwehr zu Gunsten des Pathogens beeinflussen können, erscheint dies jedoch nicht sehr wahrscheinlich. Ein Ausweg könnte die Pyramidisierung von unterschiedlichen R-Genen in einer Linie sein. Das Pathogen müsste dann mehrere Effektormoleküle modifizieren, so dass die Wahrscheinlichkeit der

Resistenzbrechung zumindest minimiert wäre. Eine Übersicht über die Pyramidisierung von R-Genen ist in Abb. 2 dargestellt.

In diesem Zusammenhang kann ein etwas modifizierter, gentechnologischer Ansatz gesehen werden, der unter der Bezeichnung „Cisgenesis“ beschrieben ist (Schouten *et al.*, 2006). Im Vergleich zu transgenen Ansätzen, bei denen auch Gensequenzen aus anderen Arten in das Genom von Pflanzen eingefügt werden, sowie artifizielle Sequenzen (z.B. ein viraler Promotor mit einer pflanzlichen cDNA), sollen beim cisgenen Ansatz lediglich Sequenzen eingefügt werden, die prinzipiell auch über klassische Kreuzung eingefügt werden können.

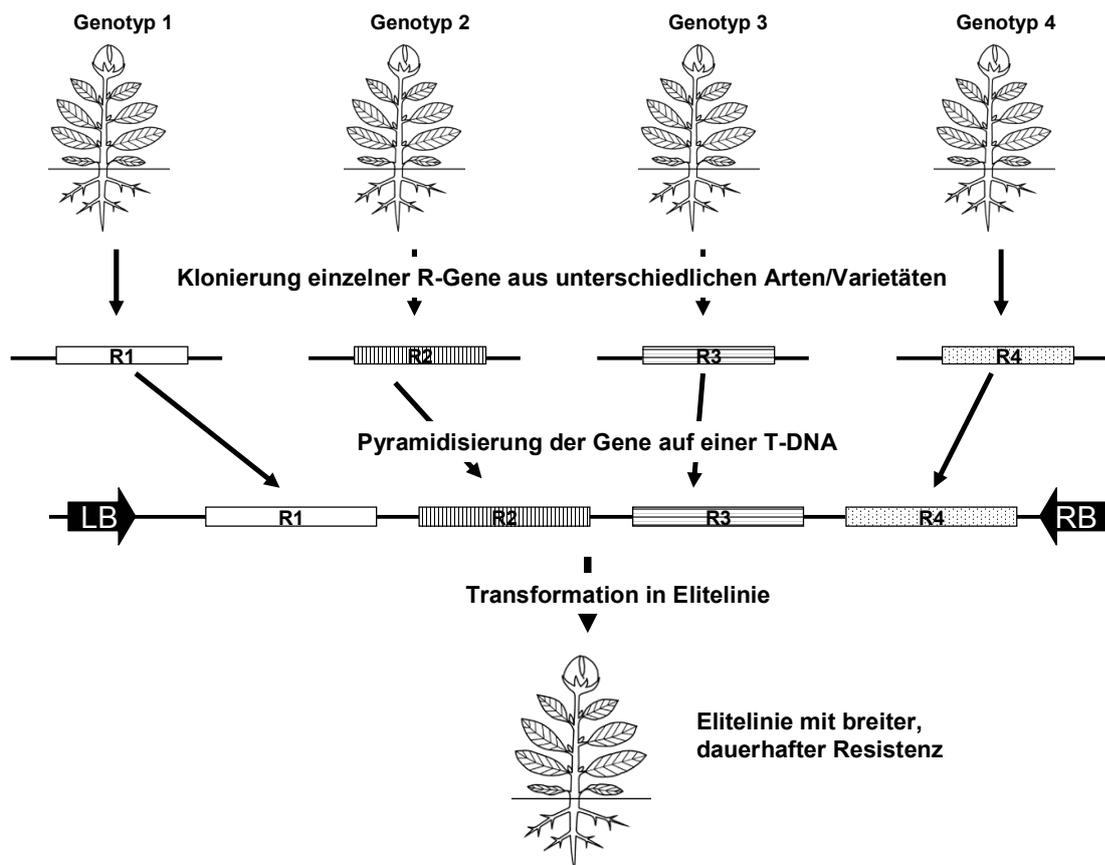


Abb 2 Pyramidisierung von R-Genen aus unterschiedlichen Pflanzenarten und – varietäten in einer Elitelinie mittels gentechnologischer Methoden.
LB: left border Sequenz der T-DNA; RB: right border Sequenz der T-DNA

Der Vorteil des Systems gegenüber der klassischen Züchtung besteht in der Bereinigung der Sequenzen, so dass kein „linkage drag“ mit übertragen wird und somit eine aufwändige Rückkreuzung zur Entfernung der negativen Eigenschaften entfällt. Da bei dem cisgenen Ansatz keine artfremde DNA in das Pflanzengenom eingefügt wird, hoffen die Erfinder auf weniger aufwändige Anforderungen an die Deregulierung. Der Zeitaufwand für die Deregulierung würde sich dann deutlich reduzieren, so dass bei einem Zusammenbruch einer Resistenzquelle relativ zügig eine neue Resistenzquelle genutzt werden könnte. Voraussetzung ist allerdings, dass eine

entsprechend hohe Anzahl an Resistenzgenen kloniert vorliegt. Außerdem ist eine effiziente Transformationsmethode der Kulturart mittels *Agrobacterium* notwendig, da per Definition eine markergenfreie Transformation erfolgen muss. Somit kann der Ansatz zurzeit nur in Kartoffel durchgeführt werden, da hier eine ausreichend hohe Transformationseffizienz vorliegt. Andere wichtige Kulturpflanzen, wie z.B. Weizen können hingegen noch nicht in ausreichend hoher Effizienz transformiert werden.

Modifikation von R-Genen

Die Struktur zahlreicher pflanzlicher R-Gene ist stark konserviert. Obwohl die Gene für eine Resistenz gegenüber sehr unterschiedlichen Pathogenen verantwortlich sind, codieren die meisten bisher klonierten R-Gene für Proteine der NBS-LRR Klasse. Obwohl noch nicht klar ist, wie die Funktionsweise der Proteine ist, wird vermutet, dass die variable Region der LRR-Domäne an der Erkennung von Effektormolekülen beteiligt ist. Die Erkennung des Effektors muß dabei nicht direkt erfolgen, sondern kann nach der „guard Hypothese“ auch indirekt erfolgen (Innes, 2004). Farnham and Baulcombe (2006) mutagenisierten die LRR-Domäne des Rx-Proteins der Kartoffel. Das Rx-Protein erkennt eine bestimmte Variante des Hüllproteins des *potato virus X* (PVX) und führt zu einer Resistenz gegenüber Viren, die dieses Hüllprotein besitzen. Es konnte nun mittels molekularbiologischer Methoden eine Mutante erstellt werden, die neben der bisher erkannten Variante des Hüllproteins noch eine weitere Variante erkennen kann und außerdem noch das Hüllprotein eines entfernt verwandten Virus. Somit konnte die Spezifität des Rx-Proteins erweitert werden. Ob der Ansatz auch für komplexere Organismen wie pilzliche Pathogene geeignet ist, muss in Zukunft noch gezeigt werden.

Eliminierung eines Anfälligkeitsfaktors

Seit langem ist bekannt, dass die homozygote Mutation des mlo-Locus in der Gerste zu einer rassenunspezifischen Resistenz gegenüber *Blumeria graminis* f.sp. *hordei* führt. Da eine derartige Resistenz nicht in anderen Pflanzen gefunden wurde, wurde vermutet, dass es sich um eine Spezifität der Gerste handelt, obwohl mlo-homologe Gene auch in anderen Pflanzen identifiziert wurden (Panstruga, 2005). Das MLO Protein ist ein membrangebundenes Protein, und es wird vermutet, dass der Mehltaupilz das Protein für eine erfolgreiche Infektion benötigt (Panstruga, 2005; Eichmann & Hükelhoven, 2008). Interessanterweise konnte erst kürzlich nachgewiesen werden, dass auch in *Arabidopsis thaliana* die Mutation des AtMlo2 Gens, eines von 15 mlo-homologen Genen im Arabidopsis-Genom, zu einer Resistenz gegenüber allen bekannten Mehltaupilzen führt, die *A. thaliana* infizieren können (Consonni *et al.*, 2006). Motiviert durch diese positiven Ergebnisse in *Arabidopsis* wird nun auch versucht in anderen, dikotylen Pflanzen ähnliche Mutationen zu identifizieren. Es ist bekannt, dass in Erbse und Tomate rezessive Mehltauresistenzen vorliegen, die der mlo-basierenden Resistenz in Gerste ähneln (Humphry *et al.*, 2006). In Tomate konnte nachgewiesen werden, dass eine bekannte Resistenz gegenüber dem Mehltaupilz *Oidium neolycopersici* durch eine rezessive Mutation in einem mlo-homologen Locus verursacht wird (Bai *et al.*, 2008).

Da somit der mlo-Locus generell an der Anfälligkeit gegenüber Mehltaupilzen involviert ist, kann nun auch in anderen Kulturpflanzen nach rezessiven Mutationen des Locus gesucht werden. Während in diploiden Pflanzen die Einführung der homozygoten rezessiven Mutation mittels klassischer Züchtung relativ einfach durchzuführen ist, gestaltet sich dies in polyploiden und autopolyploiden Pflanzen schwieriger. Hier könnte mittels gentechnologischer Methoden („gene silencing“) das verantwortliche Gen ausgeschaltet werden.

VIRUSRESISTENTE TRANSGENE NUTZPFLANZEN (M Varrelmann)

Pflanzenviren treten an landwirtschaftlichen Nutzpflanzen in großer Zahl und mit hoher genetischer Variabilität auf und verursachen bedeutenden wirtschaftlichen Schaden, welcher weltweit auf Rang zwei nach dem durch pilzliche Schaderreger verursachten Ertrags- und Qualitätsreduktionen liegt. Da eine chemische Bekämpfung in Form von Viruziden nicht zur Verfügung steht, müssen sich Bekämpfungsmaßnahmen auf Verhinderung der Infektion, Vektorbekämpfung, Verwendung von virusfreiem Vermehrungsmaterial sowie die Beseitigung von ungenutzten Zwischenwirten beschränken (Haddidi *et al.*, 1998). Daher besitzt die pflanzliche Virusresistenz als Kontrollmöglichkeit mit höchster Nachhaltigkeit allergrößte Bedeutung. Um jedoch natürlich vorkommende Virusresistenz z.B. aus Wildformen der Kulturpflanzen zu selektieren und für den kommerziellen Anbau in marktfähigen Sorten nutzbar zu machen, muss ein hoher zeitlicher und finanzieller Aufwand in Form von Zuchtprogrammen betrieben werden. Obwohl aus phytopathologischer Sicht eine Infektionsresistenz zu bevorzugen ist, wird in kommerziellen Zuchtprogrammen oftmals auch eine Ausbreitungsresistenz oder auch die Eigenschaft der Ertragstoleranz gegenüber Virusinfektionen für eine Erhöhung der Widerstandsfähigkeit gegenüber Pflanzenviren genutzt. Bei einer Betrachtung und Beurteilung der Nachhaltigkeit von natürlich vorkommender Resistenz gilt, dass die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten von Resistenz-überwindenden Virusisolaten einerseits von der biologischen Fitness des mutierten Pathogens bei Abwesenheit der Resistenz abhängt und darüber hinaus von der Art der Resistenz und Anzahl der Resistenzgene determiniert wird (Roossinck, 1997).

RNA-vermittelte Resistenz und „RNA-silencing“

Durch die beginnende Entwicklung pflanzlicher Biotechnologie und molekularer Pflanzenvirologie vor mehr als 20 Jahren besteht seither eine weitere Möglichkeit Virusresistenz in transgenen Pflanzen zu erzeugen. Alle Pflanzen besitzen das adaptive Virusresistenzsystem, genannt „RNA silencing“, welches u.a. gegen invasive Nukleinsäuren gerichtet ist und durch doppelsträngige RNA, wie sie bei der Virusreplikation auftritt, ausgelöst wird und eine sequenzspezifische Degradation des viralen Genoms und damit Virusresistenz erzeugt (Baulcombe, 2004). Werden virale Nukleinsäuren in transgenen Pflanzen exprimiert, kann „RNA silencing“ gegen das virale Genom bereits vor einer Virusinfektion angeschaltet werden, und eine RNA vermittelte Infektionsresistenz erzeugen. Das Verfahren bietet großes Potential, eine Vielzahl von Virusproblemen in der Pflanzenproduktion dauerhaft zu lösen, da es, wie

exemplarisch gezeigt werden konnte, bis zu einer Sequenzabweichung von 10% auch gegen divergente Virusisolate wirksam ist (Prins, 2003). Darüber hinaus ist dies biotechnologische Verfahren als sehr nachhaltig einzustufen, weil z.B. Pflanzenschutzmittel zur Vektorbekämpfung eingespart werden können. Das Verfahren der RNA-vermittelten Resistenz hat andere transgene Verfahren wie Protein-vermittelte Resistenz, bei denen virale Proteine, in transgenen Pflanzen exprimiert, mit der viralen Vermehrung interferieren, abgelöst und ist in den letzten Jahren noch weiter optimiert worden. Mittlerweile werden sehr kurze (ca. 400 bps), nichttranslatierbare Sequenzen viraler Herkunft erfolgreich zur Resistenzzeugung benutzt, die aneinandergereiht, auch zur Erzeugung von Multivirusresistenz eingesetzt werden können (Jan *et al.*, 2000). Darüber hinaus erzeugen selbstkomplementäre dsRNA generierende Konstrukte viralen Ursprungs mit hoher Effizienz den Phänotyp der Infektionsresistenz (Smith *et al.*, 2000). Mittels Erzeugung von Mehrfachresistenzen in transgenen Pflanzen könnte auch das bisher am häufigsten diskutierte und experimentell belegte Risiko der Unterdrückung des „RNA-silencing“ (Moissiard & Voinnet, 2004) (und damit der Resistenz) durch superinfizierende Viren, gegen die keine Resistenz besteht, aufgelöst werden (Mitter *et al.*, 2003). Kaum untersucht in seinem Einfluss auf die Nachhaltigkeit der Resistenz ist jedoch das mögliche Risiko der Rekombination von Pflanzenviren mit den transgenen viralen Sequenzen, verbunden mit der möglichen Entstehung von Viren mit veränderten Eigenschaften (Tepfer, 2002). Eine neue Variante der RNA-vermittelten Resistenz stellt die Verwendung von künstlich modifizierten, mit viralen Sequenzen einer Länge von nur 20-25 Nukleotiden ausgestatteten, pflanzeneigenen Mikro-RNAs (miRNA) dar (Niu *et al.*, 2006). miRNAs spielen bei der negativen Genregulation insbesondere bei der Steuerung von pflanzlichen Entwicklungsprozessen eine Rolle. Mit diesem Verfahren könnte das mögliche Risiko der RNA-Rekombination reduziert werden.

Trotz der hohen Effizienz der Resistenzzeugung des Verfahrens und der möglichen nahezu universellen Anwendbarkeit in allen transformierbaren Kulturpflanzenspezies, ist eine breite praktische Anwendung bisher nicht erfolgt. In der Mitte der 1990er Jahre wurden nach Bekanntwerden der Technik eine Vielzahl von Freisetzungsversuchen mit transgenen virusresistenten Pflanzen unterschiedlichster Spezies vor allem in den USA durchgeführt. Bis heute sind jedoch nur wenige Pflanzenspezies mit transgener Virusresistenz, in der Mehrzahl basierend auf Hüllprotein-vermittelter Resistenz, für ein Inverkehrbringen zugelassen. Insgesamt sind bis heute jedoch nahezu sämtliche landwirtschaftliche Nutzpflanzen, ausgestattet mit transgener Virusresistenz gegen Viren mit ökonomischer Relevanz in Freilandversuchen geprüft worden (<http://www.nbiap.vt.edu/>, Zugriff Juli 2008). Die Gründe für die bisher fehlende breite kommerzielle Nutzung der Technik sind vielschichtig. Bisher besteht in Europa generell noch eine fehlende gesellschaftliche Akzeptanz von transgenen Pflanzen und aus daraus erzeugten Nahrungs- und Futtermitteln. Es besteht weiterhin aber auch die Notwendigkeit, mögliche biologische Risiken, die z.B. von viraler Rekombination ausgehen, welche eventuell die Nachhaltigkeit der Resistenz beeinträchtigen könnte, freisetzungsbegleitend detailliert zu untersuchen (Tepfer, 2002).

Weitere Verfahren zur Erzeugung von Virusresistenz in transgenen Pflanzen

Zusätzlich zur Virusresistenz in transgenen Pflanzen, erzeugt durch den Mechanismus der RNA-vermittelten Resistenz, sind weitere Techniken und Verfahren zu nennen, deren Funktionalität mindestens exemplarisch auf experimenteller Ebene gezeigt werden konnte. Dazu gehört die Expression von rekombinanten Antikörpern, die ein virales Protein physikalisch binden und so mit dem Vermehrungszyklus des Virus interferieren (Tavladoraki *et al.*, 1993). Dies Verfahren funktioniert jedoch nicht derart universell wie das auf „RNA-silencing“ basierende, da nicht vorhersehbar ist, ob ein Antikörper mit Prozessen des viralen Lebenszyklus interferiert und daher in den meisten Fällen mehrere unterschiedliche Antikörper auf ihre Resistenz vermittelnden Eigenschaften selektiert werden müssen. Eine weitere Möglichkeit besteht im Transfer von monogenen Virusresistenzgenen. In verschiedenen Pflanzenspezies konnten R-Gene identifiziert werden, die Resistenzen basierend auf Verteidigungsantworten wie Extreme und Hypersensitive Resistenz vermitteln und die eine systemische Besiedlung des Wirtes verhindern (Soosaar *et al.*, 2005). Diese Gene können nicht nur auf konventionellem züchterischem Weg in Hochleistungssorten von Kulturpflanzen eingekreuzt werden, sondern auch isoliert und mit gentechnischen Methoden auch artübergreifend in heterologe Spezies unter Beibehaltung der Funktionalität transferiert werden. Die direkte Übertragung von R-Genen mittels Pflanzentransformation stellt eine hochinteressante Alternative zur klassischen Züchtung dar, da u.a. Züchtungszeiträume verkürzt werden können. Die artübergreifende Funktionalität ist jedoch nicht vorhersehbar, da für eine erfolgreiche Induktion einer Resistenzreaktion eine Signaltransduktion bestehend aus „messenger“ Substanzen und Effektoren erforderlich sind. Das Vorhandensein dieser Signaltransduktionsketten und ihre Funktionalität in anderen Spezies sind bisher nicht vorhersehbar, auch wenn bereits exemplarisch die Funktionalität eines Antivirus R-Gens innerhalb einer Pflanzenfamilie gezeigt werden konnte (Whitham *et al.*, 1996). Als weitere mögliche Verfahren zur Erzeugung von Virusresistenz in transgenen Pflanzen sind die Expression von Ribosom-inaktivierenden Proteinen und von dsRNA spezifischen Nukleasen zu nennen.

Gentechnisch erzeugte Resistenz, wobei die RNA-vermittelte Resistenz sicherlich bisher das effizienteste und sicherste Verfahren darstellt, besitzt Vor- und Nachteile gegenüber der Erzeugung von mono- und polygener Virusresistenz mittels konventioneller Züchtungsverfahren. Die transgene Virusresistenz kann direkt in (Hochleistungs-) Zuchtlinien erzeugt werden. Ist die natürlich vorkommende Resistenz polygen und sind nicht alle Einzelfaktoren bekannt, so muss selbst bei Vorhandensein von genetischen Markern oder einem einfachen Biotest für die Resistenz ein sehr hoher Selektionsaufwand betrieben werden, um nicht Einzelfaktoren zu verlieren und damit die polygene Resistenz zu schwächen. Obwohl die transgene Virusresistenz auf nur einen Locus reduziert werden kann, ist jedoch bei jeder weiteren Nachkommenschaft nach klassischer Kreuzung ein erneuter Biotest bezüglich der Wirksamkeit erforderlich, da in keiner Klasse der transgenen Virusresistenz die Funktionalität der weiteren für die Resistenz jedoch essentiellen pflanzlichen Resistenzkomponenten vorausgesetzt werden kann.

Dauerhaftigkeit von Resistenz in transgenen Pflanzen

Bezüglich der Nachhaltigkeit und Dauerhaftigkeit von Virusresistenz gilt gleichermaßen für klassische wie biotechnologische Verfahren, dass durch den Anbau von Pflanzen mit der jeweiligen Resistenz ein Selektionsdruck auf die variable und hoch anpassungsfähige Viruspopulation ausgeübt wird. Bei RNA-vermittelter Resistenz wird eine fehlende Wirksamkeit bei etwa 10% Sequenzdivergenz angenommen; bei konventioneller monogen bedingter Resistenz reicht bei Resistenz überwindenden Isolaten teilweise schon eine Punktmutation aus, um die Resistenz unwirksam zu machen. Über die Wahrscheinlichkeit der Selektion von Resistenzüberwindenden Isolaten und ihrem Fitnessverlust durch die Mutation liegen weder bei konventionellen noch bei transgen vermittelten Resistenzen umfassende Daten vor, so dass hier keine Aussagen getroffen werden können. Sicher ist jedoch, dass mit transgenen Verfahren schneller auf neu auftretende Isolate reagiert werden kann als mit konventioneller Züchtung, so dass hier ein flexibleres Resistenzmanagement ermöglicht wird.

Gesamtbewertung

Insgesamt kann ausgesagt werden, dass alle hier vorgestellten Verfahren eine Bereicherung und Komplementation der klassischen Virusresistenzzüchtung darstellen. Vergleicht man die Erzeugung von RNA-vermittelter Resistenz mit der Übertragung von R-Genen, so ist erstere als bisher noch weitaus einfacher und sicherer einzustufen wobei die Übertragung von R-Genen wahrscheinlich nach aktuellem Stand der Forschung geringere biologische Risiken birgt. Generell wurde jedoch bei der Erzeugung von transgenen virusresistenten Pflanzen bisher keine Resistenzüberwindung beobachtet, noch konnte die Entstehung von veränderten Viren nachgewiesen werden.

INSEKTENRESISTENTE TRANSGENE NUTZPFLANZEN (J Moeser)

Insektenresistente transgene Nutzpflanzen sind seit Mitte der 1990er Jahre im Anbau. Zumeist beschränkt sich dieser auf Mais und Baumwolle, wenige Kartoffeln und ein Fall transformierter Tomaten (www.agbios.com/dbase, Stand Juni 2008). Da letztere in Europa keine Rolle spielen, werden in den folgenden Betrachtungen hauptsächlich die Entwicklungen bei insektenresistentem Mais vorgestellt. Dort sind als Zielorganismen vor allem Lepidopteren und Coleopteren wichtig. Die Hauptmaisschädlinge sind der Maiszünsler (*Ostrinia nubilalis* Hübner) und der Westliche Maiswurzelbohrer (*Diabrotica virgifera virgifera* LeConte). Dies gilt sowohl für den „Corn Belt“ der USA, als auch für viele Teile Europas, in denen sich der Maiswurzelbohrer schon etabliert hat. Gegen den Maiszünsler und andere schädliche Lepidopteren wurden verschiedenen Cry-Toxine in Pflanzen eingebracht: Cry 1Ab, Cry 1Ac, mCry1A.105, Cry 1F, Cry 1Fa2, Cry2Ab, Cry 9C. Gegen den Maiswurzelbohrer stehen ebenfalls verschiedene Toxine zur Verfügung, die erfolgreich in Pflanzen eingebracht wurden: Cry3Bb1, das binäre Toxin Cry34Ab1 + Cry35Ab1 und ein modifiziertes mCry3A.

Transgene Pflanzen 1. Generation

Zu Beginn der transgenen Pflanzenzucht waren hauptsächlich Bt-Transformationen zu finden, bei denen einzelne Gene von verschiedenen *Bacillus thuringiensis* (Bt) Stämmen isoliert, kloniert und entweder durch den Beschuss mit einer Partikel-Kanone oder durch *Agrobacterium tumefaciens* Transformation in das Pflanzengenom eingebracht wurden. Diese Gene kodieren für sogenannte Cry-Toxine, die eine kristalline Struktur (cry) aufweisen. Werden diese Protoxine von Insekten aufgenommen, werden sie durch Darm-Proteasen aktiviert und lagern sich an die Darmwand an (für Details s. Moeser, 2006). Diese Anlagerung führt zu einer Porenformation im Darm. Es wurde allgemein angenommen, dass die Tiere dann verhungerten oder bakterielle Toxine für den Tod verantwortlich sind. Versuche mit Zugabe von Antibiotika haben gezeigt, dass die Poren allein noch nicht tödlich für das Insekt sind, sondern vor allem die anschließende Sepsis für das Sterben des Zielorganismus verantwortlich ist (Broderick *et al.*, 2006). Diese wird ausgelöst durch Darmbakterien, die durch die Poren in das Lumen und die Haemolymphe des Insekts eindringen. Im Falle einer Antibiotika-Behandlung überlebten die entsprechenden Larven die Porenbildung, da die Sepsis auslösenden Darmbakterien durch die Behandlung ausgeschaltet wurden.

Während in Europa zurzeit nur transgene Nutzpflanzen der 1. Generation zugelassen sind, so haben vor allem die Bauern in den USA bereits den Schritt zur nächsten Generation im Feld vollzogen. Während vor wenigen Jahren noch „gene stacking“ („Pyramidisierung“ von Genen) als Herausforderung des 21. Jahrhunderts bezeichnet wurde (Halpin, 2005), sind 2008 bereits 21 „gestackte“ und nur 14 Einzelgen-Transformationen mit Insektenresistenz auf dem Markt, bzw. kurz vor der Markteinführung (www.agbios.com/dbase, Stand Juni 2008).

Transgene Pflanzen der 2. Generation

Nutzpflanzen, die mit mehr als einem Gen transformiert wurden, galten lange Zeit als wenig ertragreich und wurden deshalb als nicht konkurrenzfähig angesehen. Dies lag vor allem daran, dass das „stacking“ durch die konventionelle Kreuzung zweier Eltern erfolgte, von denen jeder je ein transformiertes Gen enthielt. In der F1 konnten dann die Individuen selektiert werden, die beide Gene der Eltern erhalten hatten. Häufig waren diese Hybriden vergleichbaren, nicht transformierten Hybriden im Ertrag unterlegen. Dieser wenig effiziente Prozess wurde jedoch bald durch andere Techniken ersetzt.

Neue Züchtungsmethoden, wie z.B. bei Yieldgard VT (VT = vector technology) ermöglichen den Einbau mehrerer Gene in einer Gen-Kassette innerhalb eines Züchtungsschritts. Dies führt zu Hohertragsorten mit stabiler Resistenz. Meist sind diese nur an einen Promotor gekoppelt, was zu einer gleichmäßigeren Expression innerhalb der Pflanze führt. Es gibt allerdings Toxine, die nur in oberirdischen Pflanzenteilen (z.B. Cry 1Ab gegen Lepidopteren) und andere, die eigentlich nur in der Wurzel exprimiert werden müssten (z.B. Cry 3Bb gegen den Maiswurzelbohrer). Daraus werden sich sicherlich neue Fragen für die Sicherheitsforschung entwickeln. In der Realität ist Mais mit einem „3-fach stack“ inzwischen im Mittleren Westen der USA die Regel und nicht mehr die Ausnahme.

Modifizierte Cry-Toxine

Als weitere Entwicklung sind modifizierte Cry-Toxine zu nennen. Diese „Chimären-Proteine“ sind häufig das Ergebnis eines Domänentausches, bei denen die Domänen der Cry-Toxine aus verschiedenen Cry-Genen zusammengebaut werden. Dies soll vor allem die Effizienz des exprimierten Toxins erhöhen. Ein weiterer wichtiger Vorteil dieser modifizierten Toxine ist die veränderte Bindungsfähigkeit an die Rezeptoren in den Epithelzellen der Darmwand. So könnten z.B. sich entwickelnde Resistenzen der Insekten gegen die herkömmlichen, nicht modifizierten Cry-Toxine gebrochen werden.

Ebenfalls als Antwort auf eine mögliche Resistenzbildung bei den Insekten gegen transgenen Mais mit nur einem insektiziden Merkmal („trait“) und eine mögliche Resistenzbildung der Ackerunkräuter gegen Glyphosat oder Phosphinothricin sind neue Kooperationen zwischen den Unternehmen zu bewerten. So wurde z.B. ein transgener Mais in den USA angekündigt, der „traits“ von Monsanto und Dow Agrosience enthält (Monsanto & Dow Agrosience, 2007). Es wurden hier unter dem Namen „SmartStax™“ acht „traits“ zusammengebracht, was zurzeit wohl der Rekord im „stacking“ sein dürfte: es sollen dabei je drei Toxine gegen den Maiszünsler, je zwei gegen den Maiswurzelbohrer und sowie drei Herbizid-Toleranz-Gene exprimiert werden. In der jeweiligen Firmenterminologie sind das: Herculex® I (Cry 1F), Herculex RW (Cry34Ab1 + Cry35Ab1), Yieldgard VT Rootworm/RR2™ (Cry3Bb1 und Glyphosat-Toleranz-Gen der zweiten Generation „RoundupReady2“), Yieldgard VT Pro™ (mCry 1A.105 und Cry 2Ab), RoundupReady® und LibertyLink®, beides Herbizid-Toleranz-traits der ersten Generation. Ergebnisse zur Effizienz dieser „traits“ und von agronomischen Parametern werden für 2010 erwartet.

Ob es im Zusammenhang mit diesen vielfach „gestackten“ Pflanzen zu Auswirkung auf das Insekten-Resistenzmanagement kommt, ist noch unklar. Es ist wahrscheinlich, dass die Refugialkonzepte überarbeitet werden. Klar ist aber, dass z.B. bei einigen Feldpopulationen von *Helicoverpa zea* eine deutliche Zunahme in der Allelfrequenz für Resistenz-Gene nachgewiesen wurde, was einerseits die Wichtigkeit von Refugialflächen unterstreicht, andererseits aber auch die Schwäche aufzeigt, nur von einem einzigen „trait“ abzuhängen, der zu großen Selektionsdruck auf die Schädlingspopulationen ausübt (Tabashnik *et al.*, 2008)

RNAi-Technik (RNA-Interferenz)

Neue Entwicklungen bei der RNA-Interferenztechnik haben für großes Aufsehen gesorgt und eine realistische Alternative zu Bt-Genen aufgezeigt (Gordon & Waterhouse, 2007). Die RNA-Interferenztechnik ist seit langem etabliert als Werkzeug der Genomanalyse bei Pflanzen. Dieser natürlich vorkommende Prozess (auch „gene-silencing“ genannt) hemmt die Expression bestimmter Gene durch Anlagerung von verschiedenen RNA Fragmenten auf Chromatin-Ebene, post-transkriptionell oder translationell. Dieser RISC-Komplex (RNA-induced silencing complex) beruht auf doppelsträngiger RNA (dsRNA), die durch sogenannte „Dicer“ in kleine RNA Einheiten –ca. 21-23 Nukleotide- geteilt wird. Diese werden durch die Endonuklease Argonaute2

in einzelsträngige „small interfering RNA“ (siRNA) oder micro-RNA (miRNA) Fragmente gespalten. Diese zielerkennende RNA lagern sich dann z.B. an die messenger RNA (mRNA) des Zielorganismus an, welche nach der Anlagerung wiederum von der Endonuklease Argonaute2 in einzelne Abschnitte geschnitten wird. Dadurch wird eine Expression des codierten Enzyms verhindert. Dies spielt bei der Genregulierung oder der Viren-Abwehr bei Pflanzen eine entscheidende Rolle.

Es ist bei *Tribolium castaneum* schon vor längerem gelungen durch Injektion von dsRNA die entsprechenden mRNA Abschnitte zu blockieren (Ober & Jockusch, 2006). Auch bei *Acyrtosiphon pisum* konnten durch Injektion die Markergene blockiert werden (Jaubert-Possamai *et al.*, 2007). Bei Nematoden war es seit längerem bekannt, das auch eine orale Aufnahme zum gewünschten Effekt verhalf (Timmon & Fire, 1998). Vor kurzem konnte auch bei Insekten durch die orale Aufnahme von dsRNA ein deutlicher Effekt erzielt werden (Mao *et al.*, 2007; Baum *et al.*, 2007). Bei *Helicoverpa armigera* konnte das Cytochrom P450 Monooxygenase-Gen durch die Aufnahme von transgenem Pflanzenmaterial blockiert werden. Das entsprechende Protein (*CYP6AE14*) erlaubt es *H. armigera* die hohen Gossypol Level der Baumwollpflanzen schadlos zu überleben. Durch das Ausschalten dieses Gens konnte das Gossypol seine Wirkung voll entfalten (Mao *et al.*, 2007). Bei vielen Pflanzen steht ein ganzes Arsenal an Allelochemikalien zur Insektenabwehr zur Verfügung, genauso wie die Insekten ein entsprechendes Arsenal an detoxifizierenden Substanzen bereit halten (P450, Glutathione-S-Transferase, Carboxylesterasen). Daher sind hier noch viele Möglichkeiten offen, die Schädlinge wieder anfällig für natürliche Verteidigungsmechanismen der Pflanzen zu machen. Auch beim Maiswurzelbohrer wurde die RNAi-Technik bereits erfolgreich eingesetzt (Baum *et al.*, 2007). Hier wurde auf Gene gesetzt, die bei essentiellen Funktionen des Stoffwechsels eine Rolle spielen. Sowohl die mRNA für vakuoläre ATPase (V-ATPase), als auch für α -tubulin konnten so blockiert werden. Dies war sowohl mit künstlicher Diät, als auch mit transgenen Pflanzen möglich, die die entsprechende dsRNA exprimierten. Eine anschließende Wurzelbonitur zeigte deutlich geringeren Schaden bei den transformierten Pflanzen im Vergleich zu den Kontrollen. Die Schäden hatten ein ähnliches Niveau wie der Bt-event MON 863. Dies zeigt deutlich, welches Potential dieser Technik im Maisanbau in Zukunft zukommen wird. Es wurden auch Untersuchungen zur Spezifität der RNAi-Technik durchgeführt und die Effizienz der V-ATPasen von WCR bei *Leptinotarsa decemlineata* gemessen. Bei einer Übereinstimmung der Zielsequenzen von 83% (V-ATPase A) bzw. 79% (V-ATPase E) mussten mehr als die zehnfache Aufwandmenge bei *L. decemlineata* eingesetzt werden, um den LC₅₀ Wert zu erreichen. Zum Teil ist die RNAi-Antwort nur lokal in den jeweiligen Geweben nachzuweisen, wie z.B. bei der V-ATPase im Darm von WCR. Es werden zurzeit aber Anstrengungen unternommen, Gene für systemische RNAi-Antworten bei *Tribolium* durch einen Screening des gesamten Genoms zu finden (Tomoyasu *et al.*, 2008). Sollten die Sequenzen dann bekannt sein, könnten diese bei anderen Schädlingen gezielt gesucht werden.

NICHT-WIRTSRESISTENZ (D Scheel)

Die meisten Pathogene besitzen ein begrenztes Wirtsspektrum. Es gibt also Pflanzenspezies, die gegen alle Rassen einer Pathogenspezies resistent sind. Da es Pathogenen nur relative selten gelingt, ihr Wirtsspektrum zu erweitern, wird die Nicht-Wirts-Resistenz als stabilste und dauerhafteste Form der pflanzlichen Pathogenabwehr betrachtet. Auf der Basis des derzeitigen Kenntnisstandes haben Jones & Dangl (2006) kürzlich ein Modell des evolutionären Zusammenhangs zwischen Nicht-Wirts-, Basal- und Wirts-Resistenz entwickelt. Danach erkennen Pflanzen im Rahmen der Nicht-Wirts-Resistenz potentielle Pathogene mit Hilfe von Plasmamembran-lokalisierten Rezeptoren für typische generelle mikrobielle Signale, sogenannte „pathogen-associated molecular patterns“, PAMPs (Zipfel, 2008). Die Erkennung führt zur Aktivierung Rezeptor-spezifischer Signaltransduktions-Netzwerke, die komplexe, zeitlich und räumlich koordinierte Abwehrprogramme initiieren, die sogenannte „PAMP-triggered immunity“, PTI (Jones & Dangl, 2006). Erfolgreiche Pathogene unterdrücken mit Hilfe von Effektoren, die sie in der Regel in die Zellen der Wirtspflanzen einschleusen, die Initiierung der Abwehrreaktionen, worauf sie die Pflanze besiedeln und Krankheit auslösen können („effector-triggered susceptibility“, ETS). Es verbleibt der Wirtspflanze ein jeweils unterschiedlicher Grad an Basalresistenz. Die spezifische, Rezeptor-vermittelte Erkennung einzelner Effektoren ermöglicht Wirtspflanzen wiederum die schnelle Aktivierung einer aus vielen Komponenten bestehenden Abwehrreaktion, der „effector-triggered immunity“, ETI. Diese Wirtsresistenz ist zwar effektiv, in der Regel aber instabil, da sie von Pathogenen relativ schnell wieder durchbrochen werden kann.

Vor diesem Hintergrund wäre eine Übertragung von Mechanismen der Nicht-Wirts-Resistenz auf Nutzpflanzen von großem Interesse, weshalb diese seit längerem mit physiologisch-biochemischen und seit kurzem auch mit molekular-genetischen Methoden untersucht werden (Nürnberger *et al.*, 2004). Durch Infektion von Mutanten-Populationen von *Arabidopsis thaliana* mit dem Erreger des Echten Mehltaus auf Gerste, *Blumeria graminis* f. sp. *hordei*, für den diese Pflanze kein Wirt ist, konnten mehrere PEN-Gene („penetration resistance“) identifiziert werden, die für die Nicht-Wirts-Resistenz gegen verschiedene Pathogene essentiell sind (Ellis, 2006). PEN1 kodiert für ein Syntaxin, das offensichtlich in Vesikel-vermittelte Sekretionsprozesse direkt an der Infektionsstelle involviert ist (Collins *et al.*, 2003; Assaad *et al.*, 2004; Shimada *et al.*, 2006). Während PEN1 spezifisch an der Nicht-Wirts-Resistenz gegen Mehltau beteiligt zu sein scheint (Shimada *et al.*, 2006), wirken PEN2 und PEN3 auch gegen andere Pathogene, wie *Phytophthora infestans* oder *Plectosphaerella cucumerina* (Lipka *et al.*, 2005; Stein *et al.*, 2006). PEN2 kodiert für eine Glycosylhydrolase, die in Peroxisomen lokalisiert ist und mit diesen zur Infektionsstelle transportiert wird (Lipka *et al.*, 2005). PEN3 kodiert für einen in der Plasmamembran lokalisierten ABC-Transporter, der wahrscheinlich ein durch die Glycosylhydrolase freigesetztes toxisches Sekundärprodukt aus der pflanzlichen Zelle direkt zur Infektionsstelle transportiert (Stein *et al.*, 2006). Alle drei Genprodukte werden offensichtlich nach der PAMP-vermittelten Erkennung zum Infektionsort transportiert, wo sie an der

Verhinderung der Penetration des Pathogens in das pflanzliche Gewebe beteiligt sind (Ellis, 2006).

Die geschilderten Arbeiten zeigen, dass es mit diesem Ansatz möglich ist, Gene zu isolieren, die an der Nicht-Wirts-Resistenz von Pflanzen gegen wichtige phytopathogene Pilze und Oomyceten beteiligt sind. Diese Gene können nun unter Kontrolle geeigneter Promotoren einzeln oder in Kombination in die entsprechenden Kulturpflanzen transformiert werden. Diese Wirtspflanzen müssen dann auf verändertes Resistenzverhalten gegenüber ihren Pathogenen getestet werden. Durch Übertragung des Maisgens *Rxo1*, das Resistenz gegen das bakterielle Maispathogen *Burkholderia andropogonis* vermittelt, war es möglich, in Reis Resistenz gegen *Xanthomonas oryzae* pv. *oryzicola* zu erzeugen, für das Mais keine Wirtspflanze darstellt (Zhao *et al.*, 2005). Dieser erste Transfer von Nicht-Wirts-Resistenz zwischen verschiedenen Gräsern, belegt eindrucksvoll das mögliche Potential dieses Ansatzes.

LITERATUR

- Assaad F F, Qiu J L, Ehrhardt D, Zimmerli L, Kalde M, Wanner G, Peck S C, Edwards H, Ramonell K, Somerville C R, Thordal-Christensen H (2004). The PEN1 syntaxin defines a novel cellular compartment upon fungal attack and is required for the timely assembly of papillae. *Mol Biol Cell* **15**(11), 5118-5129.
- Bai Y, Pavan S, Zheng Z, Zappel N F, Reinstädler A, Lotti C, De Giovanni C, Ricciardi L, Lindhout P, Visser R, Theres K, Panstruga R (2008). Naturally occurring broad-spectrum powdery mildew resistance in a Central American tomato accession is caused by loss of *mlo* function. *Mol Plant Microbe Interact.* **21**(1), 30-9.
- Baulcombe D (2004). RNA silencing in plants. *Nature* **431**, 356-363.
- Baum J A, Bogaert T, Clinton W, Heck G.R, Feldmann P, Ilagan O, Johnson S, Plaetinck G, Munyikwa T, Pleau M, Vaughn T, Roberts J (2007). Control of coleopteran insect pests through RNA interference. *Nature Biotechnology* **25**(11), 1322-1224.
- Broderick N A, Raffa K F, Handelsman J (2006). Midgut bacteria required for *Bacillus thuringiensis* insecticidal activity. *Proceedings of the National Academy of Science* **103** (41): 15196–15199.
- Brogliè K, Chet I, Hollidat M, Cressman R, Biddle P, Knowlton S, Mauvais C.J, Brogliè R (1991). Transgenic plants with enhanced resistance to the fungal pathogen *Rhizoctonia solani*. *Science* **254**, 1194-1197.
- Collins N C, Thordal-Christensen H, Lipka V, Bau S, Kombrink E, Qiu J L, Huckelhoven R, Stein M, Freialdenhoven A, Somerville S C, Schulze-Lefert P (2003). SNARE-protein-mediated disease resistance at the plant cell wall. *Nature* **425**(6961), 973-977.
- Consonni C, Humphry M E, Hartmann H A, Livaja M, Durner J, Westphal L, Vogel J, Lipka V, Kemmerling B, Schulze-Lefert P, Somerville S C, Panstruga R (2006). Conserved

- requirement for a plant host cell protein in powdery mildew pathogenesis. *Nat Genet.* **38(6)**,716-20.
- de Wit P J G M (1992). Molecular characterization of gene-for-gene systems in plant-fungus interactions and the application of avirulence genes in control of plant pathogens. *Annu Rev Phytopathol* **30**, 391-418.
- Eichmann R, Hückelhoven R (2008). Accommodation of powdery mildew fungi in intact plant cells. *J Plant Physiol* **165**, 5-18.
- Ellis J (2006). Insights into nonhost disease resistance: can they assist disease control in agriculture? *Plant Cell* **18(3)**, 523-528.
- Farnham G, Baulcombe D C (2006). Artificial evolution extends the spectrum of viruses that are targeted by a disease-resistance gene from potato. *Proc Natl Acad Sci USA* **103(49)**, 18828-33.
- Fry W (2008). *Phytophthora infestans*: the plant (and R gene) destroyer. *Mol Plant Pathol* **9(3)**, 385-402.
- Gordon K H J, Waterhouse P M (2007). RNAi for insect-proof plants. *Nature Biotechnology* **25(11)**, 1231-1232.
- Haddidi A, Khertarpal R K, Koganezawa H. (Eds.) (1998). Plant Virus Disease Control. APS Press: St. Paul, MN.
- Halpin C (2005). Gene stacking in transgenic plants-the challenge for the 21st century plant biotechnology. *Plant Biotechnology Journal* **3**, 141-155.
- Humphry M, Consonni C, Panstruga R (2006). mlo-based powdery mildew immunity: silver bullet or simply non-host resistance. *Mol Plant Pathol* **7(6)**, 605-610.
- Innes R.W (2004). Guarding the goods. New insights into the central alarm system of plants. *Plant Physiol.* **135(2)**, 695-701.
- Jan F J, Fagoaga C, Pang S Z, Gonsalves D (2000). A single chimeric transgene derived from two distinct viruses confers multi-virus resistance in transgenic plants through homology dependent gene silencing. *J.Gen.Virol.* **81**, 2103-2109.
- Jaubert-Possamai S, Le Trionnaire G, Bonhomme J, Christophides G.K, Risse C, Tagu D (2007). Gene knockdown by RNAi in the pea aphid *Acyrtosiphon pisum*. *BMC Biotechnology* **7**, 63 doi:10.1186/1472-6750-7-63.
- Jones J D, Dangl J L (2006). The plant immune system. *Nature* **444(7117)**, 323-329.
- Lipka V, Dittgen J, Bednarek P, Bhat R, Wiermer M, Stein M, Landtag J, Brandt W, Rosahl S, Scheel D, Llorente F, Molina A, Parker J, Somerville S, Schulze-Lefert P (2005). Pre- and postinvasion defenses both contribute to nonhost resistance in Arabidopsis. *Science* **310(5751)**, 1180-1183.
- Mao Y- B, Cai W-J, Wang J-W, Hong G-J, Tao X-Y, Wang L-J, Huang Y-P, Chen X-Y (2007). Silencing a cotton bollworm P450 monooxygenase gene by plant mediated RNAi impairs larval tolerance of gossypol. *Nature Biotechnology* **25(11)**, 1307-1313.

- Mitter N, Sulistyowati E, Dietzgen R G (2003). Cucumber mosaic virus infection transiently breaks dsRNA-induced transgenic immunity to Potato virus Y in tobacco. *Mol Plant Microbe Interact.* **16**, 936-944.
- Mooser J (2006). Insektenresistente transgene Nutzpflanzen in Westeuropa: Status und Perspektiven. *Schriftenreihe der Deutschen Phytomedizinischen Gesellschaft* **8**, 69-79.
- Moissiard G, Voinnet O (2004). Viral suppression of RNA silencing in plants. *Mol Plant Pathol* **5**, 71-82.
- Monsanto & Dow Agrosience (2007). Monsanto Dow Agrosience paves the way for industries first ever, eight-gene stacked offering in corn. Pressemitteilung vom 14.09.2007.
- Niu Q W, Lin S S, Reyes J L, Chen K C, Wu H W, Yeh S D, Chua N H (2006). Expression of artificial microRNAs in transgenic *Arabidopsis thaliana* confers virus resistance. *Nat. Biotechnol.* **24**, 1420-1428.
- Nürnberg T, Brunner F, Kemmerling B, Piater L (2004). Innate immunity in plants and animals: striking similarities and obvious differences. *Immunol Rev* **198**, 249-266.
- Ober K A, Jockusck E L (2006). The roles of wingless and decapentaplegic in axis and appendage development in the red flour beetle, *Tribolium castaneum*. *Developmental Biology* **294(2)**, 391-405.
- Panstruga R (2005). Serpentine plant MLO proteins as entry portals for powdery mildew fungi. *Biochem Soc Trans* **33(Pt 2)**, 389-92.
- Prins M (2003). Broad virus resistance in transgenic plants. *Trends in Biotechnology* **21**, 373-375.
- Roossinck M J (1997). Mechanisms of plant virus evolution. *Annu Rev Phytopathol* **35**, 191-209.
- Rushton P J, Reinstädler A, Lipka V, Lippok B, Somssich I.E (2002). Synthetic plant promoters containing defined regulatory elements provide novel insights into pathogen- and wound-induced signalling. *Plant Cell* **14(4)**, 749-762.
- Schouten H J, Krens F A, Jacobsen E (2006). Cisgenic plants are similar to traditionally bred plants: international regulations for genetically modified organisms should be altered to exempt cisgenesis. *EMBO rep.* **7(8)**, 750-753.
- Shimada C, Lipka V, O'Connell R, Okuno T, Schulze-Lefert P, Takano Y (2006). Nonhost resistance in *Arabidopsis-Colletotrichum* interactions acts at the cell periphery and requires actin filament function. *Mol Plant Microbe Interact* **19(3)**, 270-279.
- Smith N A, Singh S P, Wang M B, Stoutjesdijk P A, Green A G, Waterhouse P M (2000). Total silencing by intron-spliced hairpin RNAs. *Nature* **407**, 319-320.
- Song J, Bradeen J M, Naess S K, Raasch J A, Wielgus S M, Haberalach G T, Liu J, Kuang H, Austin-Phillips S, Buell C B, Helgeson J P, Jiang J (2003). Gene RB cloned from *Solanum bulbocastanum* confers broad spectrum resistance to potato late blight. *Proc Natl Acad Sci USA* **100 (16)**, 9128-9133.
- Soosaar J L, Burch-Smith T M, Dinesh-Kumar S P (2005). Mechanisms of plant resistance to viruses. *Nat Rev Microbiol.* **3**, 789-798.

- Stahl D J, Schmidt K, Nehls R (2006). Einsatz gentechnischer Methoden zur Verbesserung der Kulturpflanzenresistenz gegenüber parasitären Pilzen. *Schriftenreihe der Deutschen Phytomedizinischen Gesellschaft e.V.* **Bd. 8**, 80 -93.
- Stein M, Dittgen J, Sanchez-Rodriguez C, Hou B H, Molina A, Schulze-Lefert P, Lipka V, Somerville S (2006). Arabidopsis PEN3/PDR8, an ATP binding cassette transporter, contributes to nonhost resistance to inappropriate pathogens that enter by direct penetration. *Plant Cell* **18(3)**, 731-746.
- Tabashnik B E, Gassmann A J, Crowder D W, Carriere Y (2008). Insect resistance to Bt crops: evidence versus theory. *Nature Biotechnology* **26 (2)**, 199-202.
- Tavladoraki P, Benvenuto E, Trinca S, De Martinis D, Cattaneo A, Galeffi P (1993). Transgenic plants expressing a functional single-chain Fv antibody are specifically protected from virus attack. *Nature* **366**, 469-472.
- Tepfer M (2002). Risk assessment of virus-resistant transgenic plants. *Annu Rev Phytopathol* **40**, 467-491.
- Thomzik J, Stenzel K, Stöcker R, Schreier P H, Hain R, Stahl D J (1997). Synthesis of a grapevine phytoalexin in transgenic tomatoes (*Lycopersicon esculentum* Mill.) conditions resistance against *Phytophthora infestans*. *Physiol Mol Plant Pathol* **51**, 265-278.
- Timmons L, Fire A (1998). Specific interference by ingested dsRNA. *Nature* **395**, 854.
- Tomoyasu Y, Miller S C, Tomita S, Schoppmeister M, Grossmann D, Bucher G (2008). Exploring systemic RNA interference in insects: a genome-wide survey for RNAi genes in *Tribolium*. *Genome Biology* **9**, R10 doi:10.1186/gb-2008-9-1-r10.
- van der Vossen E, Sikkema A, Hekkert B L, Gros J, Stevens P, Muskens M, Wouters D, Pereira A, Stiekema W, Allefs S (2003). An ancient R gene from the wild potato species *Solanum bulbocastanum* confers broad-spectrum resistance to *Phytophthora infestans* in cultivated potato and tomato. *Plant J.* **36(6)**, 867-82.
- von Tiedemann A, Feldmann F (Eds.) (2006). Biotechnologie – Innovationsmotor für den Pflanzenschutz. *Schriftenreihe der Deutschen Phytomedizinischen Gesellschaft e.V.* **Bd. 8**.
- Whitham S, McCormick S, Baker B (1996). The N gene of tobacco confers resistance to tobacco mosaic virus in transgenic tomato. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* **93**, 8776-8781.
- Zhao B, Lin X, Poland J, Trick H, Leach J, Hulbert S (2005). A maize resistance gene functions against bacterial streak disease in rice. *Proc Natl Acad Sci USA* **102(43)**, 15383-15388.
- Zipfel C (2008). Pattern-recognition receptors in plant innate immunity. *Curr Opin Immunol* **20(1)**, 10-16.

Mehl A, Stenzel K: Resistenzmanagement zur Erhaltung der Wirksamkeit von Pflanzenschutzmitteln in der Praxis - am Beispiel der Fungizide. In: Tiedemann A v, Heitefuss R, Feldmann F (2008): Pflanzenproduktion im Wandel – Wandel im Pflanzenschutz, ISBN 978-3-941261-00-6; 122-137. © Deutsche Phytomedizinische Gesellschaft, Braunschweig, Germany

Resistenzmanagement zur Erhaltung der Wirksamkeit von Pflanzenschutzmitteln in der Praxis - am Beispiel der Fungizide

A Mehl, K Stenzel

Bayer CropScience AG, Forschung Fungizide, Institut für Pflanzenkrankheiten, Alfred-Nobel-Str. 50, 40789 Monheim; Email: klaus.stenzel@bayercropscience.com

ZUSAMMENFASSUNG

Die Entwicklung von Resistenz gegenüber Pflanzenschutzmitteln ist ein natürliches Ereignis, das gegenüber spezifisch wirkenden Fungiziden in unterschiedlicher Häufigkeit, Intensität und Auswirkung auftreten kann. In Abhängigkeit vom Resistenzmechanismus ist die Resistenz graduell („shifting-type“), bei der durchaus eine verlässliche Kontrolle der Erregerpopulation gewährleistet sein kann, oder vollständig (oftmals „disruptive Resistenz“), bei der zumeist keine ausreichende Wirkung mit der betroffenen Wirkstoffgruppe zu erzielen ist. Maßnahmen des Resistenzmanagements können nicht das Erscheinen einer Resistenz in der Praxis verhindern, sondern zielen darauf ab, Selektionsvorgänge zu unterbrechen, eine wirksame Krankheitsbekämpfung zu gewährleisten und entstehenden Schaden zu minimieren. Die Begrenzung der Spritzungen mit einer Wirkstoffgruppe im Rahmen von Spritzprogrammen und Mischungen und Alternierungen mit Wirkstoffen mit einem anderen, nicht kreuzresistenten Wirkmechanismus unterdrücken die Vermehrung und Ausbreitung sich selektionierender resistenter Stämme. Um Sensitivitätsveränderungen rechtzeitig erkennen und ihre Ausbreitung verfolgen zu können, ist ein fachgerechtes Resistenzmonitoring unverzichtbar. Im Rahmen des FRAC werden Sensitivitätsänderungen der wichtigsten Krankheitserreger erfasst und allgemeine Richtlinien erarbeitet und publiziert. Anhand der Azole und der Strobilurine werden Beispiele aus der Praxis dargestellt.

EINLEITUNG

Pflanzenschutzmittel sind ein unverzichtbarer Bestandteil einer effizienten Produktion von Nahrungsmitteln, Futtermitteln und immer stärker auch erneuerbaren Energieträgern. Die kontinuierlich steigende Nachfrage nach pflanzlichen Produkten kann nicht durch Flächenzuwachs befriedigt werden, sondern erfordert eine zunehmende Intensivierung der Landwirtschaft auf globaler Ebene. Daraus resultiert ein steigender Bedarf an wirksamen Pflanzenschutzmitteln, die helfen, sowohl die Quantität als auch die notwendige Qualität der Ernten zu sichern und die Erträge zu steigern. Ein breites Portfolio von Pflanzenschutzmitteln mit verschiedenen Wirkspektren und –mechanismen gewährleistet, dass effektive Bekämpfungsprogramme zusammengestellt werden können und ist Voraussetzung für ein wirksames Resistenzmanagement. Die drastische Einschränkung in der Diversität von verfügbaren Wirkstoffen, wie sie aus den zur Zeit laufenden Diskussionen zur Neuregelung der Zulassung von Pflanzenschutzmitteln in der EU (Directive 91/414/EEC) resultieren könnte, sind unbedingt auch im Zusammenhang mit dem Resistenzmanagement zu sehen und hätte einschneidende Begrenzungen zur Folge. Der Wandel im Pflanzenschutz, erhöhte Produktivität verbunden mit einem eingeschränkten Instrumentarium, unterstreicht die Wichtigkeit eines nachhaltigen Resistenzmanagements, das sich die Erhaltung der Wirksamkeit von resistenzgefährdeten Wirkstoffen als Ziel gesetzt hat.

Resistenzentwicklungen gegenüber Fungiziden sind seit fast 50 Jahren bekannt (Tab.1). Über die nachlassende Wirksamkeit von unspezifisch wirkenden Fungiziden wurde erst nach einer sehr langen Periode der Anwendung berichtet. Nach der Einführung spezifischer Fungizide traten teilweise schon nach wenigen Jahren, bei fast der Hälfte sogar schon im zweiten Jahr nach der Markteinführung erste Resistenzen auf. Diese Resistenzen konnten bis hin zu einer völligen Wirkungslosigkeit der Wirkstoffgruppe gegenüber einer Erregergruppe führen. Bei anderen spezifisch wirkenden Fungizidklassen traten Resistenzen erst nach etlichen Jahren breiter Anwendung auf. Oftmals waren in diesen Fällen die Resistenzen nur graduell, Befallsentwicklungen konnten durchaus kontrolliert werden.

Schon dies deutet darauf hin, dass Resistenz kein einheitliches Phänomen ist, sondern sehr differenziert betrachtet, in ihren Auswirkungen bewertet und angepasste Maßnahmen für ein wirksames Resistenzmanagement erarbeitet werden müssen. Zur Zulassung eines Wirkstoffes gehört daher nicht nur die Darstellung der Wirksamkeit gegenüber den Schaderregern, die in Vielzahl zu unterschiedlichen Zeiten während der Kulturperiode auftreten können, sondern auch eine detaillierte Betrachtung der Resistenzsituation und des Risikos, dass sich Resistenzen bei diesen Schaderregern ausbilden können.

DAS RESISTENZRISIKO - UND WOVON ES BESTIMMT WIRD

Das Risiko, dass resistente Populationen von Schaderregern selektioniert werden, hängt zum einen vom Fungizid und dessen Wirkmechanismus ab. Aufgrund der unspezifischen, oftmals irreversiblen Inhibition von Stoffwechselprozessen, die an vielen Stellen im Metabolismus eine Rolle spielen, wird das Risiko der unspezifischen Fungizide als sehr gering eingestuft. Spezifische Fungizide, die auf ein einzelnes molekulares Target wirken, unterliegen grundsätzlich einem

Tabelle 1 Auftreten von Resistenzen gegenüber Pflanzenpathogenen mit praktischer Relevanz (nach Brent & Hollomon, 2007)

Jahr der ersten Beobachtung	Fungizid / Fungizidklasse	Jahre kommerzieller Nutzung bis zur Beobachtung von Resistenz	Betroffene Kulturen und Pathogene (Beispiele)	Lit*
1960	Aromatische Kohlenwasserstoffe	20	Citrus / <i>Penicillium</i> spp.	1
1964	Organo-Quecksilber-Verbindungen	40	Getreide / <i>Pyrenophora</i> spp.	2
1969	Dodine	10	Apfel / <i>Venturia inaequalis</i>	3
1970	Benzimidazole	2	viele verschiedene Pathogene	4
1971	2-Amino-Pyrimidine	2	Gurke, Gerste <i>Sphaerotheca fuliginea</i> , <i>Blumeria graminis</i>	5
1971	Kasugamycin	6	Reis / <i>Magnaporthe grisea</i>	6
1976	Phosphorothiolate	9	Reis / <i>Magnaporthe grisea</i>	6
1977	Triphenylzinn-Verbindungen	13	Zuckerrübe / <i>Cercospora betae</i>	7
1980	Phenylamide	3	Kartoffel, Rebe <i>Phytophthora infestans</i> <i>Plasmopara viticola</i>	8
1982	Dicarboximide	5	Rebe / <i>Botrytis cinerea</i>	9
1982	Demethylase-Inhibitoren (DMIs)	7	Gemüse, Getreide, <i>S. fuliginea</i> , <i>Blumeria graminis</i>	10
1985	Carboxanilide	15	Gerste / <i>Ustilago nuda</i>	11
1998	QoIs; Strobilurine	2	Getreide / <i>Blumeria graminis</i>	12
2002	Melaninbiosynthese Inhibitoren	2	Reis / <i>Magnaporthe grisea</i>	13

* Literatur 1. Eckert, 1982; 2. Noble *et al.* 1966; 3. Gilpatrick, 1982; 4. Smith, 1988; 5. Brent, 1982; 6. Kato, 1988; 7. Giannopolitis, 1978; 8. Staub, 1994; 9. Lorenz, 1988; 10. De Waard, 1994; 11. Locke, 1986; 12. Heaney *et al.* 2000; 13. Kaku *et al.* 2003.

höheren Risiko. Zum anderen ist das Pathogen und seine Biologie zu berücksichtigen. Ein kurzer Lebenszyklus mit hoher Reproduktionsrate, eine polyzyklische Vermehrung, sexuelle Rekombination, eine windbürtige Verbreitung und die Fähigkeit, die meisten Wachstumsstadien der Pflanzen infizieren zu können, führt häufig zu einem hohen Risiko. Auch die agronomischen Rahmenbedingungen bestimmen die mögliche Verbreitung und Relevanz auftretender Resistenzen. Dazu zählen Umweltbedingungen, aber auch beeinflussbare Faktoren wie Standortwahl, Sortenwahl und Bestandesführung. Alle Faktoren zusammen determinieren das Risiko und die praktische Bedeutung einer Resistenzentwicklung für den Pflanzenschutz in einer Kultur. Auch der Erfahrungsschatz der letzten 40-50 Jahre werden als Grundlage für eine Risikobewertung herangezogen. Kuck (2005) hat die beschriebenen Risiken miteinander in Beziehung gesetzt und eine Klassifizierung des kombinierten Resistenzrisikos entwickelt. Diese führt das agronomische Risiko als einen weiteren wichtigen Parameter neben dem fungizidspezifischen und dem pathogenspezifischen Risiko ein.

GRUNDSÄTZLICHE TYPEN DER FUNGIZIDRESISTENZ UND BETEILIGTE RESISTENZMECHANISMEN

Man unterscheidet graduelle Resistenzen (u.a. ‚shifting type‘) und eine vollständige (oft ‚disruptive‘) Resistenz. Während die graduelle Resistenz eine verringerte Sensitivität des Erregers gegen eine Wirkstoffgruppe beschreibt, bei der noch eine gute und verlässliche Kontrolle der Erregerpopulation in der Praxis gewährleistet sein kann, ist bei einer disruptiven Resistenz einer Population eine ausreichende Wirkung mit der betroffenen Wirkstoffgruppe meist nicht mehr zu erzielen.

Verschiedene Mechanismen sind an der Entwicklung von Resistenz beteiligt. Die größte Auswirkung haben spezifische Mutationen am Wirkort, die die Bindung des fungiziden Wirkstoffes in diesen Wirkort und damit als Folge die Wirksamkeit reduzieren. Je nachdem, wie stark die Mutation die dreidimensionale Struktur der Bindensite verändert, sind Abstufungen von geringem Einfluß auf die Wirksamkeit bis hin zum völligen Wirkungsverlust möglich. Grundsätzlich sind davon alle Wirkstoffe betroffen, die in gleicher Weise binden, graduelle Unterschiede können aufgrund der verschiedenen chemischen Wirkstoffstrukturen und der intrinsischen Wirkpotenz bestehen. Wenn Mutationen keinen negativen Einfluß auf die Fitness der Erreger haben, können sich Populationen, die diese Veränderungen tragen, rasch in der Praxis ausbreiten. Disruptive oder monogenische Resistenzen basieren meist auf diesen Mutationen, als ein Beispiel wird in diesem Artikel die Resistenz gegen Strobilurin-Fungizide erläutert. In Abb. 1 sind schematisch die Unterschiede zwischen der graduellen und der disruptiven Resistenz in Bezug auf die typischen Verteilungskurven der Sensitivitäten der Erregerpopulationen dargestellt.

Graduelle Resistenzen basieren auf unspezifischen oder multigenischen Mechanismen, oftmals treten beide auch zusammen auf. Eine Ursache unspezifischer Mechanismen ist die

energieabhängige Ausschleusung von Fungiziden durch sogenannte ABC (ATP-Binding-Cassette) -Transporter (De Waard *et al.*, 2006). Ihr Beitrag zur Resistenz wird aufgrund des geringen Resistenzfaktors bislang als begrenzt bewertet und die oftmals damit verbundene Einschränkung der pilzlichen Fitness limitiert die praktische Bedeutung (Dekker, 1981; De Waard *et al.*, 1982, 1995). Ein weiterer, unspezifischer Mechanismus ist die Metabolisierung von Wirkstoffen durch pilzliche Enzyme. Dies spielt allerdings bei fungiziden Wirkstoffen im Vergleich zu Herbiziden und Insektiziden nur eine untergeordnete Rolle, Kreuzresistenz innerhalb einer Wirkmechanismuskategorie ist hier nicht zwingend gegeben (Jabs *et al.*, 2001).

Auch die praktische Relevanz der Überexpression des Wirkortes, die zu einer graduellen Resistenz führt, ist begrenzt und nur für wenige Beispiele beschrieben (Schnabel & Jones, 2000). Die metabolische Umgehung des inhibierten Stoffwechselweges ist ein weiterer Resistenzmechanismus mit begrenzter Bedeutung (Ziogas *et al.*, 1997).

Ursache multigenischer Resistenzen sind ein oder mehrere Mutationen am Wirkort, welche die Bindung der Wirkstoffe wirkstoffspezifisch oft nur marginal beeinflussen, und Veränderungen in anderen nicht näher zu identifizierenden Stoffwechselvorgängen. Multigenische Resistenzen führen zu einer kontinuierlichen Selektion weniger sensibler Populationen, die sich schrittweise und über einen längeren Zeitraum ereignet. Hierfür ist dauerhafter Selektionsdruck notwendig. Andererseits ist ein Zurück-, 'Shiften' ebenfalls möglich, da die Fitness der veränderten Populationen beeinträchtigt sein kann. Am Beispiel der Sterolbiosyntheseinhibitoren wird dieser Resistenztyp näher dargestellt werden.

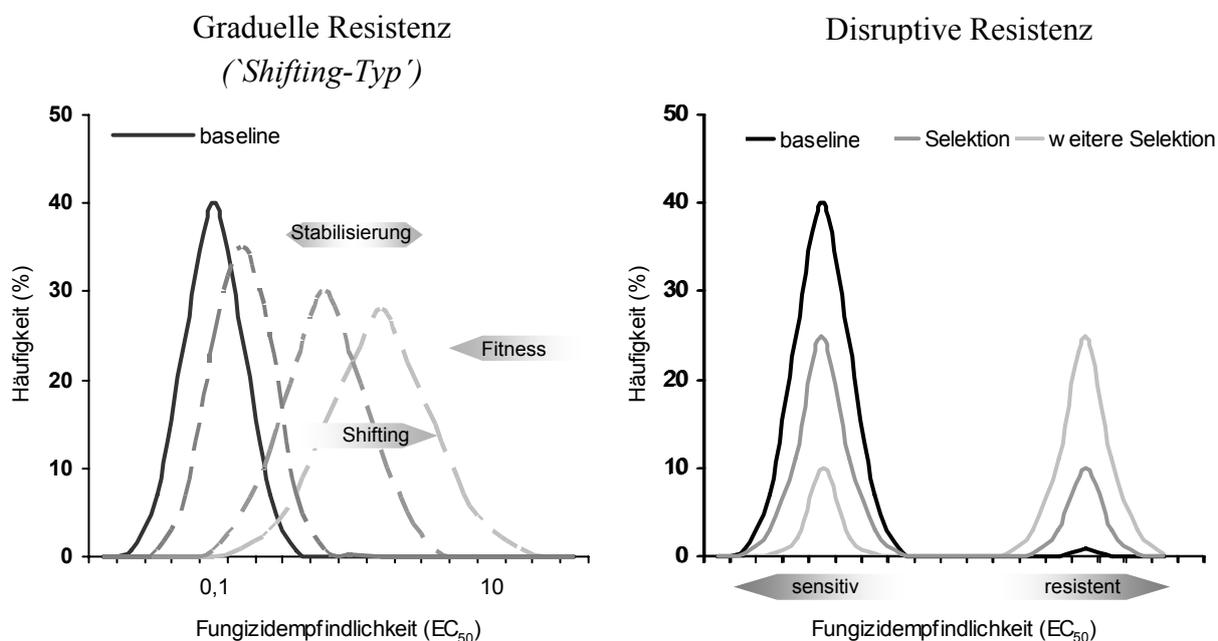


Abb. 1: Schematischer Vergleich des graduellen und des disruptiven Resistenztypes

RESISTENZMONITORING

Resistenzentwicklungen haben in der Praxis immer wieder zu einer dynamischen Anpassung der Pflanzenschutzmaßnahmen geführt, um einen wirksamen Schutz der Kulturpflanzen zu gewährleisten. Die Kenntnis über den Sensitivitätszustand der Pathogenpopulationen ist eine unabdingbare Voraussetzung, um Entscheidungen für notwendige Anpassungen gezielt und vor allem rechtzeitig treffen zu können.

Nur ein breit angelegtes Monitoring erlaubt eine aussagekräftige Analyse des Ist-Zustandes. Dies trifft insbesondere bei windbürtigen Schaderregern zu, die sich in einer Saison über große Distanzen hinweg ausbreiten können. Um eine Aussage zu einer Sensitivitätssituation machen zu können, sind umfangreiche Probenahmen je Standort und zahlreiche Standorte in den relevanten Anbaugebieten notwendig. Sollen darüber hinaus auch Schlüsse über Veränderungen unter dem Einfluß der Fungizidbehandlungen getroffen und Trends vor allem bei graduellen Resistenzen erkannt werden, ist ein Monitoring über mehrere Jahre hinweg notwendig. Dazu gehört auch die Erarbeitung von Korrelationen zwischen Sensitivitätsanalysen im Labor und der Wirkung im Feld. Nicht alle im Labor ermittelten Sensitivitätsänderungen sind auch in der Praxis anhand von Wirkungsverlusten sichtbar und nicht alle beschreiben die Ursache für Wirkungsverluste in der Feldanwendung ausreichend und vollständig. Resistenzfaktoren sind nur ein Teil des Komplexes ‚Biologische Wirkung‘. Erst aus der Entwicklung in der Vergangenheit, der regionalen Ausbreitung und den epidemiologischen Eigenschaften der Pathogene kann versucht werden, Vorhersagen für die kommende Saison zu treffen. Hieraus lassen sich dann notwendige Maßnahmen des Resistenzmanagements zur Erhaltung der Wirksamkeit der Wirkstoffgruppe und zur Krankheitsbekämpfung ableiten.

Das Monitoring besteht aus der Probenahme, aus der Prüfung der Sensitivität des Erregers und aus der Analyse und Interpretation der Versuchsergebnisse. Ein überregionales Monitoring der wichtigsten Wirkstoffgruppen wird in der Regel von den Pflanzenschutzfirmen unternommen. Es erfordert erheblichen logistischen und methodischen Aufwand. Um die Untersuchungen besser vergleichbar zu machen und eine wissenschaftliche Auswertung zu erleichtern, sind im Rahmen des FRAC (siehe unten) Methoden erarbeitet, validiert und auf der FRAC-Webseite veröffentlicht worden (www.frac.info).

Je nach Pathogen und Resistenztyp kommen grundsätzlich verschiedene Prüfmethode an Pflanzen oder Pflanzenteilen, in in vitro-Tests auf Agarplatten oder in Mikrotiterplatten, oder molekularbiologische Methoden zur Detektion relevanter Mutationen zum Einsatz (Abb. 2). Ermittelt wird in den biologischen Versuchen stets der EC_{50} -Wert, der als Maß für die Sensitivität und für die Ermittlung der Resistenzfaktoren dient ($RF = EC_{50} \text{ Prüfisolat} / EC_{50} \text{ Referenzisolat}$).

DIE RESISTANCE ACTION COMMITTEES - ORGANISATION IM RESISTENZMANAGEMENT

Die Pflanzenschutzfirmen sehen sich in der Verantwortung, eine langfristige Versorgung mit wirksamen Pflanzenschutzmitteln sicherzustellen und Maßnahmen zur Erhaltung der Wirksamkeit zu ergreifen. Diese Maßnahmen müssen koordiniert für alle Wirkstoffe eines Wirkmechanismus bzw. einer Kreuzresistenzklasse gelten. Aus diesem Grunde haben sich Pflanzenschutzmittel produzierende Firmen zusammengefunden, um das Auftreten und das Management von Resistenzen gegen fungizide Wirkstoffe wissenschaftlich zu bearbeiten. Das ‚Fungicide Resistance Action Committee‘ (FRAC) wurde 1981 als eine Industrieorganisation mit dem Ziel gegründet, Resistenzprobleme zu analysieren und übergeordnete Empfehlungen auf dieser wissenschaftlichen Basis zu formulieren. Damit soll die Selektion von Resistenzereignissen möglichst verzögert und die weitere Ausbreitung im Feld durch geeignete Maßnahmen begrenzt werden.

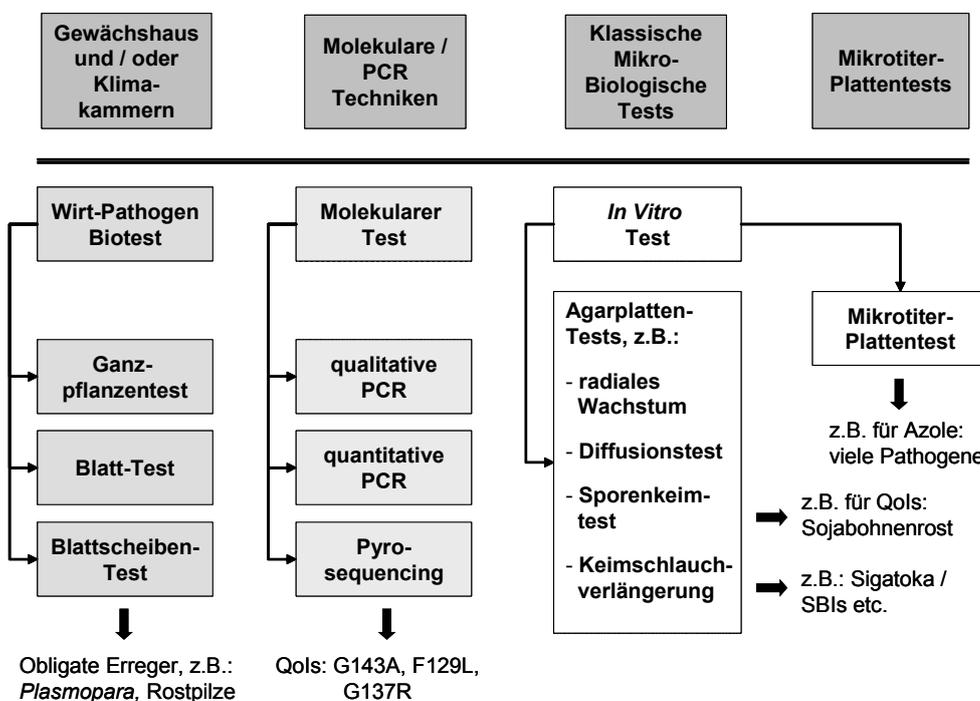


Abb. 2 Schematische Darstellung der verschiedenen Techniken für das Resistenzmonitoring mit pilzlichen Krankheitserregern (Abkürzungen siehe Text)

Im FRAC wurden im Laufe der Zeit mehrere Arbeitsgruppen entsprechend der Wirkmechanismen bzw. Kreuzresistenz-Charakteristik der Fungizide etabliert, wie für Sterolbiosyntheseinhibitoren (SBI), Atmungsketteninhibitoren Komplex III (QoI), Anilinopyrimidine (AP) und Carboxylsäureamide (CAA) sowie Experten-Foren für Benzimidazole, Dicarboximide und Phenylamide. Die Arbeitsgruppen treffen sich einmal jährlich,

legen Ergebnisse von Monitoringstudien dar und erarbeiten daraufhin Empfehlungen, die auf der FRAC-Internetseite publiziert werden (www.frac.info).

Werden mindestens zwei neue Wirkstoffe mit einem neuen Wirkmechanismus und gleichem Kreuzresistenzverhalten von zwei oder mehr Pflanzenschutzunternehmen in den Markt eingeführt, wird üblicherweise eine neue Gruppe gebildet.

GENERELLE MASSNAHMEN DES RESISTENZMANAGEMENTS

Maßnahmen des Resistenzmanagements zielen darauf ab, Selektionsvorgänge zu unterbrechen und die Bedürfnisse der Praxis nach einer wirksamen Krankheitsbekämpfung zu erfüllen. Wesentlich für den Erfolg einer solchen Strategie ist stets die möglichst breite und umfassende Implementierung in der Praxis. Zu den geeigneten Maßnahmen zählen die Begrenzung der Spritzungen mit einer Wirkstoffgruppe im Rahmen der Spritzprogramme und damit die Begrenzung einer ausschließlichen Anwendung eines Wirkmechanismus. Mischungen mit Wirkstoffen mit einem anderen, nicht kreuzresistenten Wirkmechanismus unterdrücken die Vermehrung und Ausbreitung sich selektionierender resistenter Stämme. Alternierungen sind ebenso geeignet um den Selektionsdruck zu reduzieren. In beiden Fällen kommt es auf die individuelle Kultur und deren Erregerspektrum an, um geeignete Spritzprogramme zu entwickeln. Wenn geeignete Wirkstoffe für Alternierungen und Mischungen nicht ausreichend zur Verfügung stehen, sollte die Anwendung der Präparate entsprechend ihrer Eigenschaften für besonders kritische Wachstumsphasen der Pflanzen vorbehalten sein.

Aus Sicht des Resistenzmanagements ist eine protektive Anwendung vorzuziehen. Dies gilt besonders, wenn nicht-systemische Präparate oder Präparate, die nur auf die frühen Entwicklungsphasen der Pathogene wirken, als Bekämpfungsmaßnahme oder Mischpartner eingesetzt werden. Werden Befallsschwellen-orientierte Maßnahmen durchgeführt und sind kurative oder eradikative Wirkungen gefordert, sind eradikative Anwendungen zu vermeiden. Eradikative Einsätze tragen immanent das höhere Risiko, dass Befallsentwicklungen nicht mehr ausreichend unter Kontrolle gebracht werden können und die Selektion von resistenten Populationen aus größeren Ursprungspopulationen erfolgt. Bei kurativem Einsatz muss auch hier darauf geachtet werden, dass die Wirkungseigenschaften der verschiedenen Fungizidklassen und Mischpartner inklusive ihrer unterschiedlichen systemischen und kurativen Eigenschaften ausgeschöpft werden und eine möglichst günstige Kombination zusammengestellt wird. Eine wirksame Krankheitsbekämpfung ist immer auch die Basis für ein wirksames Resistenzmanagement.

Zu den Maßnahmen gehören unbedingt auch die geeignete Auswahl von Kultursorten, ggf. die Auswahl von Gesundlagen, die Bestandesführung und pflanzenstärkende Maßnahmen.

Resistenzmanagement ist damit immer auch ein Teil des Integrierten Pflanzenschutzes und hängt wiederum von ihm ab.

BEDEUTUNG DER RESISTENZ UND DES RESISTENZMANAGEMENTES IN DER PRAXIS

1. Beispiel: Resistenz gegen Sterolbiosynthese-Inhibitoren („Shifting“ Typ)

Mehr als 30 Azole sind in den letzten 30 Jahren in den Markt eingeführt und breit eingesetzt worden. Resistenz gegen Demethylaseinhibitoren („DMI Fungizide“), einer Untergruppe der SBI-Fungizide, wurde für mehrere Pathogene wie z.B. *B. graminis*, *Mycosphaerella fijiensis* oder *V. inaequalis* berichtet (De Waard *et al.*, 1986; Fletcher & Wolfe, 1981; Stanis & Jones, 1985).

In einer Vielzahl von wissenschaftlichen Arbeiten wurde dargestellt, dass die Resistenz-Charakteristik der Azolfungizide dem „Shifting“-Typ entspricht. Die beschriebenen Sensitivitätsverschiebungen traten zumeist erst nach jahrelanger Anwendung in einzelnen Indikationen schrittweise auf und führten in der Regel nicht zu einem vollständigen Verlust der Wirksamkeit. Diese relativ langsame Entwicklung der Resistenz kann durch ein gezieltes Monitoring rechtzeitig erkannt werden und bietet gute Möglichkeiten für ein Resistenzmanagement. Dazu gehören die aus der Abschätzung des Risikos des Pathogenes und der Anbaubedingungen resultierende konsequente Anwendung von alternierenden Spritzungen oder Mischungen mit nicht kreuzresistenten Wirkstoffgruppen, vor allem unter Hochrisikobedingungen. Trotz der mittlerweile zahlreich beschriebenen Resistenzereignisse und der Identifikation verschiedener Mutationen im Zielenzym der DMI-Fungizide ist die Bedeutung der Azolfungizide im Pflanzenschutz aufgrund der sicheren und breiten Wirkung bis heute nicht zurückgegangen. Aufgrund dieser Erfahrungen und der Bewertung des Resistenzmechanismus wird das Resistenzrisiko bei DMI Fungiziden als „medium“ oder „moderat“ eingestuft (Brent & Hollomon, 2007, FRAC 2007).

Abbildung 3 illustriert exemplarisch für viele Erreger die Entwicklung der Tebuconazole-Sensitivität von Weizenmehltau in Deutschland in den letzten 20 Jahren. Die relativ hohe Schwankungsbreite der im Labortest ermittelten Sensitivität wird ebenso ersichtlich wie die regionalen Unterschiede im Verlauf der Jahre. Die in einem Blatttest ermittelten mittleren Resistenzfaktoren (MRF-Werte) variieren in einem Bereich von etwa 10-45 gegenüber Wildtypisolaten aus den 70er Jahren und liegen seit ca. 15 Jahren stabil bei ca. 20-25. Dies unterstreicht die Notwendigkeit von mehrjährigen Monitoring-Studien und von Kenntnissen zu wirkstoff- und schaderregerspezifischen Fluktuationen der Sensitivitäten in Labortestsystemen.

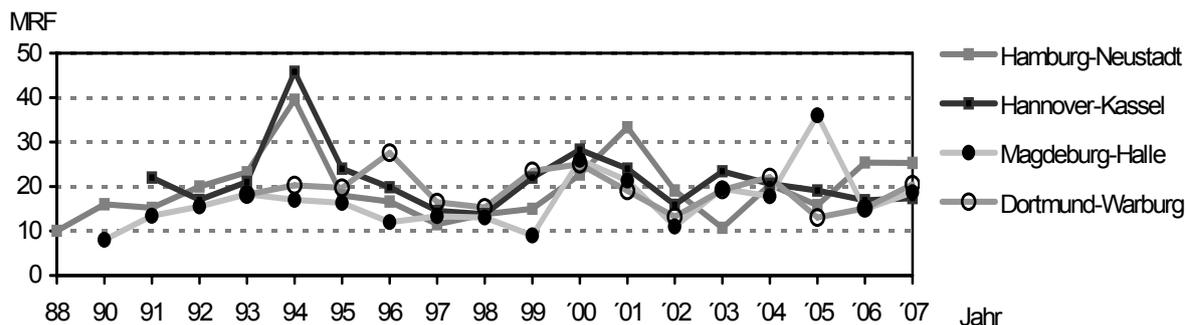


Abb. 3: Sensitivität verschiedener Populationen von Weizenmehltau *Blumeria graminis* f.sp. *tritici* gegenüber Tebuconazole im Langzeitmonitoring in Deutschland 1988 bis 2007 (Daten: EpiLogic; MRF, mittlerer Resistenzfaktor)

In den letzten Jahren beschäftigen sich zahlreiche Arbeitsgruppen intensiv mit *Mycosphaerella graminicola* (*Septoria tritici*), dem zur Zeit in Nordwesteuropa wichtigsten Getreidepathogen, der nicht mehr mit allen DMI-Fungiziden zufrieden stellend bekämpft werden kann. Die Autoren fokussieren sich in ihren Resistenzuntersuchungen auf die molekularbiologische Identifizierung von Mutationen im Wirkort und klassifizieren die Isolate entsprechend den genetischen Unterschieden, ihrer geographischen Herkunft und Verbreitung sowie teils anhand von Daten aus Sensitivitätsuntersuchungen im Labor (Brunner *et al.*, 2008, Cools *et al.*, 2005, Fraaije *et al.*, 2007, Leroux *et al.*, 2007). Es werden aber umfangreiche weitere Studien und Sensitivitätsuntersuchungen notwendig sein, um daraus Empfehlungen für ein solides Resistenzmanagement für Azol-Fungizide entnehmen zu können.

2. Beispiel: Resistenz gegen Strobilurine (disruptiver Typ)

Mit den Strobilurinen wurde 1996 eine neue chemische Klasse in den Markt eingeführt, die aufgrund ihrer potentiell breiten Wirkung und ihrer hohen Wirkpotenz großes Interesse und breite Anwendung in der Praxis fand. Die Produkte wurden als Solopräparate eingeführt, Empfehlungen sahen eine Alternierung mit anderen Wirkmechanismen, zum Beispiel mit den Triazolen vor.

Erste Wirkungsverluste wurden bei Weizenmehltau schon 1998 zwei Jahre nach der Markteinführung in Norddeutschland beobachtet (Chin *et al.*, 2001). Der Grad der Resistenz war hoch, die Wirkung der Strobilurine war dramatisch reduziert. Als Ursache wurde eine Mutation im Wirkort identifiziert, die zu einem Austausch der Aminosäure Glycin durch Alanin in der Position 143 des Cytochrom *b* Proteins führt (G143A) (Sierotzki *et al.*, 2000; Heaney *et al.*, 2000). Mittlerweile wurde diese Mutation bei vielen Pathogenen gefunden, die Fitness ist nicht beeinträchtigt. Resistenzfaktoren sind mit Werten von >100 bis > 1000 sehr hoch, entsprechend kann es bei Vorliegen dieser Mutation zu einem vollständigen Wirkungsverlust in der Praxis kommen. Umfangreiche Studien mit G143A-Mutanten belegten die positive Kreuzresistenz aller im Markt befindlicher Strobilurine (Brent & Hollomon, 2007). Diese Mutation hat sich in wenigen Jahren z.B. im Getreideanbau in vielen europäischen Hauptanbaugebieten ausgebreitet,

wie Abb. 4 exemplarisch für den Gerstenmehltau illustriert. Für Rostpilze postulierten Grasso *et al.* (2006), dass Genotypen mit der Mutation G143A und einem bei allen untersuchten Rosterregern identifizierten Intron an Position 143 nicht überlebensfähig seien, da kein Cytochrom *b* Protein mehr synthetisiert werden kann. Resistenzen gegen Strobilurine sind bisher bei Rostpilzen noch nicht gefunden worden.

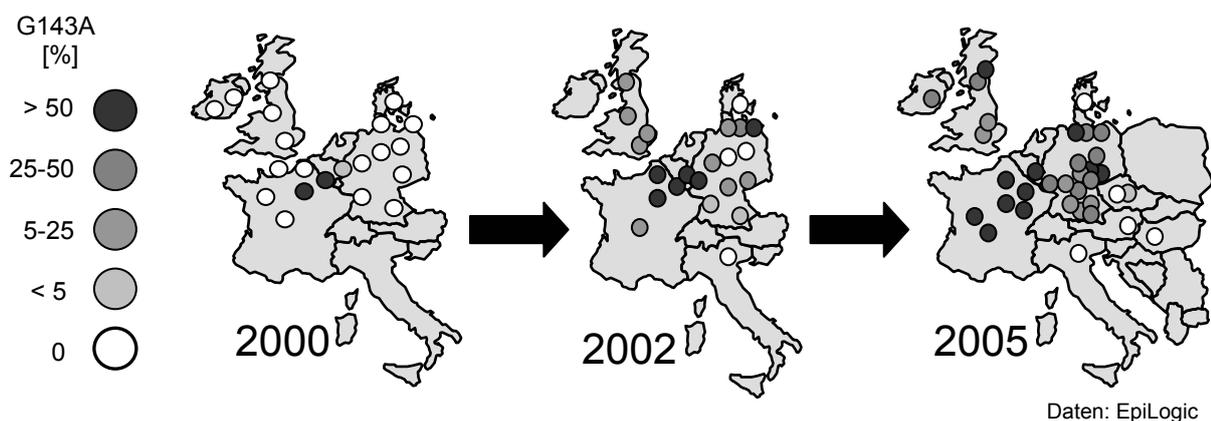


Abb. 4: Sensitivität von Gerstenmehltau, *B. graminis* f.sp. *hordei*, gegenüber QoI-Fungiziden im Langzeitmonitoring in Europa 2000 bis 2005: prozentualer Anteil der Isolate mit Mutation G143A in den untersuchten Regionen, jeder Punkt repräsentiert bis zu 30 Isolate aus der jeweiligen Region

In den letzten Jahren sind zwei weitere Mutationen im Cytochrom *b* Gen identifiziert worden: F129L (Phenylalanin zu Leucin in Position 129) und G137R (Glycin zu Arginin in Position 137). Die Resistenzfaktoren sind deutlich geringer als bei G143A und liegen bei beiden zumeist im Bereich von 5-15, manchmal bis zu 50. Die Bedeutung dieser Mutationen ist für die Praxis geringer, Behandlungen in Mischung mit nicht-kreuzresistenten Wirkstoffen mit der von den Herstellern empfohlenen Aufwandmenge führen meist zu guter Wirksamkeit.

F129L wurde bei *Alternaria solani* (Pasche *et al.*, 2002) und zwei weiteren Pathogenen als einzige Mutation gefunden (*Pythium aphanidermatum*, *Pyrenophora teres*), bei weiteren Schaderregern zusätzlich zur G143A (*P. viticola*, *M. grisea* und *Pyrenophora tritici-repentis*). Bei *P. tritici-repentis* wurde als bisher einzigem Pathogen auch die Mutation G137R nachgewiesen (www.frac.info).

Für Strobilurine sind darüber hinaus weitere Mechanismen beschrieben worden, die allerdings unter praktischen Bedingungen nur eingeschränkte Bedeutung aufweisen. Dazu gehören die Induktion der alternativen Oxidase (Ziogas *et al.*, 1997; Brent & Hollomon, 2003), die allgemeine Erhöhung der Atmungsaktivität (Brand *et al.*, 1993), unspezifische Mechanismen wie erhöhter

Export durch ABC-Transporter-Aktivitäten sowie die Metabolisierung eines spezifischen Strobilurins durch eine pilzliche Esterase.

Aufgrund der monogenetischen Resistenz gegen Strobilurine wurden molekularbiologische Testsysteme entwickelt, die die rasche Analyse zahlreicher Proben ermöglichen. Dadurch konnte die Ausbreitung der Resistenz umfangreich analysiert werden und Schlussfolgerungen über den weiteren Verlauf getroffen werden. Dies ging in die Empfehlungen der Anwendungen von Strobilurinen ein und sicherte eine wirksame Krankheitsbekämpfung in betroffenen und in potentiell zukünftig betroffenen Regionen. Es wurden in Empfehlungen die Anzahl der Anwendungen strobilurinhaltiger Produkte, die Spritzintervalle und die Art der Alternierung oder Mischung mit anderen Wirkstoffen kulturpflanzen-spezifisch begrenzt. Eine typische Empfehlung sieht die Anwendungsbegrenzung auf 30% der Spritzungen bei Anwendung eines Strobilurin-Soloproduktes und auf 50% bei Anwendung als Mischungsprodukt vor (FRAC 2008). Diese Maßnahmen haben dazu beigetragen, die Entwicklung und Ausweitung der Resistenzen zu reduzieren. In vielen Indikationen stellen die Strobilurine weiterhin ein unverzichtbares Element in der Krankheitsbekämpfung dar.

RESISTENZMANAGEMENT IN DER ZUKUNFT

Schadorganismen können Resistenzen entwickeln, Pilze sind aufgrund ihrer meist polyzyklischen Vermehrung mit hoher Reproduktionsrate und ihrer oftmals weiträumigen Ausbreitung besonders prädestiniert. Resistenzmanagement kann und wird nicht das Erscheinen einer Resistenz in der Praxis verhindern, aber es soll deren Ausbreitung verzögern, eine wirksame Krankheitsbekämpfung sicherstellen und entstehenden Schaden minimieren. Schaden entsteht nicht nur kurzfristig in einem Jahr in einer Region, sondern ist auch eine langfristig wirkende Folge durch den Wegfall einer vormals wirksamen Fungizidklasse in einer Indikation. In der Vergangenheit konnte durch Maßnahmen aufgrund gezielter Empfehlungen die Ausweitung und der Wegfall von Wirkstoffgruppen limitiert werden. Die Azole stellen mit ihrer 30 jährigen erfolgreichen Historie ein eindrucksvolles Beispiel dar, die Auswirkungen des dramatischen Wirkungsverlustes der Strobilurine in einigen Segmenten konnten wirksam eingedämmt werden.

Neue Wirkstoffklassen stellen neue Werkzeuge für ein Resistenzmanagement bestehender Wirkstoffe dar und müssen so früh wie möglich hinsichtlich ihres Resistenzrisikos bewertet und in koordinierte Empfehlungen und Maßnahmen eingebettet werden. Entsprechende Anforderungen werden seitens der Registrierbehörden erhoben, im FRAC werden Arbeitsgruppen gegründet, wenn neue Wirkstoffe von zwei oder mehr Firmen in den Markt eingeführt werden. Empfehlungen müssen nach dem aktuellen Erkenntnisstand rasch und flexibel angepasst werden, um den Entwicklungen im Feld Rechnung zu tragen und das Resistenzmanagement zu optimieren. Umfassende Monitoringstudien werden weiterhin essentiell sein, um die Situation im Feld zu analysieren, Veränderungen zu verfolgen und die Auswirkungen von Maßnahmen zu überprüfen.

Forschung an den Resistenzmechanismen wird und muss sich verstärken und das Verständnis für die zugrunde liegenden molekularen Mechanismen verbreitern. Epidemiologische Studien können helfen, die Auswirkungen von Resistenzmanagementkonzepten zu überprüfen. Daraus lassen sich gezieltere Maßnahmen ableiten. Moderne Technologien werden hier unverzichtbare Elemente sein und die Entwicklung vorantreiben, die Erkenntnisse dürfen jedoch nicht losgelöst von der Relevanz in der Praxis bewertet werden. Das Interesse an solchen Aufgabenstellungen sollte sich auch in Zukunft nicht nur auf industrielle Forschungsansätze beschränken.

Eine wesentliche Grundlage aller Maßnahmen ist die Kombination mit Wirkstoffen mit anderen Wirkmechanismen. Ein ausreichend diverses Portfolio von Wirkstoffen und Wirkstoffklassen ist unabdingbar, um den vielfältigen Anforderungen begegnen zu können und, zugeschnitten auf individuelle Situationen in den Kulturen, Lösungsmöglichkeiten zur Verfügung zu haben. Bei der Zusammenstellung bzw. Anwendung von geeigneten Wirkstoffkombinationen, sei es in Mischungen oder in Alternierung, sind die individuellen Eigenschaften der chemischen Wirkstoffe wie z.B. Wirkspektrum, Wirkungseigenschaften wie Systemizität, kurative Wirkung und Wirkungsdauer, zu berücksichtigen. Die Wirkstoffe sollen nicht kreuzresistent sein, sie müssen aber auch über eine ausreichende Wirkung gegenüber dem gleichen Erregerspektrum und oftmals über ähnliche Wirkeigenschaften verfügen, um gegen eine Resistenzselektion wirken zu können. Wesentliche Einschränkungen in der Diversität des Pflanzenschutzmittel- und damit auch des Fungizidportfolios hätten gravierende Auswirkungen auf die Möglichkeiten eines proaktiven Resistenzmanagements. Das Instrumentarium wäre signifikant eingeschränkt und dies führt so auch langfristig zu negativen Auswirkungen auf die landwirtschaftliche Praxis und Produktivität in Europa.

Eine nachhaltige Landwirtschaft bedarf der wirksamen Krankheitsbekämpfung. Gerade im Hinblick auf die beschriebenen Veränderungen im Pflanzenschutz wird ein fundiertes Resistenzmanagement einen wesentlichen Beitrag zum Erhalt der Wirksamkeit des Fungizidportfolios leisten müssen und leisten können.

LITERATUR

- Brent, K J (1982). Case study 4: Powdery mildews of barley and cucumber. In: *Fungicide Resistance in Crop Protection*, eds J Dekker & S G Georgopoulos, Pudoc: Wageningen, 219- 230.
- Brunner P C; Stefanato F L; McDonald B (2008). Evolution of the *CYP51* gene in *Mycosphaerella graminicola*: evidence for intragenic recombination and selective replacement. *Molecular Plant Pathology* **9** (3), 305–316.
- Chin K M; Chavaillaz D; Käsbohrer M; Staub T; and Felsenstein F G (2001). Characterizing resistance risk of *Erysiphe graminis* f.sp. *tritici* to strobilurines. *Crop Protection* **20**, 87-96.

- Cools H J; Fraaije B A; Lucas J A (2005a). Molecular examination of *Septoria tritici* isolates with reduced sensitivities to triazoles. In: *Modern fungicides and anti-fungal compounds IV*, eds Dehne H-W; Gisi U; Kuck K-H; Russell P E; and Lyr H, 103-114. BCPC: Alton, UK.
- Cools H J; Fraaije B A; Lucas J A (2005b). Molecular mechanisms correlated with changes in triazole sensitivity in isolates of *Mycosphaerella graminicola*. *Proceedings of the BCPC International Congress, Crop Science & Technology 2005*, 267-274.
- Dekker J (1981). Impact of fungicide resistance of disease control toxicity. *The BCPC Conference: Pests and Diseases* **3**, 857-863.
- De Waard M A; Groeneweg H.; and van Nistelrooy J G M (1982). Laboratory resistance to fungicides which inhibit ergosterol biosynthesis in *Penicillium italicum*. *Neth J Plant Pathol*, 99-112.
- De Waard M A; Kipp E M C; Horn N M; van Nistelrooy J G M (1986). Variation in sensitivity to fungicides which inhibit ergosterol biosynthesis in wheat powdery mildew. *Netherlands Journal of Plant Pathology* **92**, 21-32.
- De Waard M A (1994). Resistance to fungicides which inhibit sterol 14 α -demethylation, an historical perspective. In: *Fungicide Resistance*, eds Heaney S; Slawson D; Hollomon D W; Smith M; Russell P E; and Parry D W, 3-10. British Crop Protection Council: Farnham, Surrey.
- De Waard M.A; van Nistelrooy J G M; Langeveld C R; van Kan J A; and del Sorbo G (1995). Multidrug resistance in filamentous fungi. In: *Modern Fungicides and Antifungal Compounds, Proceedings 11th International Reinhardsbrunn Symposium, Friedrichroda, Germany*, 293-300
- De Waard M A; Andrade A C; Hayashi K; Schoonbeek H-J; Stergiopoulos I; and Zwiers L-H (2006). Impact of fungal drug transporters on fungicide sensitivity, multidrug resistance and virulence. *Pest Management Science* **62**, 195-207.
- Eckert J W (1982). Case study 5: *Penicillium* decay of citrus fruits. In: *Fungicide Resistance in Crop Protection*, eds Dekker J; and Georgopoulos S G; 231-250. Pudoc: Wageningen.
- Fletcher J S; Wolfe M S (1981). Insensitivity of *Erysiphe graminis* f. sp. *hordei* to triadimefon, triadimenol and other fungicides. *Proceedings of the Brighton Crop Protection Conference, Pests & Diseases*, 633 – 640.
- Fraaije B A; Cools H J; Kim S-H; Motteram J; Clark W S; and Lucas J A (2007). A novel substitution I381V in the sterol 14 α -demethylase (CYP51) of *Mycosphaerella graminicola* is differentially selected by azole fungicides. *Molecular Plant Pathology*, **8**, 245-254
- FRAC (Fungicide Resistance Action Committee) (2007, 2008): www.frac.info . Webseite mit aktuellen Informationen und Empfehlungen.
- Giannopolitis C N (1978). Occurrence of strains of *Cercospora beticola* resistant to triphenyltin fungicides in Greece. *Plant Disease Reporter* **62**: 205-208.

- Gilpatrick J D (1982). Case study 2: *Venturia of pome fruits and Monilinia of stone fruits*. In: *Fungicide Resistance in Crop Protection*, eds Dekker J and Georgopoulos S G. Pudoc: Wageningen, 195-206.
- Grasso V (2005). Characterization of the cytochrome *b* gene in plant pathogenic Basidiomycetes and consequences for QoI resistance. Inauguraldissertation Universität Basel, http://pages.unibas.ch/diss/2005/DabsB_7390.pdf
- Grasso V; Sierotzki H; Garibaldi A; Gisi U (2006): Relatedness Among Agronomically Important Rusts Based on Mitochondrial Cytochrome b Gene and Ribosomal ITS Sequences. *Journal of Phytopathology* **154** (2), 110–118
- Heaney S P; Hall A A; Davies S A; Olaya G (2000). Resistance to fungicides in the QoI-STAR cross resistance group: current perspectives. *Proceedings of the BCPC Conference – Pests & Diseases* 755-762
- Jabs T; Cronshaw K; and Freund; A. (2001): New strobilurin resistance mechanism in apple scab (*Venturia inaequalis*). *Phytopathologie* **31**, 15-16
- Kaku K; Takagaki M; Shimizu T; and Nagayama K (2003). Diagnosis of dehydratase inhibitors in melanin biosynthesis inhibitor (MBI-D) resistance by primer-introduced restriction enzyme analysis in scylatone dehydratase gene of *Magnaporthe grisea*. *Pest Management Science* **59**: 843-846.
- Kato T (1988). Resistance experiences in Japan. In: *Fungicide Resistance in North America*, ed Delp C J, pp. 16-18. American Phytopathological Society: St Paul, Minnesota.
- Kuck K-H; Mehl A (2003). Trifloxystrobin: Resistance Risk and resistance management. *Pflanzenschutz-Nachrichten Bayer* **56**, 313-325.
- Kuck K-H (2005). Fungicide resistance management in a new regulatory environment. In: *Modern fungicides and anti-fungal compounds IV*, eds Dehne H-W; Gisi U; Kuck K-H; Russell P E, and Lyr H, 35-43. BCPC: Alton UK.
- Locke T (1986). Current incidence in the UK of fungicide resistance in pathogens of cereals. *Proceedings 1986 British Crop Protection Conference, Pests & Diseases*, 781-786.
- Lorenz G (1988). Dicarboximide fungicides: history of resistance development and monitoring methods. In: *Fungicide Resistance in North America*, ed. Delp, C J., 45-51. American Phytopathological Society: St Paul, Minnesota.
- Miller T C; Gubler W D (2003). *Uncinula necator* retains high resistance levels to triadimefon in a survey of California populations despite product absence for fourteen years. *Phytopathology* **93**, S113
- Noble M; Maggarvie Q D; Hams A F; and Leaf L L (1966). Resistance to mercury of *Pyrenophora avenae* in Scottish seed oats. *Plant Pathology* **15**, 23-28.
- Pasche J S; Wharam C M; Gudmestad N C (2002). Shift in sensitivity of *Alternaria solani* (potato early blight) to strobilurin fungicides. *Proceedings of the BCPC Conference Pests & Diseases* 841-846

- Pasche J S; Wharam C M; Gudmestad N C (2004). Shift in sensitivity of *Alternaria solani* to QoI fungicides. *Plant Disease* **88**, 181 – 187
- Pasche J S; Wharam C M; Gudmestad N C (2005). Effect of the F129L mutation in *Alternaria solani* on fungicides affecting mitochondrial respiration. *Plant Disease* **89**, 269-278
- Schnabel G; and Jones A L (2000). The 14 α -demethylase (CYP51A1) gene is over expressed in *Venturia inaequalis* strains resistant to myclobutanil. *Phytopathology* **91**,102-110.
- Sierotzki H; Wullschleger J; Gisi U (2000). Point mutation in cytochrome b gene conferring resistance to strobilurin fungicides in *Erysiphe graminis* f. sp. *tritici* field isolates. *Pesticide Biochemistry and Physiology* **68**, 107-112
- Smith C M (1988). History of benzimidazole use and resistance. In: *Fungicide Resistance in North America*, ed. Delp C J, 23-24. American Phytopathological Society: St Paul, Minnesota.
- Stanis V F; Jones A L (1985). Reduced sensitivity to sterol inhibiting fungicides in field isolates of *Venturia inaequalis*. *Phytopathology* **75**, 1098 -1101.
- Staub T (1994). Early experiences with phenylamide resistance and lessons for continued successful use. In: *Fungicide Resistance*, eds. Heaney S; Slawson D; Hollomon D W; Smith M; Russell P E; Parry D W, 131-138. British Crop Protection Council: Farnham, Surrey.
- Ziogas B N; Baldwin B C; and Young J E (1997). Alternative respiration: a biochemical mechanism of resistance to azoxystrobin (ICIA 5504) in *Septoria tritici*. *Pestic. Sci.* **50**, 28-34.

Ganzelmeier H, Nordmeyer H: Innovationen in der Applikationstechnik. In: Tiedemann A v, Heitefuss R, Feldmann F (2008): Pflanzenproduktion im Wandel – Wandel im Pflanzenschutz, ISBN 978-3-941261-00-6; 138-149. © Deutsche Phytomedizinische Gesellschaft, Braunschweig, Germany

Innovationen in der Applikationstechnik

H Ganzelmeier

Julius Kühn-Institut, Institut für Anwendungstechnik im Pflanzenschutz; Messeweg 11-12, 38104 Braunschweig; Email: heinz.ganzelmeier@jki.bund.de

H Nordmeyer

Julius Kühn-Institut, Institut für Pflanzenschutz in Ackerbau und Grünland, Messeweg 11/12, 38104 Braunschweig; Email: henning.nordmeyer@jki.bund.de

ZUSAMMENFASSUNG

Pflanzenschutzgeräte haben sich zu exakt und zuverlässig funktionierenden Geräten entwickelt, die hohe Anforderungen bezüglich Umweltschutz, Anwenderschutz, Arbeitssicherheit, Schlagkraft und Bedienungskomfort erfüllen. Festzustellen ist ein deutlicher Trend hin zu großen Geräten, um den Erfordernissen nach hoher Schlagkraft und überbetrieblichem Einsatz gerecht zu werden. Es ist zu erwarten, dass in Zukunft Precision Farming – teilflächenspezifische statt schlageinheitlicher Behandlung – verstärkt im Pflanzenschutz Eingang findet. GPS- und GIS-Systeme werden zukünftig Erfassung und Dokumentation von Pflanzenschutzmaßnahmen erleichtern. Große leistungsfähige Pflanzenschutzgeräte sind in der Regel mit einer computergesteuerten Regelung der Ausbringungsmenge ausgestattet. Zunehmend verbreitet sind automatische Teilbreitenschaltungen, um Überlappungen oder Fehlstellen zu vermeiden. Aus Gründen des Umweltschutzes ist die Abdriftminderung für den Pflanzenschutz heute von besonderer Relevanz. Abdriftmindernde Injektordüsen sind ein einfaches und sehr wirksames Instrument, um Regelabstände zu Oberflächengewässern und Saumstrukturen zu vermindern, ohne nennenswerte Einbußen an biologischer Wirksamkeit hinnehmen zu müssen. Die Verteilungsqualität bei Feldspritzgeräten ist auch bei großen Auslegerbreiten und höheren Fahrgeschwindigkeiten gewährleistet. Die Geräte verfügen über effektive Einspüleinrichtungen, Reinigungseinrichtungen, Zirkulationssysteme und andere Hilfsmittel, um Punkteinträge an Pflanzenschutzmitteln zu vermeiden. Von der EU-Kommission werden derzeit einschneidende Maßnahmen für einen nachhaltigen Einsatz von Pflanzenschutzmitteln

vorbereitet. Die vorgesehenen Maßnahmen sehen eine Harmonisierung der Prüfung neuer und eine Kontrolle im Gebrauch befindlicher Pflanzenschutzgeräte in den Mitgliedstaaten vor. Für Deutschland ergibt sich hieraus kein wirklicher Nachholbedarf, da diese Prüfungen bereits seit Jahrzehnten praktiziert werden.

EINLEITUNG

Pflanzenschutzgerätehersteller müssen sich heute mit einer Vielzahl an Anforderungen auseinandersetzen, um sowohl den Erfordernissen der landwirtschaftlichen Praxis als auch des Umwelt-, Anwender- und Verbraucherschutzes zu entsprechen. Zusätzlich geht es darum, die Pflanzenschutzarbeiten rationell und bei geringstmöglicher Beschädigung der Bestände durchzuführen.

Der Markt bietet heute ein breites Spektrum an Pflanzenschutzgeräten. Je nach Betriebsgröße und Leistungsanforderungen können die Kunden zwischen kleineren Anbaugeräten, großen bis sehr großen Anhängergeräten und Selbstfahrern wählen.

Bei **Anbaugeräten** werden derzeit meist 21-m-Gestänge verkauft, auf kleineren Betrieben haben aber auch Geräte mit 15 m Arbeitsbreite noch große Marktanteile. Die Anbaugeräte erreichen Arbeitsbreiten bis 28 m und eine Behältergröße von bis zu 1800 Liter (Abb. 1).



Abb. 1: Anbaugerät mit Fronttank zur Frontballastierung und Erhöhung der Schlagkraft (Werkfoto: Amazone)

Obwohl die Behälter kompakt gestaltet sind, benötigen die üblicherweise eingesetzten Traktoren vielfach eine zusätzliche Front-Ballastierung, um bei gefülltem Behälter den Straßenverkehrsvorschriften zu entsprechen.

Bei **Anhängegeräten** dominieren 27-m-Gestänge, die Arbeitsbreiten reichen jedoch inzwischen schon bis an 50 m und die Behältergrößen bis zu 14.000 l. Moderne Anhängegeräte weisen vielfach bauchige, stark gerundete Behälter auf, die wenig flache Bodenbereiche und einen niedrigen Schwerpunkt aufweisen (Abb. 2).



Abb. 2 Anhängegerät mit Achsschenkelenkung für spurtreuen Nachlauf (Werkfoto: Amazone)

Damit wird eine geringe technische Restmenge sichergestellt und auch in Hanglagen eine gute Entleerbarkeit ermöglicht.

Die für den Spritzvorgang relevanten Stellteile, Mess- und Überwachungseinrichtungen sind vom Fahrersitz aus bedienbar und gut ablesbar. Die Düsenschialtung erfolgt in der Regel nach festen Teilbreiten, eine Schaltung von Einzeldüsen-schialtung ist ebenfalls möglich. Zur Erleichterung der Bedienung der Geräte und um Fehlbedienungen zu vermeiden, werden die Bedienelemente zum Befüllen, Entleeren und Reinigen an einer Stelle, bevorzugt auf der linken Geräteseite, in einem so genannten Bedienzentrum zusammengefasst.

Viele Geräte verfügen über ein Zirkulationssystem, das sichergestellt, dass bei Beginn der Spritzung (wichtig bei Wirkstoffwechsel) an allen Düsen sofort die volle Konzentration des Pflanzenschutzmittels zur Verfügung steht. Die Einrichtungen zur Innenreinigung bestehen aus einer oder mehreren Spezialdüsen, die meist an der Oberseite des Behälters angebracht sind. Damit kann eine effektive und wassersparende Vorreinigung des Gerätes bereits auf dem Feld erfolgen und so Punkteinträge vermieden werden.

Anhängegeräte werden im Straßenverkehr zunehmend mit hohen Fahrgeschwindigkeiten bewegt. Die Hersteller bieten Geräte mit bis zu 50 km/h und gefederten Achsen an. Ein spurtreuer Nachlauf kann über Achsschenkelenkung oder eine Knickdeichsel realisiert werden. Anhängergeräte mit Behältergrößen ab 10.000 l werden zur Begrenzung des Bodendrucks mit Tandemachse ausgeführt.

Selbstfahrer werden zwischenzeitlich von nahezu allen namhaften Herstellern angeboten. Die großen Geräte werden mit bis zu 10.000 l Behältergröße, bis 42 m Arbeitsbreite und 3achs-Ausführungen hergestellt (Abb. 3).



Abb. 3: Selbstfahrer mit 10.000 l-Behälter in 3achs-Ausführung

Die Geräte können den Einsatzbedingungen optimal angepasst werden und verfügen über eine vielseitige technische Ausstattung. So erfüllt die Leistungsfähigkeit dieser Geräte (bezüglich Tankgröße, Arbeitsbreite, Fahrgeschwindigkeit) und der Bedienungskomfort (bezüglich Komfortkabine, computergestützte Steuerung und Überwachung nahezu sämtlicher Funktionen) höchste Ansprüche, z. B durch eine Vielzahl von automatisierten Funktionen wie

- Tankbefüllung und Rührwerksabschaltung
- Ein- und Ausschaltung von Teilbreiten
- Gestängeführung mit Regelung der Gestängehöhe und –neigung
- Datenerfassung zur georeferenzierten Datendokumentation
- Reinigung des Gerätes am Ende der Behandlung, u.a.

Von zunehmendem Interesse sind Selbstfahrer mit besonders hoher Bodenfreiheit, wie sie für Pflanzenschutzmaßnahmen im Raps, Sonnenblumen oder Mais gegen den Maiswurzelbohrer

benötigt werden. Das Trägerfahrzeug ist daher prädestiniert für Pflanzenschutz- und Düngemaßnahmen in hohen Kulturen (wie z. B. Mais, Raps, Sonnenblumen ...) und kann optimal an die Wachstumsstadien der Kulturen angepasst werden.

Der Anschaffungspreis dieser Selbstfahrer liegt etwa doppelt so hoch wie der vergleichbarer Anhängergeräte. Doch der fortschreitende Strukturwandel in der Landwirtschaft, die Zunahme des überbetrieblichen Maschineneinsatzes und die zeitliche Enge, in der Pflanzenschutzmaßnahmen durchgeführt werden müssen, unterstützen den Trend zu diesen großen Geräten.

PFLANZENSCHUTZMITTEL SITUATIONSGERECHT ANWENDEN

Für eine nachhaltige, transparente und rückverfolgbare Produktion von Agrarprodukten ist es erforderlich, dass Pflanzenschutzmittel situationsgerecht angewendet werden. Bei einheitlicher Pflanzenschutzmittelapplikation auf einem Ackerschlag ist aufgrund dessen Heterogenität davon auszugehen, dass das notwendige Maß des Pflanzenschutzes auf einzelnen Teilflächen überschritten werden kann, da Unkräuter, Schädlinge und Pflanzenkrankheiten immer heterogen verteilt vorkommen. Die kleinräumigen Verteilungsmuster der Schaderreger bei der Anwendung von Pflanzenschutzmitteln zu berücksichtigen, ist daher eine große Herausforderung. Precision Farming ist ein innovatives, informationsgeleitetes Konzept der pflanzlichen Produktion, das eine räumlich differenzierte, situationsgerechte Anwendung von Pflanzenschutzmitteln ermöglicht. Voraussetzung für Precision Farming im Pflanzenschutz ist, dass geeignete Verfahren zur räumlichen Schaderregererfassung zur Verfügung stehen. Zur Erkennung werden robuste automatische Verfahren mit hoher Flächenleistung benötigt. Verschiedene Systeme sind zur Zeit in der Entwicklung. Für einen Einsatz in der landwirtschaftlichen Praxis ist entscheidend, dass Sensordaten mit Entscheidungsalgorithmen gekoppelt werden und die Steuerung der Feldspritze auf der Grundlage von Schadensschwellen entsprechend erfolgen kann.

Zur teilflächenspezifischen Unkrautbekämpfung sind erste Verfahren in der Praxis im Einsatz (Perderson et al. 2007). Die Unkrauterkenner basiert auf einer raumbezogenen Bilderkennung – und Verarbeitung (z. B. Pflanzenerkennung über Formmerkmale) (Kluge und Nordmeyer 2008, Weiss und Gerhards 2007). Für einen großflächigen Praxiseinsatz müssen die Systeme weiter optimiert und in einer anwenderfreundlichen Software integriert werden.

Die Auswertung umfangreicher europäischer Versuche zur Teilflächenunkrautbekämpfung hat ergeben, dass in 8 untersuchten Kulturen deutliche Herbizideinsparungen möglich waren (EWRS 2005). Bei Winterweizen lag die Einsparung bei durchschnittlich 50 %. Für eine räumlich differenzierte Ausbringung von Pflanzenschutzmitteln eignen sich konventionelle Feldspritzen nur bedingt, da sie bei einer Überfahrt nur die Applikation einer zuvor festgelegten Tankmischung erlauben. Besser geeignet sind Mehrkammerspritzen oder Direkteinspeisungssysteme. Mit diesen Systemen kann gezielt auf Veränderungen des Schaderregervorkommens und deren Bekämpfung mit unterschiedlichen Herbiziden reagiert werden. Hierzu hat es in jüngster Zeit

vielversprechende Weiterentwicklungen (Lechler: VarioInjet; Amazone: PriMix-System) gegeben. Direkteinspeisungssysteme sind besonders bei Online-Verfahren von Bedeutung, da zu Arbeitsbeginn die für den Ackerschlag erforderliche Spritzflüssigkeitsmenge nicht bekannt ist. Sensorgestützte Verfahren sind auch zur indirekten und direkten Erkennung von Pilzkrankheiten in der Entwicklung (Kuckenberget al. 2007, Ehlert et al. 2008, Ehlert und Adamek 2007,). Dabei ist von besonderer Bedeutung, dass eine Krankheit in einem frühen Infektionsstadium erkannt wird (Abb. 4).



Abb. 4: Anhängespritzgerät mit Coptiliter gesteuerter Fungizid/Wachstumsregler-Applikation (Foto: ATB-Potsdam)

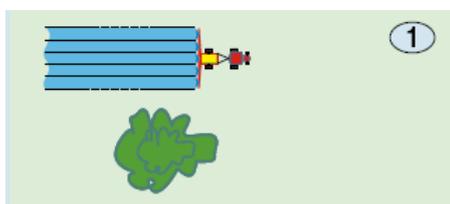
In der Zukunft werden Roboter, die GPS-gesteuert autonom arbeiten an Bedeutung in der Landwirtschaft gewinnen (Blackmore et al. 2005, Sogaard und Lund 2005, Sökefeld et al. 2007). Ihre Aufgabe wird es sein Schaderreger zu erkennen, Applikationsentscheidungen zu treffen und eine Bekämpfung durchzuführen.

Precision Farming im Pflanzenschutz steht im Vergleich zu anderen landwirtschaftlichen Bereichen noch am Anfang seiner Entwicklung. Durch die Weiterentwicklung der Systeme ist zu erwarten, dass in Zukunft feldtaugliche, universelle Erkennungssysteme zur Verfügung stehen. Am Ende der Entwicklungskette steht die automatische Schaderregererkennung mittels Sensoren oder Bildanalyse und die punktgenaue Herbizidapplikation mit Direkteinspeisungssystemen im Online-Verfahren. Aufgrund der vielfältigen Vorteilswirkungen (ökologische und ökonomische) wird erwartet, dass Precision Farming zukünftig zu einer Schlüsseltechnologie in der Pflanzenproduktion wird. Precision Farming ist als nachhaltige landwirtschaftliche Landnutzung zu sehen. Damit können Anforderungen hinsichtlich des Verbraucherschutzes, des Qualitätsmanagements in der Landwirtschaft, der ökologischen Verträglichkeit und der Transparenz der landwirtschaftlichen Produktion erfüllt werden.

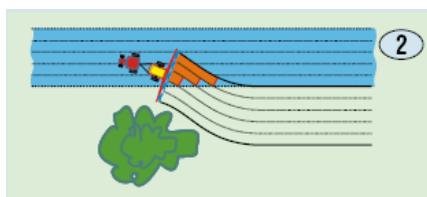
AGRARCOMPUTER FÜR GENAUE DOSIERUNG UND HOHEN BEDIENUNGSKOMFORT

Großgeräte werden heutzutage überwiegend mit Regeleinrichtungen zur Einhaltung einer konstanten Aufwandmenge ausgerüstet. Die Bedienelemente, das Display, der Monitor, der Multifunktionshebel sind je nach Hersteller sehr unterschiedlich gestaltet. Zunehmend achten die Hersteller auf Übersichtlichkeit und einfache Programmierung der Geräte und Hinterleuchtung der Displays und Schalter.

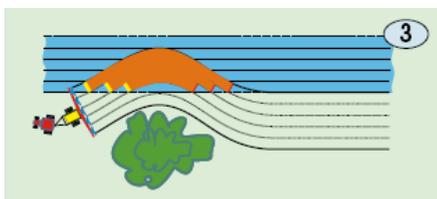
Einige Hersteller bieten eine automatische, DGPS-unterstützte Teilbreitenschaltung an (Abb. 5).



1. Das Feldspritzgerät arbeitet mit 5 Teilbreiten im Feld. Die **ATS** nutzt alle 5 Teilbreiten, da dieser Bereich vorher unbehandelt war.



2. Das Feldspritzgerät fährt bei der nächsten Spur um das Hindernis herum. Die Teilbreiten 5, 4 und 3 werden von **ATS** geschlossen, um eine Doppelbehandlung zu vermeiden.



3. Wenn das Gerät weiter um das Hindernis herumfährt, schaltet **ATS** die Teilbreiten 3, 4 und 5 wieder an, somit werden die bisher unbehandelten Bereiche exakt gespritzt.

Abb. 5 Funktionsweise einer Automatischen Teilbreiten Schaltung (ATS), um Doppelspritzungen und Fehlstellen zu vermeiden (Werkfoto: Hardi)

Das Gerät speichert intern bereits die behandelte Fläche, so dass beim Ausweichen von Hindernissen im Schlag, bei der Behandlung von Keilen oder beim Wenden sich die Teilbreiten automatisch ab- und wieder einschalten und damit Doppelbehandlungen oder Fehlstellen vermieden werden.

Der Trend geht heute hin zu ISO-Bus-fähigen Elektronikausstattungen. Das neue Landwirtschaftliche Bussystem (LBS) bietet für die Zukunft eine einheitliche und geräteübergreifende Schnittstelle zwischen Traktor und Gerät (Henninger 2007). Bereits heute sind Geräte mit dem Bussystem auf dem Markt. Der zukunftsweisende Vorteil liegt in der Nutzung der gemeinsamen Schnittstelle durch mehrere Geräte (Spritze, Düngerstreuer, Güllewagen, Sämaschine) begründet.

Die Entwicklung geht inzwischen weiter in Richtung GPS-unterstützte Applikation inklusiv der Dokumentation schlagbezogener Daten und durchgeführter Pflanzenschutzmaßnahmen. Die Aufzeichnungspflicht ist zwischenzeitlich gesetzlich geregelt (Pflanzenschutzgesetz). Demzufolge besteht die Verpflichtung, den Namen des Anwenders, das Anwendungsdatum, die jeweilige Anwendungsfläche, das Anwendungsgebiet, das verwendete Pflanzenschutzmittel und die Aufwandmenge aufzuzeichnen. Die heutigen Agrarcomputer sind in der Lage, weit mehr als gesetzlich vorgeschrieben, so z. B. im Sekundentakt sämtliche Applikationsparameter (Spritzdruck, Fahrgeschwindigkeit, Aufwandmenge, Windgeschwindigkeit und –richtung ...), bei vorhandener GPS-Antenne auch georeferenziert zu speichern und der Schlagkartei für Dokumentationszwecke und weitere Betrachtungen zur Verfügung zu stellen.

VERFAHREN ZUR EINSPARUNG VON PFLANZENSCHUTZMITTELN

Durch technische Maßnahmen lassen sich bei der Anwendung von Pflanzenschutzmitteln nicht nur die Abdrift vermindern, sondern auch beträchtliche Mengen an Pflanzenschutzmitteln einsparen. Zu nennen sind in erster Linie, Recyclinggeräte für den Wein- und Obstbau, sensorgesteuerte Sprühgeräte mit Lückenerkennung für den Ost- und Weinbau, u.a.. Anhand eines neuen Prüfungsverfahrens des Institutes für Anwendungstechnik kann das Einsparungspotenzial an Pflanzenschutzmitteln für die verschiedensten gerätetechnischen Entwicklungen zuverlässig und nachvollziehbar bestimmt werden.

Im Jahr 2007 konnte auf Grund der vorliegenden Ergebnisse aus den Einsatzprüfungen eine Eintragung von 4 Geräten im Abschnitt „Pflanzenschutzmitteleinsparung“ des Verzeichnisses „Verlustmindernde Geräte“ erfolgen. Damit sind auf Grundlage einer bewährten Prüfmethode Pflanzenschutzmitteleinsparungen bis über 50 % nachgewiesen worden, (Abb. 6).

DÜSEN ERFÜLLEN HÖCHSTE ANSPRÜCHE

Heutzutage ist die Abdriftminderung für den praktischen Pflanzenschutz von besonderer Relevanz, da der für Pflanzenschutzmittel vorgeschriebene Regelabstand zu Oberflächengewässern und Saumstrukturen nur mit abdriftmindernden Pflanzenschutzgeräten (Düsen) vermindert werden kann. Die offiziell als abdriftmindernd eingestuften Geräte sind im Verzeichnis „Verlustmindernde Geräte“ genannt. Das Verzeichnis weist derzeit für den Ackerbau 156 Einträge (Abdriftminderungsklassen 50 %: 74; 75 %: 56; 90 %: 26) auf.

Feldspritzgeräte erreichen die verschiedenen Abdriftminderungsklassen oft allein schon durch die Verwendung grobtropfiger Injektordüsen. Dabei sind i.d.R. auch Verwendungsbestimmungen zu beachten, die z. B. den maximalen Spritzdruck oder den Zielflächenabstand vorschreiben (Schmidt 2007, Knewitz 2008). Auch durch eine zusätzliche Luftunterstützung kann eine

Abdriftminderung erzielt werden, allerdings nur in hohen Beständen. Die aktuellen Eintragungen in das Verzeichnis „Verlustmindernde Geräte“ für Flächen- und Raumkulturen sind im Internet auf der Homepage des Julius Kühn-Instituts (www.jki.bund.de) abrufbar.

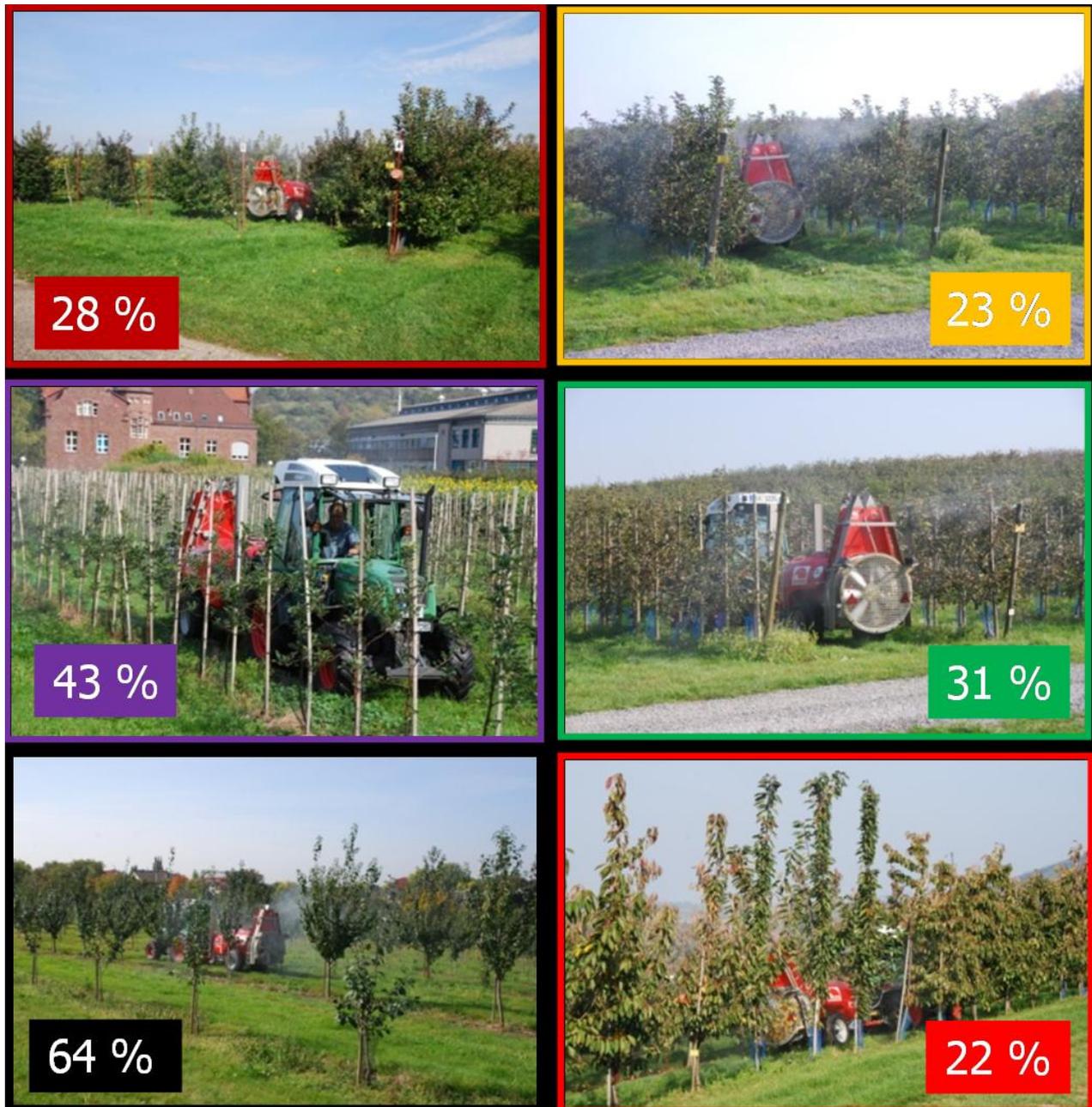


Abb. 6 Einsparungspotenziale an Pflanzenschutzmitteln eines Obstbau-Sprühgerätes mit sensorgesteuerten Düsen (ECO-Reflex, Firma Wanner und Müller Elektronik) zur Lückenschaltung (Fotos: Schmidt, K.)

Bei der Düsenauswahl ist allerdings zu beachten, dass die Abdriftminderung, die Aufwandmenge, der Bedeckungsgrad und die biologische Wirksamkeit des Pflanzenschutzmittels in Abhängigkeit zueinander stehen, (Friessleben 2003, 2004). So hat eine Verminderung des

Flüssigkeitsaufwandes eine geringere Bedeckung auf der Zielfläche zur Folge. Wird ein geringerer Flüssigkeitsaufwand mit einer grobtropfigen, abdriftmindernden Düse realisiert, können so große Lücken im Spritzbelag entstehen, dass kleine Zielobjekte nur noch unzureichend getroffen werden.

Zur Veranschaulichung des Sachverhaltes sind die Spritzbelagsbilder der besonders grob zerstäubenden Düsentypen IDN und TTI denen einer Standardflachstrahldüse bei verschiedenen Aufwandmengen gegenübergestellt (Abb. 7).

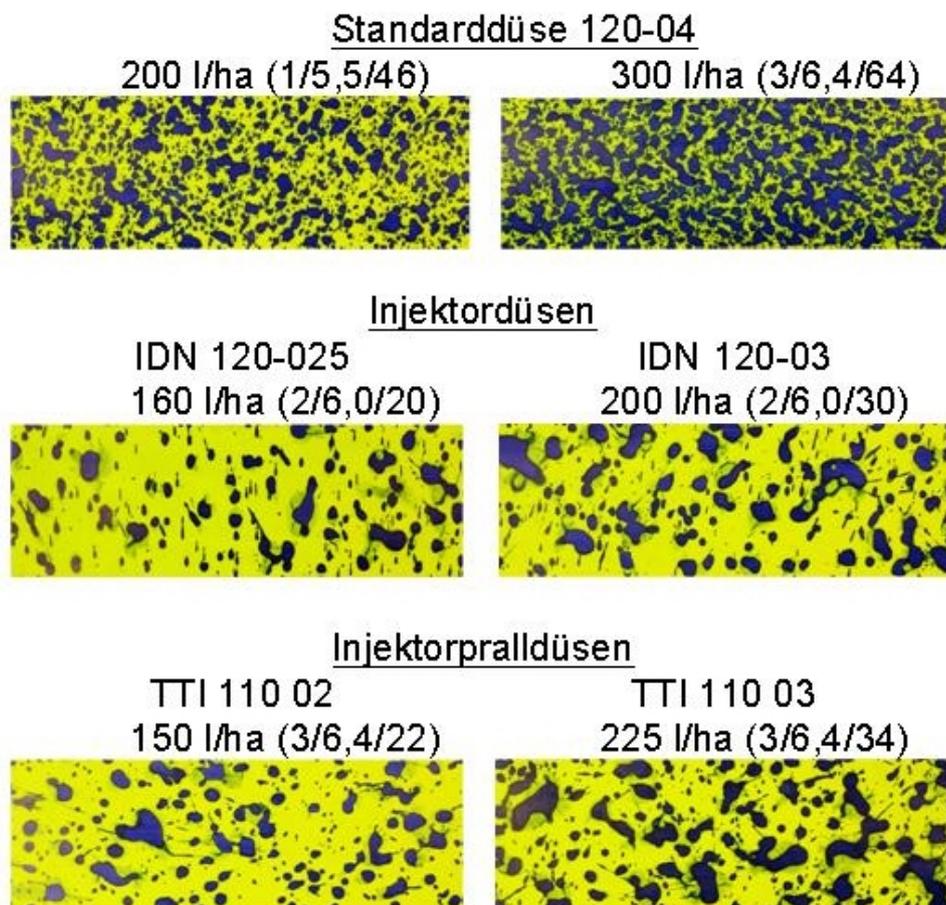


Abb. 7 Spritzbilder von Standard- und Injektordüsen zur Veranschaulichung der düsenspezifischen Belagsstruktur (Fotos: Schmidt, K.). Die Zahlen in Klammern geben den Spritzdruck, die Fahrgeschwindigkeit und den Bedeckungsgrad an.

In Anbetracht der geringen Bedeckungsgrade von nur ca. 20 % bei einer Aufwandmenge von 150 l/ha ist eine weitere Reduzierung des Flüssigkeitsaufwandes aus heutiger Sicht keineswegs zu empfehlen (Schmidt 2007). Seit mehreren Jahren werden hierzu Untersuchungen zur biologischen

Wirksamkeit durchgeführt, bei denen die verschiedenen Düsen, Kulturen und Pflanzenschutzmittel in Betracht gezogen werden (Friessleben 2003, 2004). Inwieweit bei Verwendung von Injektordüsen eine Erhöhung der Fahrgeschwindigkeit zur Steigerung der Schlagkraft beitragen kann ohne mit Minderwirkung und mehr Abdrift rechnen zu müssen, wird derzeit bundesweit von mehreren Versuchsanstellern untersucht.

Neu auf dem Markt ist die TurboDropVR-Düse, die sich für einen sehr viel größeren Aufwandmengenbereich, als dies von den bisherigen Düsen bekannt ist, eignen (100 bis 400 l/ha). Ebenso neu ist die HighSpeed-Düse, eine Doppelflachstrahldüse mit asymmetrischem Spritzwinkel. Die Tropfen erhalten hierbei auch bei einer hohen Fahrgeschwindigkeit eine höhere vertikale Fluggeschwindigkeit, welche zu einer günstigen Anlagerung an der Pflanze führen soll. Für die beiden neuen Düsen liegen allerdings noch keine Ergebnisse zu den Verteilungs- und Abdrifteigenschaften sowie aus der Praxis vor (Hörner, 2008).

SPRITZGESTÄNGE MIT NUR GERINGER DYNAMIK

Bei Anbaugeräten erfolgt die Klappung der Gestänge bevorzugt als Paket (horizontal oder vertikal), da die Seitenklappung teilweise zu Problemen mit der Kabine führen kann. Bei Anhängengeräten nehmen die Auslegerbreiten weiterhin deutlich zu. Die hydraulische Klappung ist mittlerweile Standard. Vielfach hat man die Wahl zwischen seitlicher und Paketklappung.

Große Auswirkungen auf die Verteilungsqualität haben horizontale Gestängebewegungen. Dabei kommt es vor allem auf die Schwinggeschwindigkeit der Gestängebewegungen an (Herbst und Hörner 2003, 2006, Herbst und Wolf 2001). Deshalb haben die Hersteller dieser Geräte ihre Gestängeausführungen auch horizontal pendelnd ausgeführt und mit entsprechenden Feder- und Dämpferelementen versehen. Mittels eines einfachen Tests kann das Verhalten des Gestänges abgeschätzt werden.

Untersuchungen der Auslegeraufhängungen am JKI haben ergeben, dass die Gestänge unter praktischen Einsatzbedingungen in der Regel eine recht gute Längsverteilung liefern. Anhängengeräte schneiden bei diesem Vergleich eindeutig besser ab als Anbaugeräte.

LITERATURVERZEICHNIS

- Blackmore, S., Stout, B., Wang, M., Runov, B.: Robotic agriculture – the future of agricultural mechanisation? In: Stafford, Precision Agriculture '05 (2005), S. 621 – 628.
- Ehlert, D., Jürschik, P., Otter-Nacke, S.: Crop-Meter mit technischen Verbesserungen. Landtechnik (2008), 63, H. 1, S. 26 u. 27.

- Ehlert, D.; Adamek, R.: Messeigenschaften von Laser-Abstandssensoren. *Agricultural Engineering Research* (2007), 13, S. 119 – 128.
- EWRS 2005: Site Specific Weed Management. www.ewrs-sswm.org
- Friessleben, R.: Balancing drift management with biological performance and efficacy. In: *Proceedings of the International Conference on Pesticide Application for Drift Management*, October 27 -29 2004, Hawaii, S. 72 – 79.
- Friessleben, R.: Zusammenfassende Auswertung von Versuchen zur biologischen Wirksamkeit von Pflanzenschutzmitteln im Apfelanbau bei grobtropfiger Applikation. *Gesunde Pflanze* (2003), 55, H. 3, S. 77 -84.
- Henninger, G.: ISO-Bus – die Zukunft hat längst begonnen. *Landtechnik* (2007), 62, H. 4, S. 206 – 207 u. 233.
- Herbst, A., Hörner, G.: Anhängespritzen: Drei neue im Vergleich. *TOP Agrar* (2006), H. 3, S. 118 – 120.
- Herbst, A., Hörner, G.: Fünf moderne Anhängespritzen im Test. *TOP Agrar* (2003), H. 2, S. 90 – 93.
- Herbst, A., Wolf, P.: Spray deposit distribution from agricultural boom sprayers in dynamic conditions. *ASAE Paper No. 01-1054*. St. Joseph, Mich., 2001.
- Hörner, G.: Mehr Schlagkraft mit höherem Risiko. *TOP Agrar* (2008), H. 3, S. 108 – 112.
- Kluge, A., Nordmeyer, H.: Identification von *Galium aparine* mit Hilfe der digitalen Bildverarbeitung in Winterweizen. *Journal of Plant Diseases and Protection. Special Issue XXI* (2008), S. 137 – 142.
- Knewitz, H.: Der Weg zur richtigen Düse. *Getreide Magazin* (2008), 13, H. 1, S. 40 – 45.
- Kuckenbergh, J., Tartachnyk, I.; Schmitz-Eiberger, M., Noga, G.: Early detection of leaf rust and powdery mildew infections on wheat leaves by PAM fluorescence imaging. In: *Stafford, Precision Agriculture '07* (2007), S. 515 – 521.
- Perdersen, S. M., Fountas, S., Blackmore, S.: Economic potential of robots for high value crops and landscape treatment. In: *Stafford, Precision Agriculture '07* (2007), S. 457 – 464.
- Schmidt, K.: Aktuelle Düsentechnik für Feldspritzgeräte. *Die Zuckerrübenzeitung* (2007), 47, H. 2, S. 16 – 17.
- Sogaard, H. T.; Lund, I. 2005: Investigation of the accuracy of a machine vision based robotic micro-spray system. In: *Stafford, Precision Agriculture '05* (2005), S. 613 – 619.
- Sökefeld, M., Gerhards, R., Oebel, H., Therburg, R. D.: Image acquisition for weed detection and identification by digital image analysis. In: *Stafford, Precision Agriculture '07* (2007), S. 523 – 528.
- Weiss, M., Gerhards, R.: Feature extraction for the identification of weed species in digital images for the purpose of site-specific weed control. In: *Stafford, Precision Agriculture '07* (2007), S. 537 – 543.

Jörg E, Bartels M: Ökonomischer und gezielter Einsatz von Pflanzenschutzmitteln. In: Tiedemann A v, Heitefuss R, Feldmann F (2008): Pflanzenproduktion im Wandel – Wandel im Pflanzenschutz, ISBN 978-3-941261-00-6; 150-164. © Deutsche Phytomedizinische Gesellschaft, Braunschweig, Germany

Ökonomischer und gezielter Einsatz von Pflanzenschutzmitteln

E Jörg

Dienstleistungszentrum Ländlicher Raum Rheinhessen-Nahe-Hunsrück/ZEPP, Rüdesheimer Str. 60-68, Bad Kreuznach; Email: erich.joerg@dlr.rlp.de

M Bartels

Landwirtschaftskammer Niedersachsen, Bezirksstelle Northeim, Wallstraße 44
37154 Northeim; Email: bartels.manfred@lwk-niedersachsen.de

Zusammenfassung

Die Prognosemöglichkeiten und Modelle für einen gezielten Pflanzenschutz sind im letzten Jahrzehnt deutlich verbessert und erweitert worden. In Verbindung mit empirischem Wissen und herkömmlichen Methoden zur Befallsfeststellung wird ein gezielter Einsatz von Pflanzenschutzmitteln ermöglicht. Pflanzenschutzmitteleinsätze können damit auf das notwendige Maß beschränkt und Behandlungstermine optimiert werden. Für wichtige Schaderreger wurden komplexe Entscheidungshilfesysteme entwickelt. Für deren Entwicklung und den Praxisbetrieb steht eine in Europa beispiellose Infrastruktur zur Verfügung bereit. Fortschritte in der Informationstechnologie ermöglichen die schnelle Verarbeitung großer Datenmengen und die Berücksichtigung zahlreicher Einflussfaktoren bei der Entscheidungsfindung im Pflanzenschutz. Trotz des hohen Komplexitätsgrades sind die Entscheidungshilfen leicht handhabbar. Sie sind mittlerweile sehr wichtige Werkzeuge in der Hand des Pflanzenschutzberaters, und ihre Akzeptanz in der Praxis steigt.

Sich ständig ändernde Rahmenbedingungen für die Pflanzenproduktion erfordern ein permanentes Anpassen der Verfahren und Modelle. Neben der Entwicklung von Modellen und Entscheidungshilfen für bisher noch nicht bearbeitete Schaderreger werden zukünftig die Schwerpunkte der Arbeiten zum gezielten Pflanzenschutzmitteleinsatz auf der Verbesserung der Wetterdatenversorgung der Modelle, der Erfassung des Inokulums bzw. der Abbildung pflanzenbaulicher Rahmenbedingungen, der Entwicklung von Sorten – und Fungizidmodulen und synoptischer Entscheidungshilfesysteme sowie der stärkeren Einbeziehung ökonomischer Aspekte des Pflanzenschutzes liegen.

EINLEITUNG

Die jüngsten Entwicklungen auf den Agrarmärkten haben die Frage der optimalen spezifischen Intensität wieder neu belebt. Die gestiegenen Erzeugerpreise lassen eine weitere Erhöhung der Intensität und Einengung der Fruchtfolgen erwarten. Dies wird auch den Pflanzenschutz vor neue, vermutlich erhöhte Herausforderungen stellen. Neben dem Witterungsverlauf spielen Fruchtfolge, Bodenbearbeitung, Aussattermin und Sorte eine entscheidende Rolle für die Stärke des Schaderregerauftretens. Die genannten acker- und pflanzenbaulichen Faktoren können in Konzepten des Integrierten Pflanzenschutzes zur Minderung der Schadenswahrscheinlichkeit genutzt werden. Wenn trotz vorbeugender Maßnahmen eine Behandlung erforderlich wird, können Prognoseverfahren für den gezielten Einsatz von Pflanzenschutzmitteln ein entscheidendes Instrument für den effizienten Pflanzenschutz sein. Der mögliche Stellenwert von Prognoseverfahren in Bezug auf die sich abzeichnenden erhöhten Anforderungen im Pflanzenschutz in den kommenden Jahren soll in diesem Beitrag behandelt werden.

PROGNOSEVERFAHREN UND EDV – GESTÜTZTE ENTSCHEIDUNGSHILFEN

Der integrierte Pflanzenschutz erschöpft sich nicht in gemeinsamen Betrachtungen von Ackerbau und Pflanzenschutz. Er umfasst auch die herkömmlichen Möglichkeiten der Befallsfeststellung und Beobachtung von Schaderregerpopulationen. Dazu gehören auch die in den letzten Jahrzehnten entwickelten Prognoseverfahren. Sie sind zusätzliche Entscheidungshilfen, die in der Hand erfahrener Berater und Landwirte zur Festlegung und Terminierung von Behandlungen herangezogen werden können.

Durch umfangreiche Arbeiten der „Zentralstelle der Länder für EDV – gestützte Entscheidungshilfen und Programme im Pflanzenschutz“ (ZEPP) und vieler wissenschaftlicher Institute ist ein System von Prognoseverfahren und Entscheidungshilfen entstanden, das bei konsequenter Anwendung in erheblichem Maße zum gezielten Pflanzenschutz beiträgt. Allerdings sollte dabei nicht vergessen werden, dass aufgrund der Komplexität vieler Krankheiten und wegen der nach wie vor recht unsicheren mittel- bis langfristigen Wettervorhersage auch die besten Systeme nur partiell zur Entscheidungsfindung beitragen können. Es handelt sich bei allen Wirt-Parasit-Beziehungen immer um biologische Vorgänge, die unter extremen Bedingungen auch mal anders verlaufen als im Regelfall.

PROGNOSEVERFAHREN

Prognoseverfahren sind seit längerer Zeit in der Landwirtschaft verbreitet. Sie haben sich bewährt, wurden in den letzten beiden Jahrzehnten, unter Einsatz des wissenschaftlichen Instrumentariums der Epidemiologie, permanent weiterentwickelt, und sind mittlerweile zentrale Elemente des Integrierten Pflanzenschutzes bei der gezielten Steuerung des Einsatzes von

Pflanzenschutzmitteln. Es war ein langer Weg von den ersten „Bauernregeln“ über experimentell belegte Konditionalprognosen und einfachen Prognosemodellen hin zu hochkomplexen, wetterbasierten und computergestützten Entscheidungshilfen.

Die Grundlagen für die Arbeiten zu Prognoseverfahren wurden in der universitären, epidemiologischen Forschung der sechziger bis achtziger Jahre gelegt. Einen entscheidenden Impuls erfuhr die Arbeit mit Prognosen durch das vom Bundeslandwirtschaftsministerium und den Pflanzenschutzdiensten fast aller Bundesländer geförderten Modellvorhaben PASO von 1993 bis 1997 (Kleinhenz und Jörg, 1998). Hier wurden eine Infrastruktur für den Betrieb von EDV - gestützten Verfahren geschaffen, alle verfügbaren Modelle inventarisiert, Methoden zur Modellvalidierung erprobt und die geeigneten Modelle in die Praxis eingeführt. Im Anschluss an das erfolgreiche Modellvorhaben wurde die Erarbeitung von Prognosemodellen und Entscheidungshilfen als zentrale Aufgabe der Pflanzenschutzdienste priorisiert und zu deren Erledigung die gemeinsam finanzierte ZEPP gegründet, mit deren Betrieb das Land Rheinland – Pfalz beauftragt wurde (Kleinhenz et al., 1998).

Voraussetzung eines gezielten Einsatzes von Pflanzenschutzmitteln ist die Beantwortung der Fragen: „Muss ich bekämpfen?“ und „Wann muss ich bekämpfen?“. Zur Beantwortung der ersten Frage stehen seit längerer Zeit als Hilfsmittel Konditionalprognosen bzw. Bekämpfungsschwellenwerte oder Bekämpfungsschwellensysteme zur Verfügung. Die zweite Frage nach dem Zeitpunkt der Bekämpfung lässt sich auch durch Anwendung von Bekämpfungsschwellen beantworten: bei Überschreitung der geltenden Bekämpfungsschwellenwerte.

Buhl und Schütte haben zahlreiche Prognoseverfahren basierend auf Schwellenwerten und Konditionalprognosen zusammengestellt, die allerdings nur sehr begrenzt Eingang in die Praxis fanden (Buhl und Schütte, 1971). Dagegen stellen andere, von Pflanzenschutzexperten auf regionaler Basis entwickelte Konditionalprognosen die Basisstrategie für die Bekämpfung wichtiger Schaderreger dar.

Einige bedeutende Pflanzenkrankheiten sind gekennzeichnet durch einen sehr schnellen Epidemieverlauf bei günstiger Witterung, z.B. *Venturia inaequalis*, *Phytophthora infestans*, *Peronospora tabacina*. Diese Pilzkrankheitserreger verursachen einen so hohen ökonomischen Schaden, dass beim ersten Auftreten bzw. sofern günstige Infektionsbedingungen herrschen, ein Fungizideinsatz erfolgen muss. Gleiches gilt für Schaderreger mit hohem Inokulumpotenzial in Dauerkulturen, Monokulturen oder sehr engen Fruchtfolgen, bei denen wenige Infektionsereignisse bereits eine starke Epidemie verursachen. Zukünftig werden diese Schaderreger aufgrund der sich weiter einengenden Fruchtfolgen größere Bedeutung erlangen.

Eine effiziente Bekämpfungsstrategie gegen diese Schaderreger basiert auf der Beantwortung der Fragen: „Wann tritt ein Schaderreger auf?“ bzw. „Wann herrschen sehr günstige

Infektionsbedingungen?“ Prognoseverfahren müssen hierzu Wetterdaten analysieren und bewerten, um den Termin des Erstauftretens zu prognostizieren bzw. ein hohes Infektionsrisiko (Infektionsdruck) zu signalisieren („wettergestützte Konditionalprognose“). Sehr erfolgreich war beispielsweise die Negativ-Prognose für die Kraut- und Knollenfäule der Kartoffel (Ullrich und Schrödter, 1966).

Mittlerweile existieren zahlreiche „Erstauftretensmodelle“ bzw. „Infektionsdruckmodelle“ für wichtige Pilzkrankheiten. Einen Überblick gibt Tabelle 1. Eingang in die Praxis fanden im Getreidebau die Signalisation des Infektionsrisikos von Pilzkrankheiten durch ein Modell der Fa. pro_Plant, die Prognose des Erstauftretens von *Cercospora beticola* mit CERCBET1 (Roßberg et al., 2000), Blauschimmel mit SIMPEROTA1 (Racca et al, 2007) bzw. für Krautfäule mit den Modellen SIMPHYT1 und SIMBLIGHT1 (Kleinhenz et al., 2007).

Tabelle 1 Überblick über EDV – gestützte Entscheidungshilfen im Pflanzenschutz (ZEPP)

Modell	Schaderreger	Kultur ¹⁾	Leistung	Status ²⁾
Ackerbau				
SIMCERC3	Parasitärer Halmbruch	WW, WR, WT	schlagspezifische Bekämpfungentscheidung	PM
SIMERY	Echter Mehltau	WW, WG	Simulation Epidemie	WM
SIMSEPT	<i>Septoria tritici</i> , <i>S. nodorum</i>	WW	Infektionsereignisse, Simulation Epidemie	E
FUS – OPT	<i>Fusarium</i> <i>graminearum</i>	WW	schlagspezifische Bekämpfungentscheidung	E
PUCREC/PUCTRI	Braunrost	WR, WW	Erstauftreten, Simulation Epidemie schlagspezifische Bekämpfungentscheidung	PM
SIG - Getreide	mehrere Pilzkrankheiten	WW, WR, WG, WT, SG	Infektionsereignisse, schlagspezifische Bekämpfungentscheidung	E
SIMLAUS	<i>Sitobion avenae</i> , <i>Rhopalo-siphum</i> <i>padi</i> , <i>R. maidis</i>	WW, WG	Simulation Populationsentwicklung, Prognose Anholozyklus	PM
SIMSIT/GT- LAUS	<i>Sitobion avenae</i>	WW	Simulation Populationsentwicklung	WM
LAUSMIG	Blattlaus - Arten	Wintergetreide - Arten	Prognose Immigration	E

Tabelle 1 (Fortsetzung) Überblick über EDV – gestützte Entscheidungshilfen im Pflanzenschutz (ZEPP)

SIMONTO	<u>Ontogenese</u>	WW, WR, Winterraps	WG, WT,	schlagspezifische Simulation der Bestandesentwicklung	PM, E
SIMPHYT1	Kraut- und Knollenfäule	Kartoffel		Erstauftreten	PM
SIMPHYT2	Kraut- und Knollenfäule	Kartoffel		Simulation Epidemie; Fungizidstrategie	WM
SIMPHYT3	Kraut- und Knollenfäule	Kartoffel		schlagspezifische Bekämpfungsentscheidung; Fungizidstrategie	PM
SIMBLIGHT1	Kraut- und Knollenfäule	Kartoffel		Erstauftreten	PM
ÖKO-SIMPHYT	Kraut- und Knollenfäule	Kartoffel		Fungizidstrategie Kupfereinsatz	PM
FOLPHY	Kraut- und Knollenfäule	Kartoffel		Erstauftreten unter Folie	PM
SIMLEP3	Kartoffelkäfer	Kartoffel		schlagspezifische Bekämpfungsentscheidung	PM
SIMLEP - Start	Kartoffelkäfer	Kartoffel		Erstauftreten	E
CERCLET1	<i>Cercospora beticola</i>	Zuckerrübe		Erstauftreten	PM
CERCLET2	<i>Cercospora beticola</i>	Zuckerrübe		Simulation Epidemie, schlagspezifische Bekämpfungsentscheidung	WM
CERCLET3	<i>Cercospora beticola</i>	Zuckerrübe		schlagspezifische Bekämpfungsentscheidung; Fungizidstrategie	PM
ERYLET1	Rübenmehltau	Zuckerrübe		Erstauftreten	E
ERYLET3	Rübenmehltau	Zuckerrübe		schlagspezifische Bekämpfungsentscheidung	E
UROLET1	Rübenrost	Zuckerrübe		Erstauftreten	E
UROLET3	Rübenrost	Zuckerrübe		schlagspezifische Bekämpfungsentscheidung	E
SKLERO – PRO	Rapskrebs	Winterraps		schlagspezifische Bekämpfungsentscheidung	PM
SIMPEROTA1	Blauschimmel	Tabak		Erstauftreten	PM
SIMPEROTA3	Blauschimmel	Tabak		schlagspezifische Bekämpfungsentscheidung; Fungizidstrategie	PM
SIMCOL1	Anthraknose	Lupine		Erstauftreten	E
SIMCOL3	Anthraknose	Lupine		schlagspezifische Bekämpfungsentscheidung	E

Tabelle 1 (Fortsetzung) Überblick über EDV – gestützte Entscheidungshilfen im Pflanzenschutz (ZEPP)

Gartenbau				
BBA - DELANT	Zwiebelfliege	Zwiebeln, Schnittlauch	Terminierung Insektizideinsatz	PM
BBA – PSILA	Möhrenfliege	Möhren, Sellerie	Terminierung Insektizideinsatz	PM
BBA – DELIA	Kohlfliege	Kohl - Arten	Terminierung Insektizideinsatz	PM
ZWIPERO	Falscher Mehltau	Zwiebeln	schlagspezifische Bekämpfungs-entscheidung	PM
POMSUM	Verschiedene Schädlinge	Apfel	Terminierung Insektizideinsatz	PM
HOPLOSUM	Apfelsägewespe	Apfel	Terminierung Insektizideinsatz	PM
FEUERBRA	Feuerbrand	Kernobst	schlagspezifische Bekämpfungsentscheidung	PM
ANLAFBRA	Feuerbrand	Kernobst	schlagspezifische Bekämpfungsentscheidung	PM
MONTA	<i>Monilia</i> - Arten, <i>Taphrina</i> <i>deformans</i>	Steinobst, Pflirsich	schlagspezifische Bekämpfungsentscheidung	E, PM

1) WW = Winterweizen; WG = Wintergerste; WR = Winterroggen; WT = Wintertriticale; SG = Sommergerste 2)
PM = Praxis-Modell; WM = wissenschaftliches Modell; E = Modell in der Entwicklung

ENTWICKLUNG VON PROGNOSEVERFAHREN ZU ENTSCHEIDUNGSMODELLEN

Der erfolgreiche Einsatz der Prognoseverfahren erhöhte die Nachfrage nach weiteren bzw. leistungsfähigeren Modellen. Zum einen forderten die Modellnutzer Prognosen für andere wichtige Pflanzenkrankheiten. Zum anderen sollten weitere Faktoren in die Entscheidung über Pflanzenschutzmitteleinsätze einbezogen werden. Ein weiteres wesentliches Ziel war die Reduktion des Zeitbedarfes für Felderhebungen, um zu ermitteln, ob eine Behandlung erforderlich ist. Typische Fragestellungen, die in diesem Zusammenhang beantwortet werden mussten, lauteten jetzt: „Wann ist die Bekämpfungsschwelle überschritten?“ bzw. „Wann ist auf einem bestimmten Schlag die Bekämpfungsschwelle überschritten?“.

Die Beantwortung dieser Fragen setzt die Verfügbarkeit von Simulationsmodellen voraus, die den Verlauf einer Epidemie berechnen. Durch den Vergleich der berechneten Befallswerte mit Schwellenwerten wird der Zeitpunkt bestimmt, wann eine Behandlung erfolgen muss. Neben der Witterung beeinflussen pflanzenbauliche Faktoren (Fruchtfolge, N-Düngungsniveau, Anbauverhältnisse, Art der Bodenbearbeitung) in erheblichem Maße die Epidemieverläufe. Soll eine schlagspezifische Bekämpfungsentscheidung getroffen werden, sind diese Einflussfaktoren im Modell abzubilden. Erweiterte Entscheidungsmodelle integrieren epidemiologische Simulationsmodelle, pflanzenbauliche Einflussfaktoren und Bekämpfungsschwellen/-systeme.

Die in der Praxis verbreitetsten Entscheidungsmodelle sind SIMPHYT3 (Gutsche, 1999) und SIMCERC3 (Weinert et al., 2004).

SIMCERC3 ist ein schlagspezifisches Entscheidungsmodell zur Bekämpfung des Parasitären Halmbruchs (*Pseudocercospora herpotrichoides*). Das Modell simuliert den Verlauf der Infektion durch *P. herpotrichoides* im Herbst, Winter und Frühjahr bis zum Zweiknotenstadium. Es stellt dann eine Prognose über den Halmbruchbefall zur Milchreife, unter Berücksichtigung von Vorfrüchten, N-Düngung und Aussattermin. SIMCERC3 vergleicht den prognostizierten Befallswert mit zwei Schwellenwerten und entscheidet, ob a) in BBCH 32 Halmbruch gezielt zu bekämpfen ist, oder b) bei der Blattkrankheitsbekämpfung bis zum Stadium BBCH 37-39 „mitbekämpft“ werden sollte, oder ob c) eine Bekämpfung nicht erforderlich ist.

SIMPHYT3 plant ab der ersten Behandlung die komplette Fungizidstrategie zur Bekämpfung der Kraut- und Knollenfäule der Kartoffel. SIMPHYT3 simuliert den wetterbedingten Infektionsdruckverlauf bis zum aktuellen Tag. Hieraus berechnet das Modell unter Einbeziehung schlagspezifischer Faktoren (Sortenanfälligkeit, Intensität des Krautwachstums, bisher verwendete Fungizide, Niederschlag seit der letzten Behandlung) die Länge der Intervalle zwischen den Fungizideinsätzen.

Andere erweiterte Entscheidungsmodelle sind PUCREC3/PUCTRI3 (Räder et al., 2007), zur Braunrostbekämpfung in Winterweizen/-roggen, SKLERO-PRO (Koch und von Tiedemann, 2007) zur Sclerotinia-Bekämpfung in Raps, SIMPEROTA3, zur Bekämpfung des Blauschimmels an Tabak (Racca et al., 2007), und ZWIPERO (Leinhos et al., 2006), zur Bekämpfung des Falschen Mehltaus in Zwiebeln (s. Tab. 1).

KOMPLEXE, MODULARE ENTSCHEIDUNGSMODELLE / ENTSCHEIDUNGSHILFESYSTEME

Die jüngste Generation von Entscheidungsmodellen ist gekennzeichnet durch hohe Komplexität und modularen Aufbau. Angestrebt wird die maximale Nutzung des Wissens über die Interaktionen zwischen Wetter, Krankheitserreger, Wirtspflanze und Pflanzenschutzmitteln. Das bedeutet, dass neben der Abbildung des Wettereinflusses auf den Epidemieverlauf, auch der Befallsverlauf in Abhängigkeit von der Wirtspflanzenanfälligkeit (Sortenresistenzen) und der Wirkung der eingesetzten Fungizide zu simulieren ist, bevor Überschreitungen von Schwellenwerten berechnet werden können.

CERCBET3, ein schlagspezifisches Modell zur Optimierung der Bekämpfung der Blattfleckenkrankheit *Cercospora beticola* in Zuckerrüben (Racca und Jörg, 2007) ist das bisher komplexeste Entscheidungsmodell. Kern von CERCBET3 ist ein Simulationsmodell, das den Befallshäufigkeitsverlauf von *C. beticola* simuliert. Abgebildete epidemiologische Parameter und Prozesse sind Inkubationszeit bzw. Infektion und Sporulation. Die Wirkung pflanzenbaulicher Einflussgrößen (Zuckerrüben-Anbauverhältnis in der Schlagumgebung, Fruchtfolge, Beregnung) sind faktoriell im Modell abgebildet. CERCBET3 beinhaltet auch ein Modul, das den Einfluss der

Sortenresistenz auf die Ausbreitung der Krankheit simuliert. Entscheidend sind hier die Sortenunterschiede bezüglich der Sporulation. Ein weiteres Modul simuliert die Fungizidwirkungen in Abhängigkeit von Temperatur und Niederschlag. CERC BET3 vergleicht die simulierten Befallshäufigkeiten mit den Schwellenwerten eines zeitlich gestaffelten Bekämpfungsschwellensystems. Als Startwert benötigt das Modell einen Boniturwert der Befallshäufigkeit zu Befallsbeginn. Ersatzweise kann dieser Wert auch aus dem Modell zum Erstauftreten von *C. beticola*, CERC BET1, abgeleitet werden. Mit CERC BET3 ist die gesamte Fungizidstrategie im Zeitraum von Juni bis September planbar (Abb. 1).

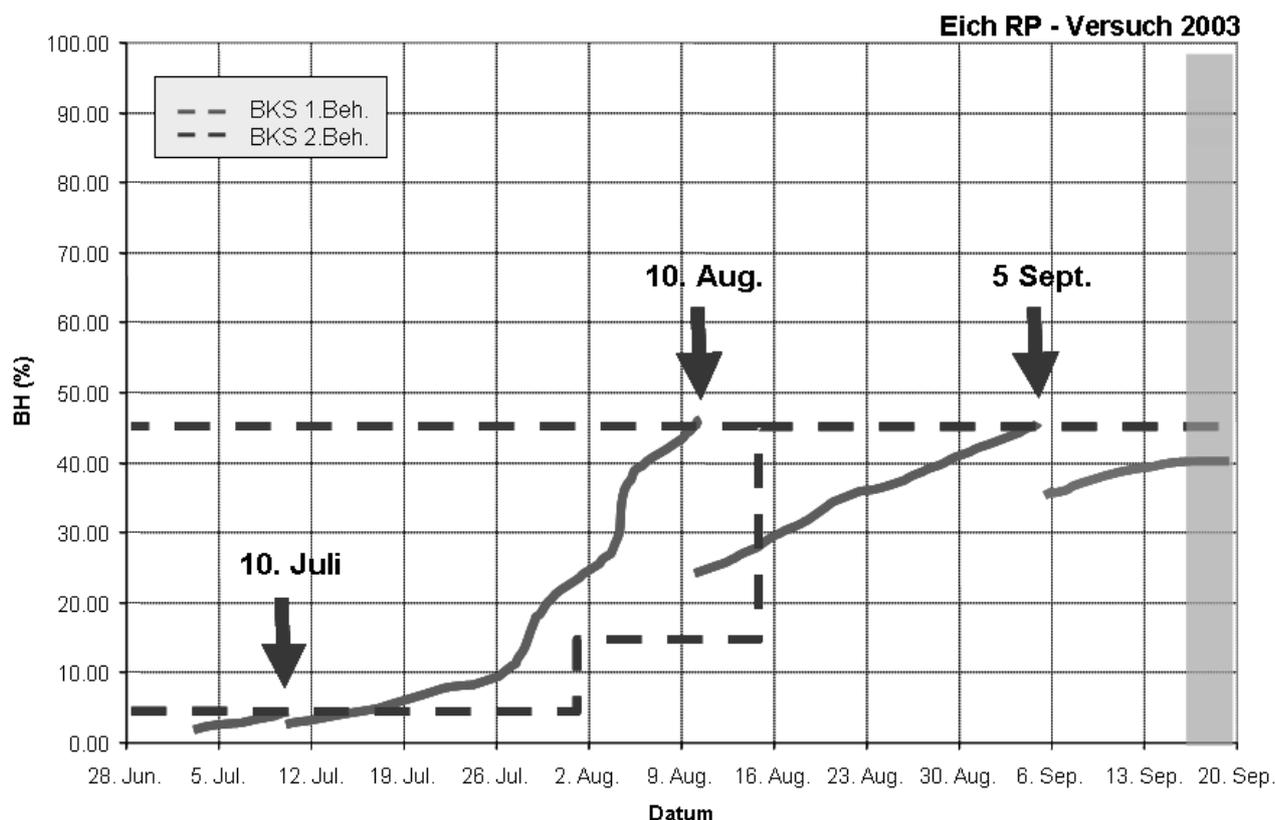


Abb. 1: CERC BET 3: Empfehlung der Fungizidstrategie (drei Fungizideinsätze) zur *Cercospora* – Bekämpfung in Zuckerrüben

Um gezielt und zum richtigen Zeitpunkt Felderhebungen durchführen zu können, wurden Ontogenesemodelle (SIMONTO; Roßberg et al., 2005) entwickelt, welche die phänologische Entwicklung von Getreide- und Rapsbeständen von der Aussaat bis zum Blühende ausreichend genau simulieren. Neben der direkten Nutzung zur Planung von Erhebungen oder Dünge- und Pflanzenschutzmaßnahmen steuern die SIMONTO – Modelle auch andere Entscheidungsmodelle (z.B. SIMCERC3, SKLERO-PRO, FUS-OPT (Racca et al., 2006)).

Entscheidungshilfesysteme unterstützen während der gesamten Vegetationsperiode den Nutzer bei der Entscheidung über Pflanzenschutzmitteleinsätze, vom Erstauftreten eines Schaderregers bis zur letzten erforderlichen Behandlung. Sie sollen alle verfügbaren Informationen verdichten zu

Handlungsanweisungen (Durchführung von Feldbonituren, Notwendigkeit und Terminierung von Behandlungen, Mittelwahl etc.).

Für wichtige, dominierende Schaderreger stehen Entscheidungshilfesysteme zur Verfügung. So kann die *Phytophthora* – Bekämpfung mit dem Entscheidungshilfesystem SIMPHYT (bestehend aus den Entscheidungsmodellen SIMPHYT1/SIMBLIGHT1 und SIMPHYT3) komplett durchgeführt werden. Ähnliches gilt in Beregnungsgebieten für die *Cercospora* – Bekämpfung, wo mit CERCBET (bestehend aus CERCBET1 und CERCBET3) ebenfalls ein umfassendes Entscheidungshilfesystem vorhanden ist. Im Tabakanbau plant SIMPEROTA (SIMPEROTA1 und SIMPEROTA3) die Blauschimmelbekämpfung.

ENTSCHEIDUNGSMODELLE ZUR BEKÄMPFUNG VON SCHÄDLINGEN UND UNKRÄUTERN

Im Vergleich zu den Pilzkrankheiten liegen für Schädlinge und Unkräuter relativ wenige wetterbasierte Entscheidungsmodelle vor. Bekämpfungsschwellenwerte sind dagegen verbreitet. Im Obstbau wurden in den siebziger Jahren des letzten Jahrhunderts einige Temperatursummenmodelle erstellt, mit denen das Auftreten bestimmter Entwicklungsstadien bzw. die Flugaktivität verschiedener Apfelschädlinge prognostiziert werden kann (von der ZEPP unter POMSUM zusammengefasst, s. Tab. 1). Im Weinbau haben die Temperatursummenmodelle zur der Traubenwicklerprognose Praxisrelevanz erlangt. Für einige wichtige Schad – Dipteren des Gemüsebaus (Kohlflye, Möhrenflye, Zwiebelflye) wurden Simulationsmodelle entwickelt (s. Tab. 1), die den Entwicklungsverlauf bzw. das Auftreten der Entwicklungsstadien berechnen und zumindest teilweise in der Praxis genutzt werden.

Insektizideinsätze finden im Ackerbau hauptsächlich in Raps, Getreide, Kartoffeln und Mais statt. Modelle der Fa. pro_Plant signalisieren Tage mit guten Flugbedingungen für Rapschädlinge. Deutlich weiter gediehen ist die Entwicklung von Entscheidungsmodellen für Getreideblattläuse und Kartoffelkäfer. Mit SIMLAUS (Kleinhenz, 1994) steht ein komplexes Simulationsmodell für die Entwicklung der drei wichtigsten Blattlausarten in Wintergetreidearten zur Verfügung. SIMLAUS berechnet ab Auflaufen der Winterungen die Populationsdynamik der Blattläuse (Anstieg und Rückgang der Populationsdichte, Aussterben während des Herbstes oder Winters). Mit SIMLAUS können Felderhebungen im Herbst (in Zeiten starken Populationsanstieges), sowie im Falle des Auftretens eines Anholozyklus auch im Frühjahr, geplant werden. Ferner können das Vermehrungspotenzial und die Notwendigkeit von Insektizideinsätzen abgeschätzt werden.

Eine gezielte Bekämpfung des Kartoffelkäfers wurde durch die intensive Nutzung des Entscheidungsmodells SIMLEP3 (Jörg et al., 2007) stark befördert. Das Modell prognostiziert mit einem zeitlichen Vorlauf von ca. 8 Tagen den Entwicklungsverlauf von *Leptinotarsa*

decemlineata. SIMLEP3 simuliert jeweils den Beginn des Auftretens und das Massenaufreten wichtiger Entwicklungsstadien (Ei, Junglarve, Altlarve, Jungkäfer). Mit SIMLEP3 können die optimalen Zeitpunkte für Felderhebungen bzw. Bekämpfung bestimmt werden. Ein großer Erfolg der SIMLEP3 – Nutzung liegt in der deutlichen Vorverlegung von Bekämpfungsterminen und der dadurch verbesserten Insektizidwirkungsgrade.

Der Einsatz von Entscheidungsmodellen in der Unkrautbekämpfung ist eher die Ausnahme als die Regel. Die Anwendung des Schadschwellenprinzips konnte sich in der Praxis nicht durchsetzen. In der Entscheidungsfindung bei der Unkrautbekämpfung stehen die Mittelwahl und die Festlegung der Aufwandmengen im Vordergrund, die beide auf profundem Expertenwissen (Pflanzenschutzberater) fußen. Mit dem Modell CeBrUS (Werner et al., 2002) wurde der Versuch unternommen, Expertenwissen zu Herbiziden mit dem gut ausgearbeiteten Bekämpfungsschwellensystem zu kombinieren. CeBrUS ist sehr komplex, erfordert eine Vielzahl von Eingabeparametern sowie eine aufwändige und permanente Pflege des in Datenbanken vorgehaltenen Expertenwissens. Dies dürften die Hauptgründe sein, warum dieses durchaus leistungsfähige Modell bisher keine Akzeptanz in Beratung und landwirtschaftlicher Praxis findet. Wetterbasierte Entscheidungsmodelle zur gezielten, situationsbezogenen Reduktion der Herbizidaufwandmenge sind im Ausland bereits im Ansatz entwickelt worden, eine Übertragung dieser Ansätze auf deutsche Verhältnisse steht jedoch noch aus.

LEISTUNGSFÄHIGKEIT UND GRENZEN VON ENTSCHEIDUNGSHILFEN

Die Akzeptanz von Entscheidungshilfen hängt entscheidend von ihrer Leistungsfähigkeit ab. Die von der ZEPP erstellten Modelle durchlaufen stets eine mehrjährige Validierungsphase in den Pflanzenschutzdiensten, bevor eine Praxiseinführung erfolgt.

Die Trefferquoten der Entscheidungshilfen liegen zwischen 80% und 95%, wobei mit steigender Komplexität, d.h. je mehr Parameter bei der Entscheidungsfindung berücksichtigt werden, der Anteil korrekt getroffener Entscheidungen steigt. Eine hundertprozentige Trefferquote ist eher die Ausnahme. Modelle sind stets unvollständige Abbilder der Wirklichkeit und können daher nicht alle Eventualitäten und Spezialfälle berücksichtigen, zumindest nicht mit vertretbarem Aufwand.

Als mögliche „Fehlerquellen“ der Modelle sind mehrere Ursachen bekannt. So können die verrechneten Wetterdaten fehlerhaft oder nicht repräsentativ sein. Auch die als Startwerte eventuell einzugebenden Feldboniturergebnisse sind stets mit einem Stichprobenfehler behaftet. Teilweise ist auch das Wissen über Biologie/Epidemiologie oder Schadwirkung des zu prognostizierenden Schaderregers unvollständig. In diesem Falle gehen die Entscheidungshilfen von nicht oder nicht vollständig zutreffenden Annahmen aus. Schließlich ist zu berücksichtigen, dass Entscheidungen oft zu einem Zeitpunkt getroffen werden müssen, zu dem die Resultate einer epidemischen Entwicklung noch nicht vollständig abgeschätzt werden können. Typisches Beispiel

hierfür ist die Halmbruchbekämpfung, bei der etwa im April über einen Fungizideinsatz entschieden wird, wo aber die Witterung im April bis Juni/ Juli noch in entscheidendem Maße die Stärke des Halmbruchbefalls beeinflusst. Bei derart langen Prognosezeiträumen bleibt immer ein gewisses Risiko einer Fehlprognose.

AKZEPTANZ UND NUTZUNG DER ENTSCHEIDUNGSHILFEN

Die Modelle der ZEPP gehören zu den am umfangreichsten validierten Entscheidungshilfen im Pflanzenschutz. Bei ihnen ist sowohl der „ α -Fehler“ (PSM-Einsatz war notwendig, wurde aber nicht empfohlen) als auch der „ β -Fehler“ (PSM-Einsatz war nicht notwendig, wurde aber empfohlen) bekannt. Diese detaillierte Validierung fehlt häufig bei anderen Entscheidungshilfen. Eine intensive Nutzung erfolgt derzeit durch die Pflanzenschutzberater der Officialberatung. Die durch die Warndienstmedien vermittelten Bekämpfungsstrategien basieren in hohem Maße auf den Ergebnissen der ZEPP – Entscheidungshilfen. Sie werden auch in der Gruppen- und Individualberatung genutzt. Mit dem Informationssystem Integrierte Pflanzenproduktion (ISIP) schufen sich die Pflanzenschutzdienste der Bundesländer (mit dankenswerter Förderung durch die Deutsche Bundesstiftung Umwelt) eine flexible und leistungsfähige Internetplattform zum Pflanzenschutz. ISIP ermöglichte nicht nur die Übermittlung von Pflanzenschutzinformationen ohne zeitlichen Verzug, sondern auch Nutzung der ZEPP - Entscheidungshilfen direkt durch die Landwirte. Das umfangreiche ISIP - Informationsangebot zum gezielten Einsatz von Pflanzenschutzmitteln bietet Beratungshinweise der Officialberatung, stellt Monitoring - Ergebnisse zur Befallssituation dar, und der Landwirt kann für seine Felder schlagspezifische Modellrechnungen durchführen. Dass die direkte Nutzung der Entscheidungshilfen zunimmt, zeigen die steigenden Abrufzahlen von ISIP.

PERSPEKTIVEN FÜR EINEN GEZIELTEN UND ÖKONOMISCHEN EINSATZ VON PFLANZENSCHUTZMITTELN

Wissenschaft und Pflanzenschutzdienste (koordiniert durch die ZEPP) werden auch künftig in engem Schulterschluss neue Prognosemodelle und Entscheidungshilfen entwickeln bzw. bereits etablierte verbessern. Bereits jetzt zeichnen sich dabei einige Arbeitsfelder ab.

Verbesserter Wetterdateninput

In Deutschland stehen derzeit ca. geeignete 600 Wetterstationen für wetterbasierte Entscheidungshilfen zur Verfügung. Eine weitere Verdichtung des Wettermessnetzes dürfte aus Kostengründen nicht zur Debatte stehen. In den vergangenen drei Jahren wurden geeignete Verfahren zur geographischen Interpolation von wichtigen Wetterparametern (Temperatur, relative Luftfeuchte) getestet (Zeuner, 2008), die auch die orographische Gliederung der

Landschaft mit einbeziehen. Weiterhin lässt der Fortschritt bei der Radarniederschlagsmessung die genauere Einbeziehung von Niederschlägen in die Modelle erwarten. Ein Betrieb, dem Entscheidungshilfen mit Wetterdaten in kleinräumigerer Auflösung, bis hin zum Schlag, und eine spezifischere Simulation von Epidemie- und Gradationsverläufen zur Verfügung stehen, ist in greifbare Nähe gerückt.

Erfassung des Inokulums bzw. pflanzenbaulicher Rahmenbedingungen

Die Forderung nach verbesserten Prognosen bzw. Simulationen von Befallsverläufen und vor allem nach schlagspezifischen Modellen bringt unweigerlich die „Startwert – Problematik“, also die Frage nach dem Ausgangsbefall, auf die Tagesordnung. Während die Modelle den Wettereinfluss zumindest ausreichend abbilden, bleibt die Erfassung des Inokulum problematisch. Praktikable Methoden zur direkten Erfassung des Inokulums existieren praktisch nicht, so dass der Ausgangsbefall indirekt, über pflanzenbauliche Parameter abgeschätzt werden muss. Nur in wenigen Modellen (SIMCERC3, CERCBET1/3) erfolgt diese Inokulum – Abschätzung annähernd ausreichend. Für die meisten Schaderreger ist der Einfluss pflanzenbaulicher Rahmenbedingungen, wie Vorfrüchte bzw. Fruchtfolge, Anbauverhältnisse, Bodenbearbeitung etc. noch nicht untersucht. Ergebnisse hierzu könnten die Qualität der Entscheidungshilfen erheblich verbessern und die Entwicklung von Modellen auch für bodenbürtige Schaderreger ermöglichen.

Sorteneinfluss und Fungizidwirkungen

Die Erfolge der Resistenzzüchtung finden beim gezielten Pflanzenschutz bei weitem nicht im möglichen Umfange Berücksichtigung, weder bei den Bekämpfungsschwellen noch bei den Entscheidungsmodellen. Die wenigen Beispiele jedoch zeigen das Potenzial der Einbeziehung von Sortenresistenzen, z.B. bei CERCBET3. Voraussetzung hierfür ist die Identifizierung von epidemiologischen Parametern, die den Sorteneinfluss auf den Befallsverlauf beschreiben (Sortenmodule) bzw. die Ermittlung von sortenspezifischen Bekämpfungsschwellenwerten, die aus Befalls – Verlust – Relationen zu entwickeln sind. In naher Zukunft steht die Entwicklung von Sortenmodulen im Vordergrund.

Polyzyklische Krankheiten mit kurzer Latenzzeit sind oft nur durch mehrfachen Fungizideinsatz erfolgreich zu bekämpfen. Ein gezielter Fungizideinsatz nach der ersten Behandlung muss deren Wirkung mitberücksichtigen. Eine erste Annäherung bietet hier die häufig aus Versuchsergebnissen abgeleitete Festlegung von „Wirkungsdauern“, wobei jedoch Witterungseinflüsse und Wirkungsgrade nicht in Betracht gezogen werden. Die Integration dieser Faktoren als „Fungizidmodul“ in eine Entscheidungshilfe trägt entscheidend zur besseren Planung von Fungizidstrategien bei.

Synoptische Entscheidungshilfen

Pflanzenschutzsysteme differieren stark in ihrem Komplexitätsgrad. So orientiert sich die Pilzkrankheitsbekämpfung im Kartoffelbau praktisch alleine am Auftreten von *P. infestans* und im Tabakbau an *P. destructor* (s. oben). Im Zuckerrübenanbau ist zwar meist die *Cercospora* – Blattfleckenkrankheit der dominierende Schadpilz, in der Regel treten aber auch noch Rübenmehltau, Rübenrost oder *Ramularia beticola* auf. Bei der Fungizidstrategie in Zuckerrüben müssen diese Schaderreger daher berücksichtigt werden. Noch komplexer stellt sich die Situation bei der Pilzkrankheitsbekämpfung im Getreide dar, wo während der Vegetationsperiode zahlreiche Krankheiten an Halmbasis, Blättern und Ähren auftreten können. In den Dauerkulturen des Obstbaus ist sicherlich der höchste Komplexitätsgrad zu finden.

Ein Entscheidungshilfesystem, soll es denn von der Praxis akzeptiert werden, muss Entscheidungen treffen unter Berücksichtigung aller relevanten Schaderreger. Die Neigung ist eher gering, getrennt für die einzelnen Schaderreger verschiedene Modelle parallel laufen zu lassen. Im Zuckerrüben- und Getreidebau sind derzeit synoptische Entscheidungshilfesysteme durch die ZEPP in Entwicklung. Von ihnen wird erwartet, dass sie die komplexe Entscheidungsfindung weitgehend automatisiert ablaufen lassen und dem Landwirt eine optimierte Bekämpfungsstrategie empfehlen.

Ökonomische Aspekte

Ökonomische Faktoren, wie Pflanzenschutzmittel- und Produktpreise oder andere, veränderte Produktionsbedingungen, müssen in die Entscheidungsfindung beim Pflanzenschutz miteinbezogen werden. Die Bekämpfungsschwellen und Entscheidungsmodelle bedürfen auch diesbezüglich der ständigen Überprüfung und ggf. Anpassung. Fortschritte bei der annähernden Bestimmung des schlagbezogenen Ertragspotenzials, welches zumindest eine grobe Abschätzung des ökonomischen Nutzens von Pflanzenschutzmitteleinsätzen („Mehrerträge“) ermöglicht, sind durch die Nutzung von Wachstumsmodellen zu erwarten. Hauptforderung an Wachstumsmodelle ist die dynamische Berechnung von potenziellen Erträgen während der Vegetationsperiode, hauptsächlich in Abhängigkeit von der Wasserversorgung der Kulturpflanzenbestände. Aber angesichts der erwartbar immer volatileren Märkte und in kürzesten Zeiträumen stärker schwankenden Erzeugerpreise dürfte es zunehmend schwerer fallen, die Ökonomie bei der Entscheidungsfindung zu berücksichtigen. Das ökonomische Risiko bei Entscheidungen zum Pflanzenschutzmitteleinsatz wird zukünftig schwieriger abschätzbar sein.

Auch die stark wachsenden Betriebe sind bezüglich eines gezielten Pflanzenschutzmitteleinsatzes als nicht unproblematisch anzusehen. Häufig werden Arbeitsgänge zur Ausbringung von Herbiziden, Wachstumsreglern und teilweise auch Insektiziden, Fungiziden und Flüssigdüngern aus arbeitswirtschaftlichen Aspekten kombiniert. Dabei werden zweifellos Kompromisse hinsichtlich der Notwendigkeit einzelner Maßnahmen und ihrer Terminierung eingegangen. Eine

gewisse Abhilfe und Unterstützung bei der Planung von Behandlungen auf dem Betrieb könnten hier verbesserte Ontogenesemodelle bringen. Aufgrund des zunehmenden Anbaus von Sorten mit unterschiedlichen Entwicklungsverläufen (frühreif, spätreif) zur Brechung von Arbeitsspitzen müssen die Ontogenesemodelle um Sortenmodule erweitert werden.

Handhabung der Entscheidungshilfen

Im Jahre 2004 wurde der Praxisbetrieb von ISIP aufgenommen. Mittlerweile wird das Internetsystem in fast allen Bundesländern verbreitet genutzt, und die in den neunziger Jahren noch verbreiteten PC-Lösungen wurden ersetzt. Über ISIP werden alle praktikablen Entscheidungshilfemodelle der Praxis angeboten. Bei der ISIP – Entwicklung richtete sich der Blick stets auch auf die Handhabbarkeit des Systems durch den Nutzer. Einerseits sollten sämtliche Informationen zum gezielten Pflanzenschutzmitteleinsatz zur Verfügung gestellt werden. Andererseits bestanden die Forderungen Bekämpfungsentscheidungen auch in verdichteter, knapper Form (Bekämpfung: ja/nein? wann?) zu präsentieren und einen betriebsindividuellen Zuschnitt der Internetplattform zu ermöglichen. Diese Ziele wurden erreicht.

Neue Herausforderungen ergeben sich im Hinblick auf ein zeitsparendes Datenmanagement (und die laut neuem Pflanzenschutzgesetz geforderte Dokumentation zum Pflanzenschutzmitteleinsatz) sowie bei der übersichtlichen Präsentation der Ergebnisse der Entscheidungshilfen. In beiden Bereichen (wie auch bei der Wetterdatenbereitstellung für die Modelle) werden Geographische Informationssysteme (GIS) zukünftig eine wichtige Rolle spielen (Zeuner und Kleinhenz, 2007).

LITERATURVERZEICHNIS

- Buhl, C. und F. Schütte (1971): Prognose wichtiger Pflanzenschädlinge in der Landwirtschaft. Parey Verlag, Berlin und Hamburg.
- Gutsche, V. (1999): Das Modell SIMPHYT3 zur Berechnung des witterungsbedingten Epidemiedrucks der Krautfäule der Kartoffel (*Phytophthora infestans* (Mon.) de Bary). Nachr.bl. Dt. Pflanzenschutzd. **51**, 169-175.
- Jörg, E., Racca, P., Preiß, U., Butturini, A., Schmiedl, J. und A. Wójtowicz (2007): Control of Colorado Potato Beetle with the SIMLEP Decision Support System. Bulletin OEPP/EPPO Bulletin **37**, 353-358.
- Kleinhenz, B. (1994): Entwicklung von Simulationsmodellen zur Beschreibung der Populationsdynamik von virusübertragenden Getreideblattläusen in der Herbst- und Winterperiode auf der Basis von im Freiland und Labor ermittelten Daten. Diss., Bonn, 98
- Kleinhenz, B. und E. Jörg (1998): Integrierter Pflanzenschutz – Rechnergestützte Entscheidungshilfen. Schriftenreihe BMELF, Reihe A: Angewandte Wissenschaft **473**, 168 S., Bonn.

- Kleinhenz, B., Jörg, E. und R. Schietinger (1998): Umsetzung der Verwaltungsvereinbarung der Länder vom 1.10.1997 über die gemeinsame Entwicklung und Pflege EDV-gestützter Entscheidungshilfen (ZEPP). Mitt.Biol.Bundesanst. **357**, 201.
- Kleinhenz, B., Falke, K., Kakau, J. und D. Roßberg (2007): SIMBLIGHT1 – a new model to predict first occurrence of potato late blight. Bulletin OEPP/EPPO Bulletin **37**, 339-343.
- Kluge, E., Jörg, E. und D. Roßberg (2006). SIMSEPT: Eine Entscheidungshilfe zur Bekämpfung von *Septoria tritici* und *Septoria nodorum*. Arch. Phytopath.Pl. Prot. **39**, 79-92.
- Koch, S. und A. von Tiedemann (2006): Neue Prognose für Sclerotinia. DLG-Mitt. **3**, 52-53.
- Leinhos, G.M.E., Klante, B. und N. Laun (2004): Fungizidterminierung mit ZWIPERO, einem Prognosemodell für Falschen Mehltau (*Peronospora destructor*) an Zwiebeln. Mitt.Biol.Bundesanst. **396**, 167.
- Racca, P. und E. Jörg (2007): CERCBET 3 – a forecaster for epidemic development of *Cercospora beticola*. Bulletin OEPP/EPPO Bulletin **37**, 344-349
- Racca, P., Kleinhenz, B. und E. Jörg (2007): SIMPEROTA 1/3 – a decision support system for blue mould disease of tobacco. Bulletin OEPP/EPPO Bulletin **37**, 368-373.
- Racca, P., Weinert, J., Jörg, E., Kleinhenz, B. und A. von Tiedemann (2006): FUS-OPT - Entwicklung einer computergestützten Entscheidungshilfe zur Optimierung der Bekämpfung von Ährenfusariosen. Mitt.Biol.Bundesanst. **400**, 280-281.
- Räder, T., Racca, P., Jörg, E. und B. Hau (2007): PUCREC/PUCTRI - a decision support system for the control of leaf rust of winter wheat and winter rye. Bulletin OEPP/EPPO Bulletin **37**, 378-382.
- Roßberg, D., Jörg, E. und K. Falke (2005): SIMONTO - ein neues Ontogenesemodell für Wintergetreide und Winterraps. Nachr.bl. Dt. Pflanzenschutzd. **57**, 74-80.
- Roßberg, D. Racca, P., Jörg, E. und B. Kleinhenz (2000): Erste Erfahrungen mit dem Modell CERCBET1. Nachr.bl. Dt. Pflanzenschutzd. **52**, 153-159.
- Ullrich, J. und H. Schrödter (1966): Das Problem der Vorhersage des Auftretens der Kartoffelkrautfäule und die Möglichkeit seiner Lösung durch eine „Negativprognose“. Nachr.bl. Dt. Pflanzenschutzd. **18**, 33-40.
- Weinert, J., Kleinhenz, B., Jörg, E. und P. Racca (2004): SIMCERC 3 – ein optimiertes Modell zur Prognose von *Pseudocercospora herpotrichoides* an Winterweizen und Triticale. Mitt.Biol.Bundesanst. **400**, 165.
- Werner, B., de Mol, F. und B. Gerowitt (2002) CeBrUs ein Beratungssystem für die Unkrautbekämpfung in Raps und Getreide im Internet. *Journal of Plant Diseases and Protection*, SP. I, XVIII, 391 - 398.
- Zeuner, T. (2007): Landwirtschaftliche Schaderregerprognose mit Hilfe von Geographischen Informationssystemen. Diss., Mainz, 199 S.
- Zeuner, T. und B. Kleinhenz (2007): Use of geographic information systems in warning services for late blight. Bulletin OEPP/EPPO Bulletin **37**, 327-334.