

# Hybridgetreide hat Zukunft

Andreas Hund<sup>1</sup>, Dario Fossati<sup>2</sup>, Fabio Mascher<sup>2</sup> und Peter Stamp<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ETH Zurich, Institut für Agrarwissenschaften, 8092 Zürich, Schweiz

<sup>2</sup>Agroscope, Institut für Pflanzenbauwissenschaften IPB, 1260 Nyon, Schweiz

Auskünfte: Andreas Hund, E-Mail: andreas.hund@usys.ethz.ch

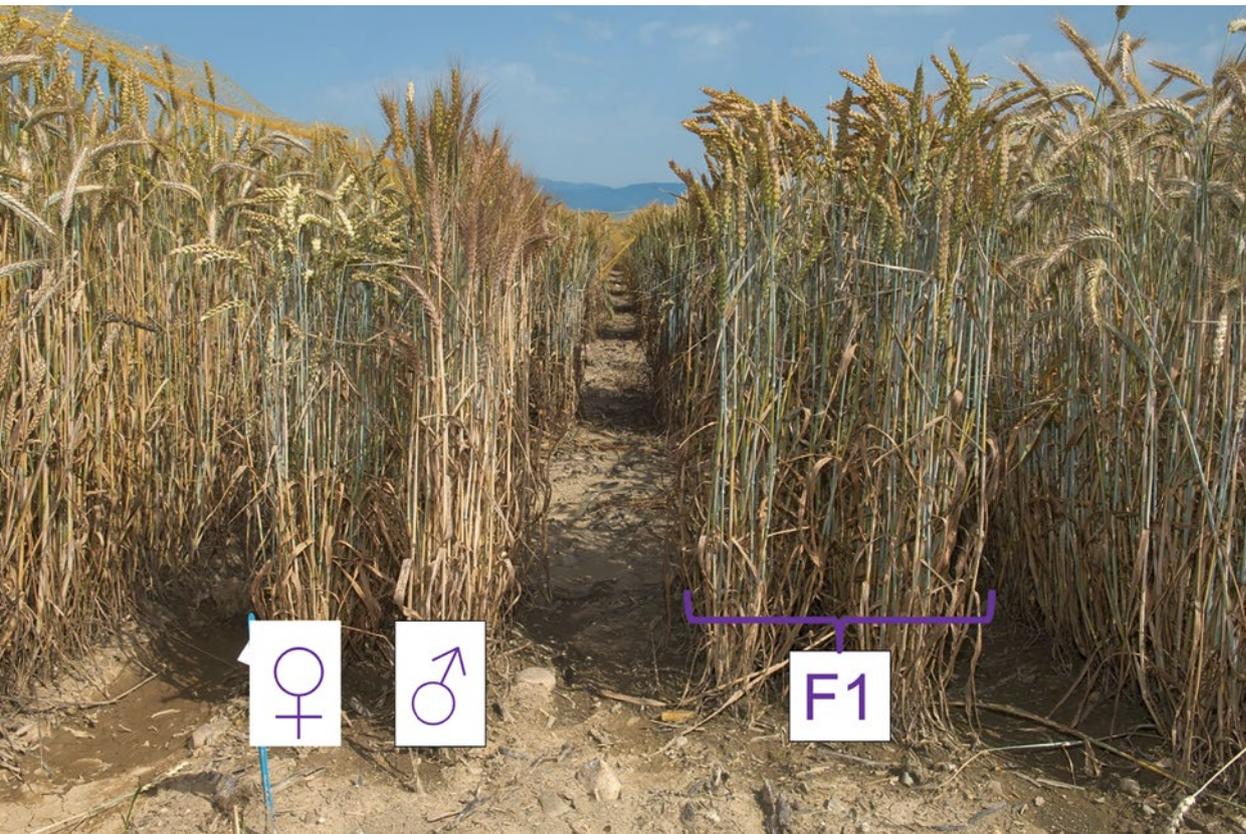


Abb. 1 | Die Eltern und ihr F1 Hybride.

## Doppelhaploide (DH) verkürzen den Selektionsprozess

In der traditionellen Linienzüchtung beginnt der Werdegang einer neuen Sorte mit der Verkreuzung von zwei reinerbigen Weizen- oder Gerstenlinien. Die daraus resultierenden Hybriden der ersten Filialgeneration (F1), sind uniform und mischerbig (Abb. 1). Lässt man diese abblühen, bestäuben sich die Pflanzen selbst. In der Folgegeneration (F2) kommt es zur Aufspaltung der Merkmale beider Eltern. Ab jetzt kann man beginnen, für die Zuchtziele aussichtsreiche Typen auszuwählen. Allerdings sind erst ab der siebten Folgegeneration alle Pflan-

zen wieder weitgehend reinerbig. Dies erschwert es bei vielen Merkmalen, die richtigen Erbkombinationen auch in frühen Generationen präzise zu erkennen. Um die Eigenschaften von Kreuzungsnachkommen schon zu diesem frühen Zeitpunkt zu erfassen, bedarf es einer genauen Beobachtung im Feld, kombiniert mit zusätzlichen Laboranalysen, um bereits zu diesem Zeitpunkt statistische Abschätzungen des Zuchtwerts vorzunehmen. Ein anderer Weg, der in der Schweiz auch bei Weizen intensiv verfolgt wurde, führt über die Schaffung von Doppelhaploiden. Bereits seit über dreissig Jahren kön-

nen Keimzellen von Kreuzungsnachkommen in Gewebekulturen, also in Laborschalen, vermehrt werden. Werden sie – alles gar nicht so einfach – wieder zu kompletten Pflanzen angezogen, haben sie nur einen statt zwei Sätze der Erbanlagen. Mit Colchicin, dem Toxin der Herbstzeitlose, das die Zellteilung während der Meiose verhindert, lassen sich die Erbanlagen wieder verdoppeln. Sie sind damit doppelhaploid (DH), was dem Ergebnis einer hundertprozentigen Inzucht entspricht. Dadurch umgeht man den langwierigen Prozess der Inzucht und erhält bereits in einer Generation reinerbige Individuen, in denen alle Eigenschaften sofort nachhaltig und effizient selektierbar sind (Abb. 2). Zwar muss man bei diesem Vorgehen sehr viele Pflanzen mit unbrauchbaren Eigenschaften ausscheiden, gegen die bei der traditionellen Zuchtmethodem Jahr für Jahr selektioniert wird. Dennoch erhöht sich die Präzision und verkürzt sich die Dauer des Selektionsprozesses. Bei Weizen wurden entsprechende Methoden auf der Basis männlicher Keimzellen bereits vor einigen Jahrzehnten auch an der ETH etabliert und in Zusammenarbeit mit den Forschungsanstalten auf ihre Praxistauglichkeit geprüft. Dabei stellte sich folgendes heraus: die DH-Linien waren zwar nutzbar, in ihrer Generierung aber zu stark vom Genotyp der Mutter abhängig. Bei Mais wurde vor über einem Jahrzehnt an der Universität Stuttgart Hohenheim die Generierung von DH über die Eizelle zur Praxisreife entwickelt. Urheberrechtlich geschützte Induktionlinien veranlassen die unbefruchtete Eizelle der Zielpflanze zur haploiden Entwicklung des Embryos. Diese Methode wird inzwischen weltweit, selbst in den Tropen, in der Maiszüchtung verwendet. Inzwischen wurde diese DH-Technologie auch für Weizen in den meisten grossen Züchtungsfirmen als Standard etabliert.

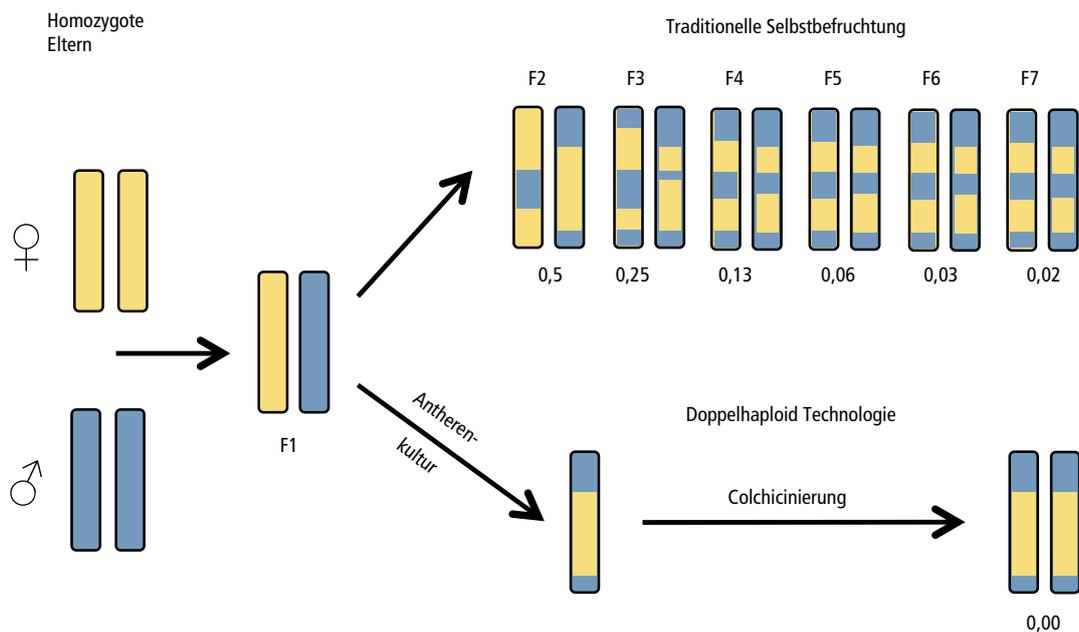
#### Züchtung von Hybriden bei Selbstbefruchtern

Warum kam die Hybridzüchtung bei Weizen und Gerste so spät? Diese Frage wurde bereits in einem Landwirtschaftsfachblatt behandelt, als aus der Praxis Sorgen zur künftigen Verfügbarkeit von Qualitätssaatgut gestellt worden waren (Stamp 2013). Vor 100 Jahren entdeckte man in den USA, dass ingezüchtete, also reinerbige, miteinander verkreuzte Maislinien für eine Anbausaison deutlich mehr Ertrag liefern können, als die offen abblühenden Ursprungssorten der beiden Linien. Heute werden weltweit fast nur noch Maishybriden angebaut, die offen abblühenden Sorten sind fast ganz verdrängt worden.

Die meisten bisher entwickelten Hybridsorten stammen von kompletten oder partiellen Fremdbefruchterarten. Sie leiten sich meist aus traditionellen Populationsorten ab, die die Züchtung in moderne, einheitliche

#### Zusammenfassung

Fehlende Lizenzentnahmen verlangsamten die Züchtung von traditionellen Selbstbefruchtersorten bei Weizen und Gerste, damit vermindern sich die Aussichten für einen raschen Fortschritt. Seit einigen Jahrzehnten verändern sich aber die Sortentypen in Europa. Bei den Fremdbefruchtern Mais, Raps und Roggen sind erfolgreiche genetisch-basierte Hybridsysteme geschaffen worden, die zu preiswertem Hybridsaatgut geführt haben. Ein entsprechendes System besteht nun auch für Gerste, bei Weizen fehlt es noch. Für Hybriden werden in der Regel zwei homozygote Linien verkreuzt, deren Erschaffung sieben Inzuchtgenerationen benötigt. Bei vielen Getreidearten kann dieser Prozess biotechnologisch auf einen Schritt abgekürzt werden, indem haploide Keimzellen zu Pflanzen mit verdoppeltem Erbgut, Doppelhaploiden (DH) regeneriert werden, die genetisch identisch mit Inzuchtlinien sind. Biologisch gesehen sind Sorten der Selbstbefruchterarten Gerste und Weizen ertragsoptimierte Inzuchtlinien, daher darf man im Vergleich zu den Elternlinien nur kleinere Heterosisleistungen erwarten. Dennoch ist der Wiedereinstieg grosser Firmen in die Weizen- und Gerstenzüchtung zu beobachten. Warum? Selbst auf der politischen Ebene der G20 ist mittlerweile angekommen, dass Weizen, die Weltkulturart Nummer 1 für unsere Ernährung, einen sogenannten Waisenstatus eingenommen hat. Ein Weckruf in Zusammenarbeit mit Grossfirmen ist erfolgt. Diesen wird es genügen, wenn Landwirtinnen und Landwirte durch erhöhte Ertragsicherheit und soliden finanziellen Mehrertrag vom Saatgutwechsel überzeugt werden und damit langfristige Investitionen in die Züchtung wieder möglich werden. Für eher kleine Zuchtprogramme stellt sich mittelfristig die Frage, wann und wie die Anpassung an diese Entwicklung eingeleitet werden kann.

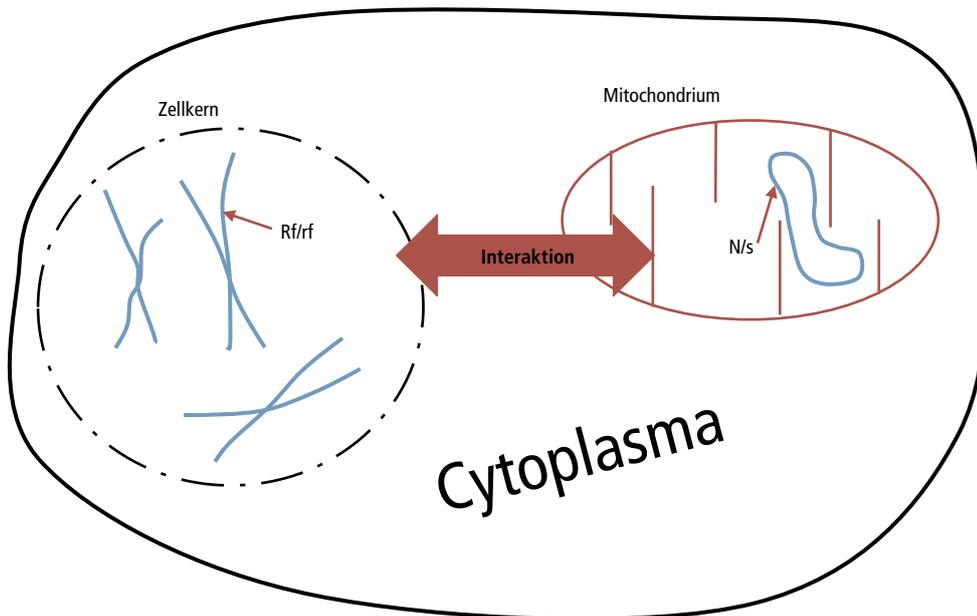


**Abb. 2** | Gegenüberstellung der Erzeugung reinerbiger Weizensorten durch traditionelle Selbstbefruchtung im Zuchtgarten verglichen mit der *in-vitro* Erzeugung Doppelhaploider Pflanzen aus den Staubbeutel (Antheren) der männlichen Blütenteile. Da Antheren nur einen einfachen Chromosomensatz besitzen, sind die *in-vitro*-regenerierten haploiden Embryonen nach Colchicininierung, d.h. Aufdoppelung des Chromosomensatzes, in einem Schritt vollständig homozygot (Anteil Heterozygotie von 0,00). Im Vergleich sind die Ingezüchteten Individuen auch nach sechs Generationen Inzucht immer noch etwa zu einem Anteil von etwa 0,02 heterozygot. Gezeigt ist eines der 21 Paare homologer Chromosomen von Weizen.

und ertragsstarke Hybridsorten überführt. Dadurch ergibt sich ein Mehrwert, den sich Züchtungsfirmen und Landwirte teilen. Da Hybriden bei Nachbau in der nächsten Generation genetisch wieder aufspalten, was zu Ertragseinbußen führt, profitiert der Bauer vom jährlichen Neukauf von Saatgut. Die entrichteten Lizenzgebühren erlauben es den Züchtungsfirmen, langfristig zu investieren. Seit nunmehr über 20 Jahren sind auch bei Roggen und Raps Hybridsorten erfolgreich auf dem Markt. Bei Mais sind heute 100 % der Sorten Hybriden, bei Roggen über 75 % und bei Raps über 50 %. Um wirtschaftlich erfolgreich zu sein, muss das Saatgut von Hybridsorten bezahlbar sein. Bei Mais mit seinen getrennten weiblichen und männlichen Blütenständen wird das Ziel der Bezahlbarkeit bereits seit 100 Jahren sehr einfach durch mechanische Kastration der endständigen Rispe der Mutterpflanzen erreicht. Bei den Getreidearten mit zwittrigen Blüten ist die Kastration komplizierter.

Parallel zur mechanischen Kastration wurden für Mais auch genetische Systeme zur «Cytoplasmatischen Männlichen Sterilität, CMS» entwickelt, die seit Jahr-

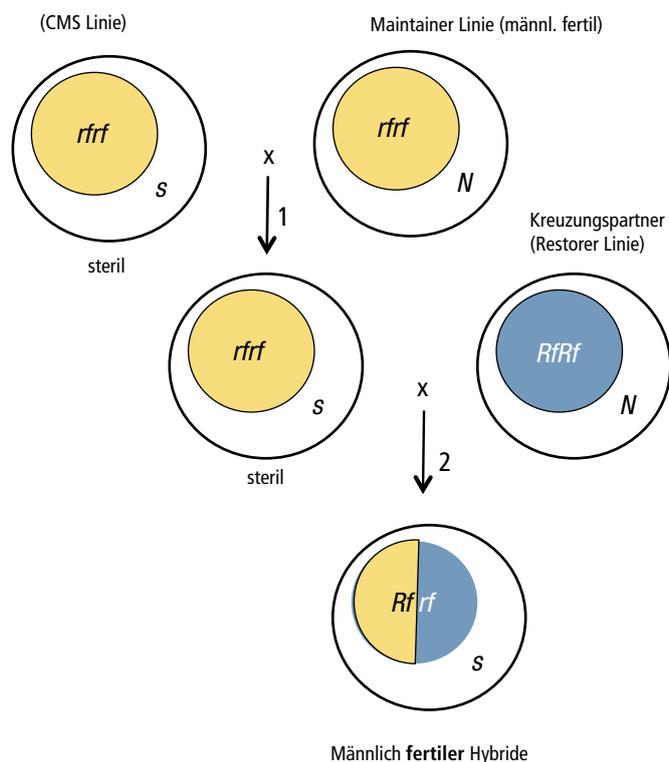
zehnten die billige und sichere Saatgutproduktion unterstützen – Systeme, die mittlerweile auch für Roggen und Sonnenblume bestehen. Sie beruhen auf Gendefekten im «Kraftwerk» der Zelle, dem Mitochondrium (Abb. 3). Diese lassen die Pollenzellen der als Mutter für Hybridsaatgut verwendeten Linie verkümmern. Sie kann sich also nicht selbst bestäuben, d.h. es kommt sicher zur Hybridisierung durch Pollen der Vaterlinie. Die daraus resultierenden Pflanzen würden aber dieselben defekten, nur von der Mutter weiter vererbten Mitochondrien tragen und wären damit ebenfalls männlich steril – eine Katastrophe für die Bauern, denn ohne Bestäubung gibt es keinen Ertrag. Es ist aber gelungen, im Kerngenom Gene zu identifizieren, die diesen Defekt wieder aufheben, sogenannte Restorer Gene. Die bestäubende Vaterlinie überträgt diese Restorer Gene und sorgt so dafür, dass das verkaufte Hybridsaatgut männlich fertile Pflanzen hervorbringt (Abb. 4). Vor wenigen Jahren hat die Syngenta ein CMS-System auch für Gerstenhybriden etabliert – ein Durchbruch, der auch für Weizen Hoffnung weckt. Auch in der universitären und staatlichen Züch-



**Abb. 3 |** Die cytoplasmatisch-kerngenetische männliche Sterilität wird durch eine Fehlfunktion mitochondrialer Gene verursacht. Im Vergleich zu Zellen mit einer normalen Funktion (N) führt diese Fehlfunktion zur Sterilität (s). Die Sterilität kann jedoch durch dominante Restorer Gene (Rf) im Zellkern aufgehoben. Da diese im Kern sitzen, können sie über den väterlichen Pollen übertragen werden. Im Gegensatz dazu lassen sich Mitochondrien, nur von der Mutter weitergeben.

tungsforschung der Schweiz ist das Interesse an Getreidehybriden seit Jahrzehnten gross. Es war naheliegend, in Kombination mit den doppelhaploiden Weizenlinien der ETH Zürich und Agroscope, über den Einsatz von Gametoziden, Chemikalien, die die Pollenausbildung unterdrücken (Abb. 5), nachzudenken (Schmid *et al.* 1994). Grosse Hoffnungen hegte auch die Delley Samen und Pflanzen AG (DSP), Hybriden im Rahmen des leider aufgegebenen Triticaleprogramms von Agroscope zu schaffen. Aus züchterischen Gesichtspunkten wäre dies besonders reizvoll gewesen, da der Fremdbefruchter Roggen mit seinem Genom im stark selbstbefruchtenden Triticale ansonsten einer permanenten Inzucht unterläge. Für die kommerzielle Hybridproduktion wäre Triticale vorteilhaft, denn dank der grossen Pollenausbeute ist die Bestäubung einfacher als beim Weizen. Die DSP hatte hierzu mit süddeutschen Firmen ein sehr intensives Programm gestartet. Doch eine an der Universität Zürich entwickelte transgene männliche Sterilität kam durch den wachsenden Gentech-Widerstand nicht zur Anwendung. Zwei Gametozide waren zwar in Frank-

reich provisorisch zugelassen worden, aber Monsanto nahm dennoch sein Produkt wieder vom Markt – nicht gerade ermutigend für kleine Firmen, hierauf eigene Zuchtprogramme aufzubauen. Mittlerweile ist das zweite wirksame Gametozid, CROISOR®, von der deutschen Saaten-Union gekauft und seit 2011 in der EU nicht nur genehmigt, sondern auch für unbedenklich erklärt worden. Damit steht der Hybridzüchtung bei Weizen nichts mehr im Weg und es sind bereits sehr gute Sorten in Europa auf dem Markt. Man kann also davon ausgehen, dass internationale und mittelständische Unternehmen in unserem für Höchstserträge geeigneten Klima sich vor allem auf Hybriden konzentrieren werden. Seit 2012 setzt man an der ETH Zürich neue Akzente zur Erforschung von genetischen Werkzeugen für die Hybridzüchtung: Die Gruppe für Futterpflanzengenetik (Professor Bruno Studer) erforscht Selbst-Inkompatibilität, CMS Systeme und DH Induktion bei Gräsern. Hieraus entsteht in der Schweiz eine neue Kompetenz auch für die Züchtung des «Grases» Weizen. Dass man Heterosis auch bei Selbstbefruchtern nutzen kann, zeigt das Bei-



**Abb. 4 | Schema der Vererbung der Cytoplasmatisch-männliche Sterilität:** 1) Das sterile Cytoplasma (s) wird über über «Maintainer» Linien (N) erhalten. Diese Linien sind mit der CMS Linie genetisch identisch, haben aber ein normales Cytoplasma (N). Fertile Hybriden lassen sich durch Kreuzung der CMS Linie mit beliebigen fertilen Inzuchtlinien herstellen, sofern diese homozygot ein entsprechendes «Restorer-gen» (Rf) im Zellkern tragen.

spiel des Hybridreises. China hat in den 1970er Jahren mit enormem Einsatz ein Hybridreis-Programm ins Leben gerufen. Dabei wurde ebenfalls CMS genutzt. Heute basieren 50 % des Reisanbaus in China auf Hybriden mit einem durchschnittlichen Ertragsvorteil von 10–15 % (Khush 2013).

Die vergangenen Jahre mit ihren heftigen Witterschwankungen haben gezeigt, wie wichtig neben einem maximalen Ertragspotenzial die Ertragssicherheit ist. Hier sind Hybriden wohl im Vorteil, da die hohe Robustheit der Pflanzen und eine bessere Durchwurzelung des Bodens die Ertragssicherheit erhöht. Auch kann man eine verbesserte Stickstoffnutzung erwarten. (Schachschneider 2012).

Doch Hybridzüchtung ist bei Selbstbefruchtern kein Kinderspiel, es braucht Hunderte von Testkreuzungen und das richtige Ausgangsmaterial, um eine wirklich überzeugende neue Hybride zu schaffen. Die Etablierung der richtigen Ausgangspopulationen hat schon bei den Fremdbefruchtern Roggen und Mais Jahrzehnte gedauert. Bei den Selbstbefruchtern Gerste und Weizen

stehen wir bei einem viel geringeren Heterosiszuwachs erst am Anfang. Die Probleme macht eine Panne bei der Saatgutproduktion von Gerstenhybriden in Deutschland 2013 deutlich, die zu sehr viel Unruhe unter den Landwirtinnen und Landwirten geführt hatte. Für die Hybridproduktion braucht es Mutterlinien, die ihre Blüten lange offen halten, dadurch wächst jedoch die Gefahr einer Saatgutverunreinigung. Die Umstellung auf Hybriden wird sich dann durchsetzen, wenn die Praxis davon überzeugt ist, dass er durch Hybridanbau ebenfalls gewinnt und der hohe Saatgutpreis sich durch eine frühe Aussaat mit verringerter Aussaatmenge kompensieren lässt.

#### Wer züchtet?

Noch ist die Gesamtzahl aller in Mitteleuropa zugelassenen Weizen- und Gerstensorten gross, Genauso gross ist das Interesse der landwirtschaftlichen Praxis, nur die für sie passenden Sorten anzubauen. Daher «überleben» Sorten auf den EU-Sortenlisten meist nicht sehr lange. Dies scheint auf eine dynamische Züchtungslandschaft



**Abb. 5 |** Produktion von Triticale Hybriden. Die Tüten erlauben es, den Anteil der Sterilität nach Anwendung des Gametozids zu bestimmen.

hinzuweisen. Aber 2010 wurde in Bonn an einer Konferenz der deutschsprachigen Züchter grosse Besorgnis laut, dass ungenügende Lizenzeinnahmen jede zweite Weizenzüchterstelle gefährde. Auch international bestehen diese Sorgen, die auf Betreiben der G20 Gruppe zur Weizeninitiative geführt haben (<http://www.wheatinitiative.org>). Damit hat sich die Stimmung grundlegend geändert. Hatten sich noch bis 2000 grosse Agrarkonzerne wie Monsanto aus der Weizenzüchtung zurückgezogen, so haben jetzt Bayer und Monsanto vor allem durch Firmenaufkäufe ihr Engagement wieder verstärkt. Damit soll diese plötzlich «verwaiste» Kulturart in Forschung und Züchtung wieder den Platz zurück erobern, die ihr als Kulturart Nummer 1 für die Welternährung gebührt. Neben Ministerien und internationalen Züchtungsinstituten beteiligen sich namhafte Firmen von KWS (D), Desprez (F), Limagrain (F) bis Syngenta (CH) und Monsanto (USA) an dieser Weizenvision. Damit ist zwar die Frage noch nicht beantwortet, welche Firma wie viel Geld heute in die Weizenzüchtung investiert, zumindest aber hat der Weizen seinen «Waisenstatus»

einigermaßen überwunden. Dies hat und wird Konsequenzen für die Vielfalt der Züchtungshäuser haben. Ein Weizenzüchtungsprogramm kann nicht auf Knopfdruck ab- und angeschaltet werden, wertvolles Zuchtmaterial wird über viele Jahre aufgebaut. Selbst wenn ein Zuchtprogramm steht, braucht es 15 Jahre von der ersten Kreuzung bis zur fertigen Sorte. Also kaufen internationale Firmen, die neu oder erneut in die Züchtung einsteigen, bestehende Firmen auf – so wie es beispielsweise Bayer mit der französischen RAGT jüngst vorgemacht hat. Insgesamt führte diese Strategie des Aufkaufens von kleineren durch grössere Züchtungsfirmen zu einer gewaltigen Umstrukturierung der weltweiten Züchtungsindustrie mit wenigen, grossen Konzernen (Howard 2008). Welche Folgen dies für das Sortenangebot im Einzelnen haben wird, ist schwer vorhersehbar. Da der Wettbewerb aber wie beim Mais gross bleiben wird, könnte zum Vorteil des Weizenproduzenten die Verbesserung der Sorten beschleunigt werden. Schlussendlich zählt für die Praxis nicht der Umfang der Sortenliste sondern der Umfang des Züchtungsfortschritts. >

## Schlussfolgerungen

Bei den Fremdbefruchterarten Mais und Roggen sind Hybriden heute selbstverständlich, Gerste und Weizen holen derzeit auf, aber es wird sicher noch dauern, bis genügend überzeugend robuste und ertragsstarke Hybridsorten für diese beiden Selbstbefruchterarten zur Verfügung stehen. Bei den kleinkörnigen zwitterigen Getreidearten geben Qualität und Preis für die Akzeptanz von Hybridsaatgut den Ausschlag. Männlich sterile Mutter- und Vaterlinien, die bei den Nachkommen die volle Fertilität wieder herstellen, sind hierfür unabdingbar. Zwar besteht für Weizen noch kein verlässliches genetisches System, doch ein in der EU anerkanntes Gametozid

erlaubt nun Hybridsorten auf der Basis chemisch induzierter Pollensterilität. Dies erklärt auch den Wiedereinstieg internationaler Firmen in die Weizenzüchtung, nachdem bereits die Politik deren Vernachlässigung beklagt hat. Hybridsorten werden dann die Landwirtinnen und Landwirte überzeugen, wenn jährlicher Saatgutwechsel ihnen einen finanziellen Mehrertrag vor allem auch durch hohe Ertragssicherheit garantiert. Das Markenzeichen der staatlichen Schweizer Weizenzüchtung ist die Kombination von exzellenter Backqualität mit sehr guter Pflanzengesundheit. Der Einstieg in die Hybridzüchtung ist eine von mehreren Möglichkeiten sich von der Schweiz aus auf nationaler und internationaler Ebene erfolgreich in die neuen Entwicklungen einzubringen. ■

**Riassunto****I cereali da paglia ibridi progrediscono**

Il debole flusso di ritorno degli investimenti nella selezione di varietà tradizionali di cereali autogami, quali il frumento e l'orzo, ne offusca le prospettive per il futuro. Da alcuni decenni, però, si nota in Europa un rinnovo a favore delle varietà ibride. Per le specie allogame come il mais, la colza o la segale, la disponibilità di sistemi genetici ha permesso la produzione di sementi ibridi a buon mercato. Un tale sistema è attualmente disponibile per l'orzo, ma non ancora per il frumento. Per le specie autogame, infatti, è più difficile trovare un effetto evidente dell'eterosi, ossia una prestazione della prole nettamente superiore rispetto a quella dei genitori, perché in queste specie le capacità biologiche sono già ottimizzate. Eppure, si assiste da qualche anno al ritorno delle grandi ditte alla selezione di frumento e orzo. Perché? A livello dei G20, dopo alcuni decenni di disinteressamento, la collaborazione con le grandi ditte di produzione di sementi ha condotto ad una rivalutazione del frumento. Queste ditte investiranno a lungo termine nella selezione solo a condizione che il tasso di rinnovamento delle sementi sia prevedibile. Ciò pone i piccoli programmi di selezione di fronte alla questione di come adattarsi a questa evoluzione.

**Literatur**

- Howard P.H., 2009. Visualizing Consolidation in the Global Seed Industry: 1996-2008. *Sustainability* 1, 1266–1287.
- Khush G.S., 2013. Strategies for increasing the yield potential of cereals: case of rice as an example. *Plant Breeding* 132, 433–436. doi:10.1111/pbr.1991.
- Schachschneider R., 2012. Weizenzüchtung - Tatsachen und Visionen. Zugang: <http://media.repro-mayr.de/94/543694.pdf>, [18.1.2014].

**Summary****Hybrid cereals are progressing**

Low return on investment from breeding licenses has made breeding of self-fertilizing species like wheat and barley less attractive. However, for some decades, the variety types have been changing in Europe, because cytoplasmic male sterile systems of outcrossing species like maize, rape seed and rye exist for the production of affordable hybrid seeds, which have recently been introduced for barley but not for wheat. To produce hybrid seed, two homozygous lines must be crossed. The development of a pure line takes up to seven inbreeding generations. In many cereals, the process can be shortened biotechnologically by regenerating plants from haploid gametes leading to so-called double haploids (DH), which are genetically identical to complete inbred lines. Varieties of self-fertilizing species, such as barley and wheat, are yield optimized inbred lines by definition; therefore, it requires much more investigation to find combinations with increased hybrid vigor for self-fertilizing than for outcrossing species, which usually show great inbreeding depression. However, big international companies have renewed their interest in hybrid wheat breeding, now that even the G20 have realized that the global crop number 1 for food supply, wheat, has become an orphan crop. For big companies, it would be attractive to ensure long-term investments when farmers change seeds annually due to higher yield consistency and solid financial gains – a win-win option. Smaller breeding programs will have to determine when to join this new movement.

**Key words:** wheat breeding, F1 hybride, CMS, gametozid, doppelhaploide (DH).

- Schmid J.E., Winzeler M., Keller B., Büter B., Stamp P. & Winzeler H., 1994. Induction and use of double haploids in wheat and spelt breeding programs. In: *Prospectives of cereal breeding in Europe* (Ed. A. Brönnemann, B. Keller and H. Winzeler). Eucarpia Cereal Section, Landquart, Switzerland, 41–42.
- Stamp P., 2013. Beim Ertrag wenig Fortschritt. *dlz Agrarmagazin* 10, 28–47.