

Wolfgang Friedt<sup>1</sup>, Holger Zetzsche<sup>2</sup>

## Zuchtfortschritt bei Weizen: Ergebnis der Optimierung von Kornertrag, Ertragsicherheit und Qualität

Breeding progress in wheat: Simultaneous improvement of disease resistance, yield and product quality

277

### Zusammenfassung

Die Weizenzüchtung in Deutschland hat in den letzten Jahrzehnten beeindruckende Erfolge erzielt. Zukünftig steht sie jedoch vor erheblichen Herausforderungen, die Erzeugung hochwertiger Nahrungsmittel unter nachhaltigen Produktionsbedingungen zu ermöglichen. Die züchterische Verbesserung des genetischen Ertragspotentials über Jahrzehnte hat einen erheblichen Beitrag zur Steigerung der Weizenerträge geleistet. Eine weitere Steigerung erscheint möglich, der Fokus sollte künftig jedoch noch mehr in der Stabilisierung der landwirtschaftlichen Erträge liegen. Die Verbesserung der Krankheitsresistenz gegen pilzliche Pathogene, Viren und verstärkt auch Insekten bleibt dabei eine dauernde Aufgabe, die durch die eingeschränkte Verfügbarkeit pestizider Wirkstoffe zentrale Bedeutung gewinnen wird. Ein sehr hoher Forschungsaufwand wird nötig sein, die Ertragsstabilität gegen abiotische Stressoren, v.a. Trockenheit und Hitze, zu verbessern. Eine Erhöhung der Nährstoffeffizienz ist Voraussetzung für einen geringeren, umweltschonenden Ressourcenverbrauch, während die hohe Kornqualität zu erhalten ist. Die Studie betont das Potential, welches durch neue Züchtungstechniken für die Integration der zahlreichen Ansprüche besteht und regt an, eine Balance zwischen Risikovorsorge und Innovation zu suchen.

**Stichwörter:** Züchtungsfortschritt, Weizen, Nahrungsmittelsicherheit, Krankheits- und Schädlingsresistenz, Ertragsstabilität, Kornertrag, Korn- und Backqualität

### Abstract

Wheat breeding has achieved impressive successes in Germany in recent decades. In the future, it will however face considerable challenges in enabling the production of high-quality food under conditions of sustainable production. The improvement of genetic yield potential has made a significant contribution to the increase in grain yields. Further increase seems possible, but the future focus should be to enhance yield stability. Improving disease resistance to fungal pathogens, viruses, and increasingly to insect pests remains a permanent task that will gain central importance due to reduced release of pesticide substances. A significant increase in research efforts will be necessary to improve yield stability against abiotic stresses, mainly drought and heat. Moreover, an increase in nutrient efficiency will be a prerequisite for an environment-friendly resource consumption, while high grain quality has to be maintained. The study stresses the potential of the new breeding techniques, such as genome editing, to integrate all these demands through breeding and suggests searching for a balance between risk prevention and innovation.

**Key words:** Breeding progress, wheat, food security, disease and pest resistance, yield stability, grain yield, grain and bread-making quality

### Affiliationen

Justus-Liebig-Universität Gießen, Institut für Pflanzenzüchtung, Gießen<sup>1</sup>  
Julius Kühn-Institut (JKI), Bundesforschungsinstitut für Kulturpflanzen, Institut für Resistenzforschung und Stresstoleranz, Quedlinburg<sup>2</sup>

### Kontaktanschrift

Dr. Holger Zetzsche, Julius Kühn-Institut (JKI), Bundesforschungsinstitut für Kulturpflanzen, Institut für Resistenzforschung und Stresstoleranz, Quedlinburg, E-Mail: holger.zetzsche@julius-kuehn.de

### Zur Veröffentlichung angenommen

8. Oktober 2019

## Einleitung und Hintergrund

Die Erzeugung einer ausreichenden Menge hochwertiger Nahrungs- und Futtermittel ist für Landwirtschaft und Verbraucher gleichermaßen wichtig. Dafür werden ertragsreiche und widerstandsfähige Sorten benötigt, die mit möglichst geringem Mitteleinsatz und im Einklang mit der Umwelt eine wirtschaftliche Pflanzenproduktion ermöglichen. So ist hochwertiges Saatgut Basis für eine Optimierung des nachfolgenden Produktionsmitteleinsatzes und die Erzeugung von wertvollen pflanzlichen Lebens- und Futtermitteln.

In Deutschland wird heute Jahr für Jahr auf mehr als der Hälfte des Ackerlandes Getreide angebaut, darunter Weizen, Gerste, Roggen, Triticale und Hafer. Winterweizen ist mit einem Flächenanteil von 48% (ca. 3,1 Mio. Hektar) die am häufigsten angebaute Getreideart und größte landwirtschaftliche Kultur. Die jährlichen Weizenerten variieren in den letzten Jahren (2013 bis 2017) um die 25 Mio Tonnen (ANONYM, 2019a).

Da Mahl- und Backweizen das wichtigste Brotgetreide ist, kommen züchterische Verbesserungen der Weizensorten nicht allein den Produzenten, sondern auch dem Konsumenten unmittelbar zugute. Gerade bei Weizen als Selbstbefruchter praktizieren nicht wenige Erzeuger den Nachbau von Spitzensorten, statt neues Saatgut einzusetzen. Auf diese Weise bleibt ein Teil des Zuchtfortschritts ungenutzt.

Zudem bringt die Ausdehnung des ökologischen Landbaus auch neue Anforderungen an die Pflanzenzüchtung in Form von zusätzlichen Sortenmerkmalen (Zuchtzielen) mit sich. Um den wachsenden Ansprüchen gerecht zu werden, sind die Einnahmen aus dem Anbau zugelassener Sorten unverzichtbar. Das betrifft nicht allein große Kulturen wie Weizen, sondern verstärkt auch bisher „kleine“ Kulturen wie Körnerleguminosen oder spezielle Ölsaaten, denen im Hinblick auf die geforderte Erweiterung der Fruchtfolge zur Unterstützung von Biodiversität, Bodenfruchtbarkeit und Phytohygiene künftig eine viel größere Bedeutung zukommen soll. Als Basis einer umweltverträglichen und wirtschaftlichen pflanzlichen Erzeugung ist die Züchtung und Bereitstellung neuer Sorten ohne Alternative. Das gilt heute wie auch in der Zukunft ganz besonders für den Weizen als tragender landwirtschaftlicher Kultur.

## Steigerung des Ertragspotenzials

Die Hektarerträge von Winterweizen lagen hierzulande im mehrjährigen Mittel (2012–2017) bei knapp 80 dt/ha (ANONYM, 2019a). Dabei ist der Durchschnittsertrag in der landwirtschaftlichen Praxis bei starker jährlicher Schwankung (bspw. 2015: 81,5 dt/ha, 2018: 67,7 dt/ha) jüngst zurückgegangen, obwohl das Ertragspotenzial der zugelassenen Winterweizensorten in den vergangenen Jahrzehnten doch kontinuierlich gesteigert werden konnte. Im Allgemeinen wird die jährliche Steigerung mit etwa 1% beziffert. (Dabei liegt es auf der Hand, dass

der prozentuale Anstieg mit zunehmendem Ertragsniveau abnimmt). Zwecks Feststellung des genetischen Anteils an der Ertragssteigerung führten AHLEMEYER und FRIEDT (2011) dreijährige, fünförtige Leistungsprüfungen mit 90 deutschen Winterweizensorten durch, die in den Jahren 1966 bis 2007 zugelassen worden waren. Die statistischen Auswertungen zeigten eine genetische Verbesserung des Ertragspotenzials je nach Variante von 0,34 bis 0,38 dt/ha/Jahr. Die spätere Analyse von Wertprüfungsdaten der Getreidearten (LAIDIG et al., 2014) bestätigt den steigenden genetischen versus agronomischen Trend, der insbesondere in der Intensiv- gegenüber der Extensiv-Variante hervortritt. Der abnehmende Zuwachs in den Varianten ohne Pflanzenschutzmitteleinsatz wird durch den Verlust von effektiven Krankheitsresistenzen erklärt; dieser Effekt wird bei Winterweizen immerhin mit 0,29 dt/Jahr beziffert (LAIDIG et al., 2014).

Anhand der Analyse der Daten von 316 Winterweizensorten aus den letzten 32 Jahren haben dann LAIDIG et al. (2017) den erzielten Ertragszuwachs bei Winterweizen mit 24% beziffert, entsprechend einer annualen Steigerungsrate von 0,75%. Man kann also von einem anhaltenden „genetischen Fortschritt“ sprechen.

Weitere Untersuchungen von NOLEPPA und VON WITZKE (2013) zeigen, dass der Ertragsanstieg zu wenigstens 50% durch die Pflanzenzüchtung begründet ist (vgl. auch AHLEMEYER und FRIEDT, 2011, LAIDIG et al., 2014). In den Jahren 1991–2009 konnte so durch die Züchtung ertragsreicherer Eliteweizensorten der Kornertrag in Deutschland um etwa 2,5 Mio t gesteigert werden; dies entspricht dem Jahresbedarf des Landes Polen mit Weizenprodukten. Als Einkommenseffekt resultiert für den o.g. Zeitraum daraus ein Beitrag zum Bruttosozialprodukt Deutschlands von ca. 3,7 Mrd. € (NOLEPPA und VON WITZKE, 2013).

Eine jüngste, umfangreiche Studie im Rahmen des BRIWECS-Projektes anhand von 191 europäischen Weizensorten, die von 1966 bis 2013 zugelassen und aufgrund ihrer agronomischen und wirtschaftlichen Bedeutung ausgewählt wurden, hat gezeigt, dass die Weizenzüchtung über diese Zeitspanne nicht allein die Sortenleistung kontinuierlich steigern konnte, sondern dass auch die Ertragsstabilität in unterschiedlichsten Umwelten und bei Einsatz verschiedener Produktionssysteme deutlich verbessert wurde (vgl. VOSS-FELS et al., 2019).

Nach landläufiger Meinung besitzen Elitesorten als Ergebnis moderner Pflanzenzüchtung zwar ein höheres Ertragspotenzial und übertreffen dabei ältere Sorten; sie können diesen Vorteil aber nur unter „optimalen“ intensiven Anbaubedingungen – d.h. bei hoher Düngung und der Applikation von Pflanzenschutzmitteln – praktisch umsetzen. Dagegen wären sie unter suboptimalen Anbaubedingungen dazu nicht in der Lage. Diese Behauptung wird durch die erwähnte Feldstudie widerlegt (Abb. 1). Wie sich dort gezeigt hat, sind neuere Elitesorten älteren sowohl unter intensiven (Abb. 1, links) als auch unter eher extensiven Bedingungen (Abb. 1, rechts) überlegen (vgl. VOSS-FELS et al., 2019). Zudem ist der Effekt des Sortenalters (Zulassungsjahr) unter allen getesteten Anbau-



**Abb. 1.** Trends bezüglich Kornertragsleistung von 191 Winterweizensorten in Deutschland über einen Zeitraum von 5 Jahrzehnten (Zulassungsjahre 1966 bis 2013 in Europa). Links: N-Düngung 220 kg/ha, ortsübliche Fungizidapplikation; Mitte: N-Düngung 220 kg/ha, keine Fungizidapplikation; Rechts: 110 kg/ha N-Düngung, keine Fungizidapplikation. Ordinate: Kornertrag (t/ha) (VOSS-FELS et al., 2019). Trends in grain yield of 191 winter wheat varieties in Germany over a period of 5 decades (release years 1966 to 2013 in Europe). Left: N supply 220 kg/ha, fungicide application; middle: N supply 220 kg/ha, no fungicides; right: 110 kg/ha N, no fungicides. Ordinate: Grain yield (t/ha) (VOSS-FELS et al., 2019).

situationen etwa gleich stark (Bestimmtheitsmaß 60–69%).

Dabei ist es ganz besonders bemerkenswert, dass im Laufe der Züchtungshistorie eine deutliche Verringerung von nachteiligen oder neutralen Genkombinationen (Haplotypen) eingetreten ist (Bestimmtheitsmaß 46–61%). Vereinfacht gesagt, war die Sortenzüchtung erfolgreich vor allem indem für den Ertrag ungünstige oder indifferente Gene eliminiert oder verringert wurden; selbstredend hat das dann zu einer relativen Zunahme der positiven Genkombination geführt.

**Ausblick:** Die Züchtung neuer Elitesorten leistet einen erheblichen Beitrag zur Steigerung der Erzeugung von Getreide inkl. Weizen in Deutschland. Diesen Fortschritt auf dem erreichten hohen Niveau aufrecht zu erhalten, ist eine große Herausforderung für die Züchtung: Denn einerseits ist es notwendig, die verfügbare genetische Variation ständig zu erweitern. Andererseits sind neben dem Ertrag zahlreiche weitere Merkmale – wie insbes. Krankheits- und Schädlingsresistenzen und zunehmend auch abiotische Stresstoleranz – gleichzeitig zu bearbeiten und zu verbessern.

Die dokumentierten Fortschritte in der Winterweizenzüchtung der letzten Jahrzehnte lassen weitere Steigerungen des Ertragspotenzials möglich erscheinen. Angesichts der schwierigen Umsetzbarkeit maximaler Leistung im Versuchsmaßstab in die landwirtschaftliche Praxis wird es künftig vor allem um eine weitere Verbesserung der Ertragsstabilität gehen; das bedeutet insbesondere: bessere Resistenz gegen Pilzpathogene, Viren und Insekten sowie eine höhere Toleranz gegenüber Umweltstress (Hitze, Dürre, etc.).

## Ausschöpfung des Ertragspotenzials

### Stabile und gesunde Weizensorten durch Krankheitsresistenz

**Pilzpathogene als Schaderreger.** Mit der Ertragssteigerung im Laufe der letzten Jahrzehnte ging eine bemerkenswerte Steigerung der Ertragssicherheit durch bessere Widerstandsfähigkeit gegen die wichtigsten Krankheitserreger einher. Genetisch fixierte Resistenz ist eine wesentliche Komponente des Integrierten Pflanzenschutzes (PS), mit der die Bekämpfung von Krankheiten durch eine Kombination von Sortenresistenz (so viel wie möglich) und chemischem PS (so wenig wie nötig) angestrebt wird. Dieser im Sinne einer Lückenindikation vernünftige und vorgeschriebene Ansatz des Integrierten Pflanzenschutzes (siehe Nationaler Aktionsplan Pflanzenschutz von 2012<sup>1</sup>) wird zunehmend infrage gestellt, da für den PS immer weniger notwendige Wirkstoffe verfügbar sind, weil sie ihre Zulassung verlieren oder Neuzulassungen überhaupt zurückgehen. Eine Wende in der Zulassungspolitik ist indes nicht in Sicht, so dass das nutzbare Spektrum des chemischen PS enger wird. Diese Entwicklung führt ggf. zu weiteren Herausforderungen, da eine raschere Resistenzbildung bei den Pathogenen und Schaderregern gefördert wird und die Wirkstoffe so unwirksam werden können. In dieser Situation kommt der genetischen Sortenresistenz eine wachsende Bedeutung zu. So sind in den letzten Jahren immer mehr resistente Weizensorten durch das Bundessortenamt zugelassen

<sup>1</sup><https://www.nap-pflanzenschutz.de/ueber-den-aktionsplan/lueckenindikationen/>

und in die Beschreibende Sortenliste aufgenommen worden (ANONYM, 2019b). Hier finden sich Einstufungen aller Sorten im Hinblick auf ihre Reaktion gegenüber *Pseudocercospora*, Mehltau, Blattseptoria, DTR, Gelbrost, Braunrost, Ährenfusarium und Spelzenbräune. Es fällt auf, dass sich stark nachgefragte und verbreitete Sorten durch mittlere bis geringe Anfälligkeiten (APS 1–5) gegenüber einer Mehrzahl der Pathogene auszeichnen; auch aktuelle Spitzensorten wie ‚Benchmark‘, ‚Elixer‘, ‚Patras‘, ‚RGT Reform‘ oder ‚Julius‘ zeichnen sich eher durch eine ausgewogene, moderate Widerstandsfähigkeit gegenüber allen Krankheiten aus als durch maximale Resistenz gegenüber einem oder wenigen Pathogenen. Generell gesündere Sorten schneiden in verschiedenen Umwelten besser ab und sind aufgrund des geringeren PSM-Aufwandes und der Vermeidung von Überfahrten auch ökonomisch überlegen.

Zu den Klassikern unter den Pilzpathogenen gehört der Getreidemehltau. Aufgrund der langjährigen Resistenzforschung sind bei Weizen bereits mehr als 60 Mehltaresistenzgene beschrieben worden; wenigstens fünf dieser Genloci konnten bislang kloniert werden: *Pm2*, *Pm3*, *Pm8*, *Pm21*, *Pm60* (ZOU et al., 2018, ZHANG et al., 2018). In der aktuellen deutschen Sortenliste (ANONYM, 2019b) sind 20 Resistenzquellen gegen den Getreidemehltau genannt, die im Laufe der Jahre eingekreuzt wurden und in vielen der aktuell weit über 200 Weizensorten der Beschreibenden Sortenliste vorliegen und unterschiedlich starke Resistenz vermitteln.

Mithin verfügt die Weizenzüchtung über ein großes Reservoir an Resistenzgenen gegen Pilzkrankheiten, von denen eine nennenswerte Zahl aufgrund der intensiven angewandten Züchtungsforschung (Pre-breeding) bereits als adaptierte Resistenzträger für die Züchtung bereitstehen. Zahlreiche Beispiele aus der jüngeren Züchtungshistorie zeigen, wie schnell sich neue Schaderregerrassen ausbreiten und große Ertragseinbußen verursachen können; ein solches Beispiel ist der neue „Warrior“-Stamm des Gelbrosts im Jahre 2011 (verstärkt aufgetreten seit 2014). Hier wird sehr deutlich, wie notwendig breit aufgestellte, systematische und kontinuierliche Pflanzenzuchtprogramme im Interesse einer sicheren, nachhaltigen pflanzlichen Erzeugung sind.

Bislang wurden mehr als 80 Gene für Resistenz gegen Weizengelbrost (*Puccinia striiformis* f. sp. *tritici*) kartiert (GESSESE et al., 2019) und etwa 80 Genloci für Braunrostresistenz (SAPKOTA et al., 2019; siehe auch Tab. 1) identifiziert. Aufgrund der ständigen genetischen Rekombination aufseiten der Pathogene verlieren R-Gene zuweilen ihre Wirksamkeit, wie bspw. die Überwindung der Gelbrost-Resistenzen *Yr1*, *Yr6*, *Yr9* und *Yr32* zeigte. Auch verdeutlicht das starke Auftreten virulenter und anpassungsfähiger Gelbrost-Isolate („Warrior“-Rasse) die Gefährdung durch „neue“ Pathogene und Rassen. Auch wenn nicht wenige der R-Gene in Genclustern vorliegen, so sind zahlreiche andere nicht gekoppelt, somit frei kombinierbar und mithin für die gezielte Resistenzzüchtung gut geeignet. Neben der bewährten rassenspezifischen Resistenz ist die generelle, rassenspezifische Resistenz im Interesse der Dauerhaftigkeit attraktiv. Bezüglich der Getreideroste wird daran seit langem geforscht; bspw. wurden partiell gegen Gelbrost resistente Akzessionen identifiziert, deren Kombination durch Kreuzung zu Nachkommen mit einer stärkeren, möglicherweise dauerhaften Gelbrostresistenz führte (vgl. GESSESE et al., 2019).

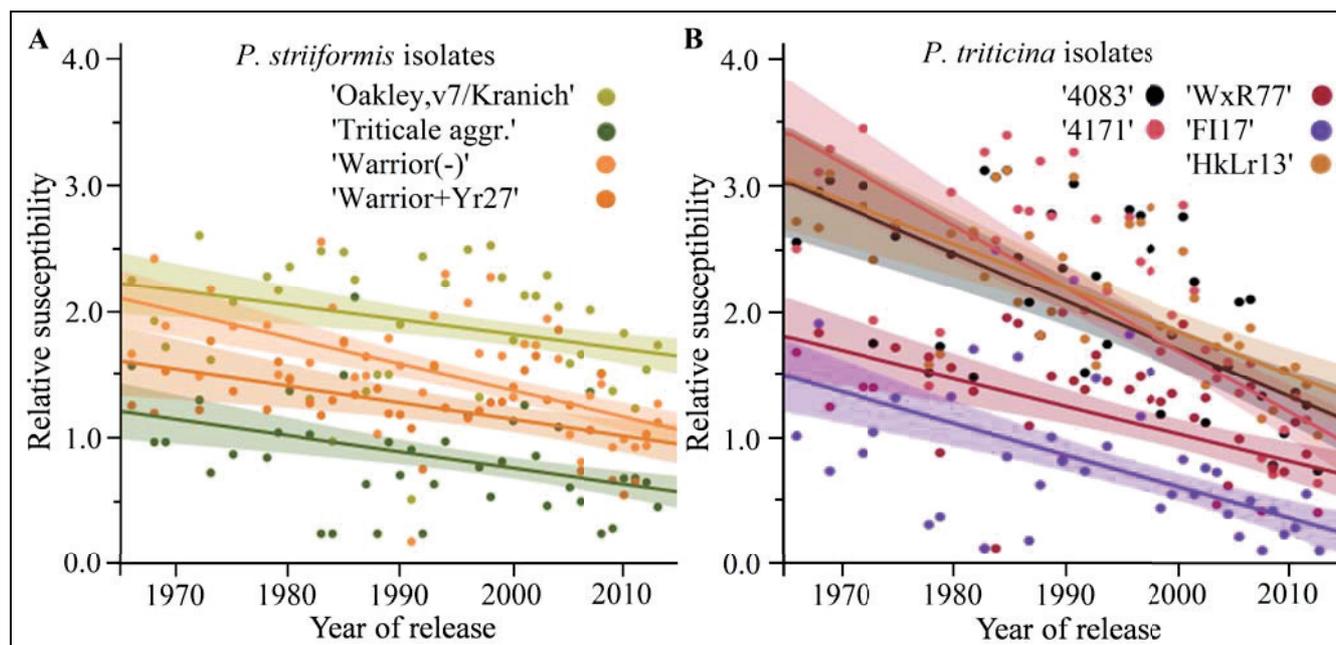
Umfangreiche Resistenztests am JKI Quedlinburg mit fast 200 europäischen Winterweizensorten aus den letzten 50 Jahren (1966 bis 2013) zeigen deutliche Verbesserungen der Resistenz gegen Rostkrankheiten im Laufe dieser Zeitspanne (ZETZSCHE et al., 2019, vgl. Abb. 2 und 3). Betrachtet man die Wirksamkeit definierter Rostressen bei Weizensorten aus den letzten 5 Jahrzehnten, so zeigt sich eine deutliche Wechselwirkung zwischen Weizensorten und Rostisolaten. Einzelne Rassen haben bei jüngeren Sorten mehr als 50% ihrer Virulenz verloren. Es ist bemerkenswert, dass die neuesten Weizensorten grundsätzlich weniger anfällig sind, auch gegen neue Rassen und Rassen mit einer höheren Virulenzkomplexität.

Generell zeigen die Rassenanalysen für beide Roste eine kontinuierliche Verbesserung der Keimlingsresistenz über die betrachteten fünf Jahrzehnte. Die Autoren sehen in Übereinstimmung mit anderen die Tendenz, dass manche R-Gene nach der Überwindung durch neue Rasse(n) eine gewisse Wirksamkeit in Form quantitativer Resistenz behalten.

Tab. 1. Auswahl lokalisierter Resistenzgene des Braunrosts im Weizen genom (aus SINGRÜN, 2002)

Weizen-Chromosom	Bereits lokalisierte Resistenzen
1B	Lr26 (RM <sub>1</sub> ), Lr33 (RM), Lr44 (RM), Lr46 (adulte Resistenz)
2B	Lr13 (RM), Lr16 (RM), Lr23 (RM), Lr35 (aus <i>Ae. speltooides</i> )
6B	Lr3 (RM), Lr9 (RM), Lr36 (aus <i>Ae. speltooides</i> )
2D	Lr2 (RM), Lr15 (RM), Lr22 (adulte Resistenz), Lr39 (aus <i>Ae. tauschii</i> )
3D	Lr24 (RM), Lr32 (aus <i>Ae. tauschii</i> )
6D	Keine Lr Gene bekannt
7D	Lr19 (RM), Lr29 (RM), Lr34 (adulte Resistenz), Lr43 (aus <i>Ae. tauschii</i> )

Lr = Leaf rust; <sub>1</sub> RM = Resistenzmuster



**Abb. 2.** Anfälligkeit von Weizensorten aus den Zulassungsjahren 1966–2013 gegen verschiedene Isolate von Gelbrost (*P. striiformis* (A) und Braunrost (*P. triticina*) (B). Die Geraden zeigen lineare Trends für die relative Anfälligkeit gegen die genannten Isolate, basierend auf den getesteten 191 Winterweizensorten des gesamten Zeitraums, d.h. steigende Resistenzen (ZETZSCHE et al., 2019).  
Susceptibility of winter wheat varieties, released from 1966 to 2013, to various isolates of yellow rust (*P. striiformis*, A) and leaf rust (*P. triticina*, B). Linear trends lines average relative susceptibility of the respective isolates based on the 191 varieties tested, i.e. increasing resistances (ZETZSCHE et al., 2019).

Die darüberhinausgehende, tiefere Erforschung solcher Gene im Hinblick auf ihre Funktion – auch in Wechselwirkung (additiv oder epistatisch) mit anderen Genen – ist jedoch bis heute nicht trivial, insbesondere bei einer Pflanzenart mit einem derartig großen Genom wie Weichweizen. Das bestätigt die vergleichsweise kleine Zahl von R-Genen, die bisher molekular isoliert werden konnten.

Alles in allem kann gesagt werden, dass die Resistenzzüchtung der letzten Jahrzehnte in Europa sehr effektiv und erfolgreich war. Insbesondere ist es gelungen, wirksame Resistenz gegen verschiedene Pathogene – hier vor allem gezeigt an Mehltau und den Rostkrankheiten – in Elitesorten mit hoher Ertragsfähigkeit zu etablieren und so die Ertragssicherheit mit zu bestimmen. Auch bezüglich nekrotrophen Pilzpathogenen wie *Fusarium* spp. und *Septoria* spp. konnten quantitative Verbesserungen erreicht werden. Wegen der besonderen Praxisrelevanz von Krankheitsresistenzen ist die Züchtung hier stets um weitere Fortschritte bemüht.

**Getreideviren.** Als ein sehr eindrucksvolles Beispiel für erfolgreiche Resistenzforschung und -züchtung gegen Viruskrankheiten sind die Gelbmosaikviren der Wintergerste. Bereits in den 1980er und 90er Jahren konnten für die 1978 erstmals in Deutschland nachgewiesenen Gelbmosaikviren eine Reihe von Resistenzträgern identifiziert werden. Inzwischen besitzt die Mehrzahl der deutschen Wintergerstensorten das rezessive *rym4*-Gen, welches Immunität gegen die Viren verleiht. Es herrscht unter Fachleuten Einvernehmen, dass der Anbau von Wintergerste auf verseuchten Flächen in den letzten beiden

Jahrzehnten nur durch den konsequenten Einsatz resistenter Sorten aufrechterhalten werden konnte. Die konsequente Weiterführung der Suche von Resistenzträgern (wie *rym5*) und deren züchterische Nutzung ist jedoch notwendig, um im Falle des Verlustes der Wirksamkeit einzelner Resistenzgene neue Resistenzträger zur Verfügung zu stellen.

Hierzulande kommen die bodenbürtigen Viren Soil-borne wheat mosaic virus (SBWMV), Soil-borne cereal mosaic virus (SBCMV) und Wheat spindle streak mosaic virus (WSSMV) bei Weizen vor. Das SBWMV infiziert Weizen mit hoher Aggressivität und wurde sowohl in Nord- als auch in Süddeutschland nachgewiesen. SBCMV-Isolate verschiedener europäischer Regionen zeigen für Weizen unterschiedliche Aggressivität. Das WSSMV ist weit verbreitet und tritt oft zusammen mit dem SBCMV auf. Im aktuellen Sortiment der zugelassenen Sorten werden ‚KWS Maddox‘, ‚KWS Salix‘, ‚Rebell‘, ‚Ribeck PZO‘ als resistent gegen bodenbürtige Viren (SBWMV, SBCMV, WSSMV) beschrieben (ANONYM, 2019b).

Als weitere Gefahr ist die Weizenverzwergungsvirose (wheat dwarf virus, WDV) zu nennen. Das Virus wird durch Zikaden (*Psammotettix alienus*) übertragen. Über genotypische Resistenz ist bisher wenig bekannt. In einer schwedischen Studie wurden diverse Wildformen der Gattungen *Aegilops* und *Triticum* sowie Kulturweizen auf ihre Reaktion gegen WDV getestet. Trotz der schwierigen Interpretierbarkeit der Ergebnisse geben die Autoren der Hoffnung Ausdruck, dass nutzbare Resistenzen möglicherweise in *Aegilops*-Arten bzw. im D-Genom vorliegen (NYGREN et al., 2015).

**Ausblick:** Pilzpathogene als Krankheitserreger konnten in der Vergangenheit effektiv bekämpft werden – entweder durch den Anbau resistenter Sorten oder mithilfe wirksamer Fungizide. Aufgrund der unzureichenden Zulassung chemischer Pflanzenschutzmittel könnten solche Pilzpathogene wieder eine größere Bedeutung erlangen. Mithin werden genetisch widerstandsfähige Sorten noch mehr benötigt als bislang. Die Suche neuer Resistenzquellen und Erweiterung genetischer Diversität bzgl. Pathogenresistenz ist deshalb eine unverzichtbare Präventivmaßnahme. Zudem drohen auch bei Weizen neue Viruskrankheiten an Bedeutung zu gewinnen, so dass auch in dieser Hinsicht die Züchtungsforschung und Entwicklung resistenter Sorten verstärkt werden müssen.

**Tierische Schaderreger (Insekten).** Schon heute vernichten Schadinsekten nach grober Schätzung bis zu 20% der globalen Ernten. Das betrifft insbesondere tropische und subtropische Gebiete. Neben den bereits hier heimischen Schaderregern werden im Zuge ansteigender Temperaturen auch die gemäßigten Breiten für neu eingewanderte Schadinsekten potentiell geeignete Lebensräume darstellen. Nach Berechnungen von DEUTSCH et al. (2018) steigen die Ernteverluste durch Schadinsekten vor allem in den „gemäßigten Klimazonen“. Ein Anstieg der Durchschnittstemperatur um 2 Grad Celsius könnte dazu führen, dass die Ertragseinbußen bei Weizen in Deutschland um fast 50 Prozent zunehmen.

Grundlage für eine planmäßige Züchtung von Pflanzen, die gegen Befall durch spezifische Schadinsekten resistent bzw. tolerant sind, ist eine genaue Kenntnis der Interaktionen zwischen der Kulturpflanze und dem jeweiligen Schadinsekt. Solche Untersuchungen sind zwar sehr aufwendig, werden aus fachlichen Gründen aber zukünftig unverzichtbar sein; der kritischen Haltung der Öffentlichkeit gegenüber insektiziden Pflanzenschutzmitteln kann hiermit Rechnung getragen werden.

Die Tatsache, dass eine relativ große Zahl von Winterweizensorten bereits als resistent gegen die Orangerote Weizengallmücke beschrieben werden (ANONYM, 2019b<sup>1</sup>), fördert die Erwartung, dass eine effektive Resistenzzüchtung auch gegen weitere Schadinsekten erfolgreich praktiziert werden kann.

**Ausblick:** Die Züchtung von Sorten mit Resistenz oder Toleranz gegen tierische Schaderreger/Insekten ist sehr schwierig und langwierig; einerseits dadurch, dass es an nutzbarer genetischer Variation in Getreidearten und Wildformen mangelt und andererseits wegen der aufwändigen Methodik. In vielen Fällen steht die Resistenzzüchtung hier noch am Anfang, und es erfordert einen hohen Forschungsaufwand, die Interaktionen zwischen Insekten und Pflanzen im Hinblick auf den Schutz der Pflanzen bewerten zu können. Der Fokus liegt vorerst auf der Erforschung von Insekten als Vektoren für Getreideviren, die gerade bei zunehmender Temperatur für auf-

tretende Schäden durch Virusbefall indirekt verantwortlich sind.

### **Nährstoffeffizienz und Toleranz gegen abiotische Stressfaktoren**

**Stickstoffeffizienz.** Angesichts der Restriktionen durch die neue Düngeverordnung, kommt es künftig mehr denn je darauf an, den Stickstoff noch besser zu nutzen und unnötige Stickstoffverluste zu vermeiden. Beispielsweise wird eine Herbst-N-Düngung wie bisher praktiziert nur noch in eingeschränktem Maß möglich sein. Daher kommt es darauf an, die Potenziale der Pflanze zur N-Aufnahme und Verwertung besser auszuschöpfen. Beispielsweise haben mehrjährige englische Untersuchungen anhand von 20 modernen Weizensorten signifikante Unterschiede von Parametern der N-Nutzungseffizienz (NUE) gezeigt: die größten Effekte auf die Ertragsleistung zeigten die Höhe der N-Düngung, das Wachstumsstadium und der Genotyp. Die Ergebnisse deuten an, dass die „Zerlegung“ des komplexen Merkmals NUE und die Nutzung der Merkmalskomponenten ein aussichtsreicher Weg für eine systematische Verbesserung der NUE sein könnten (vgl. HAWKESFORD, 2017).

**Toleranz gegen Hitze und/oder Trockenheit.** Extreme Trockenheit verbunden mit starker Hitze (Dürre) ist in unseren Breiten ein eher neues, aber gerade deswegen sehr ernst zu nehmendes Problem für die Getreideproduktion, das in der Züchtung bislang noch nicht unter den wichtigsten Zuchtzielen rangierte. Weizen scheint gegen Hitze relativ tolerant zu sein, so lange genügend Wasser verfügbar ist (vgl. TRICKER et al., 2018). Nun, da Hitze und Trockenheit aber kombiniert und gehäuft auftreten, wird man sich dem Thema verstärkt zuwenden müssen.

Beobachtungen in der Praxis und in Officialversuchen sprechen dafür, dass es durchaus Sortenunterschiede gibt (vgl. Abb. 3). So hat man in Landessortenversuchen in Niedersachsen solche Differenzierungen beobachtet, bspw. zeigte die Sorte ‚Asory‘ gerade auf Sandböden bei Trockenheit Ertragsvorteile (LEHRKE, 2019). Solche Differenzierungen – sofern sie sich als wirklich heritabel erweisen – gilt es nun in der Neuzüchtung gezielt zu nutzen.

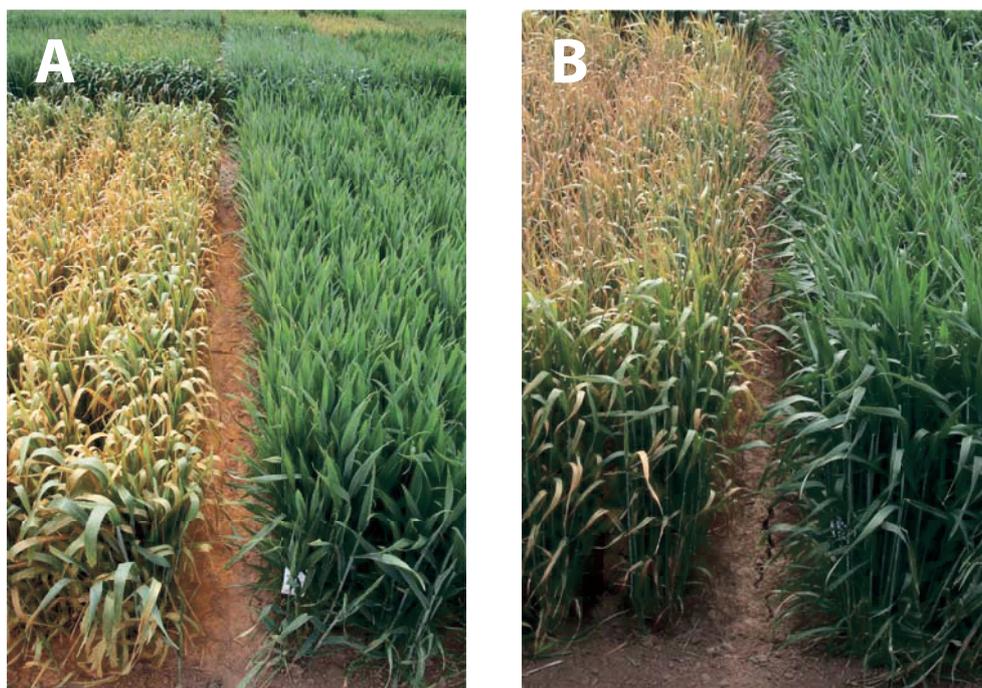
**Ausblick:** Gesunde Weizensorten, die in vielen unterschiedlichen Umwelten eine hohe Anbauwürdigkeit besitzen, werden künftig noch stärker nachgefragt werden. Hier muss die Züchtung frühzeitig einen hohen Forschungs- und Entwicklungsaufwand (Pre-breeding) betreiben, wobei zu beachten ist, dass die Züchtung ertragsstarker Sorten trotz neuer/anderer Schwerpunkte nicht aus dem Blick gerät.

### **Qualitätsweizen**

#### **Ziele und Fortschritte in der Mahl- und Backqualität**

Die jährliche deutsche Weizenproduktion belief sich im letzten Jahrzehnt auf durchschnittlich ca. 25 Mio Tonnen

<sup>1</sup>Alexander<sup>1</sup>, Franz<sup>2</sup>, Hyena<sup>3</sup>, Johnny<sup>4</sup>, Kometus<sup>5</sup>, Kredo<sup>6</sup>, KWS Loft<sup>7</sup>, KWS Smart<sup>8</sup>, Lear<sup>9</sup>, Lemmy<sup>10</sup>, LG Initial<sup>11</sup>, LG Kopernicus<sup>12</sup>, LG Mocca<sup>13</sup>, Partner<sup>14</sup>, RGT Aktion<sup>15</sup>, Rockefeller<sup>16</sup>, Sheriff<sup>17</sup>, Tobak<sup>18</sup>



**Abb. 3.** Vergleich einer Gelbrost-anfälligen Sorte von 1981 (A, links) mit einer weitgehend resistenten Sorte (Zulassung 2013; A, rechts) und einer Trockenstress-anfälligen Sorte (Zulassung 1971; B, links) mit einer Trockenstresstoleranteren Sorte (Zulassung 1990; B, rechts) im Feldversuch des BRIWECS-Projektes (Voss-Fels et al., 2019).

*A Comparison between a susceptible variety, released 1981, with a variety largely resistant to stripe rust from 2013. B: Different response to spring drought between a susceptible variety, released 1971, and a tolerant variety released 1990, in a field trial of the BRIWECS project (Voss-Fels et al., 2019).*

(Min. 20 Mio t/2018, 27 Mio t/2014<sup>1</sup>), wovon etwa ein Drittel als Brotweizen und etwa die Hälfte als Futterweizen Verwendung findet. Daraus resultiert der Bedarf einer entsprechenden Kornqualität, d.h. insbesondere ein hoher Proteingehalt und eine geeignete Proteinzusammensetzung. Der Selbstversorgungsgrad für Weizen variierte in Deutschland in den letzten Jahren zwischen 120 und 140% (ANONYM, 2019c). Mahlweizen mit guten Backeigenschaften musste bis in die 1970er Jahre noch aus Übersee importiert werden (bspw. „Manitoba-Weizen“, d.h. Sommerhartweizen aus Kanada). Ab Mitte der 70er Jahre haben deutsche Züchter dann Sorten entwickelt, die gute Erträge mit hoher Backqualität kombinieren und die einheimische Versorgung mit Backweizen möglich machten. Erste E-Weizensorten, die insbesondere für den Export eine hohe Bedeutung haben, wurden in Deutschland erst seit den 1990er Jahren registriert. Sie sind gegenüber A-Weizen durch höchste Qualität charakterisiert: Protein min. 14% (A-Weizen 13%) (seit 2019 nicht mehr Teil der Qualitätseinstufung des Bundessortenamtes), Fallzahl min. 270 (250), HL-Gewicht min. 78 (77), Sedimentation 50–60 (35–40).

Die Back- und Mühlenindustrie stellt hohe Anforderungen an eine gleichbleibende Qualität. Der Erfassungshandel betrachtet jedoch primär den Rohproteingehalt als wichtigstes Qualitäts- und Handelskriterium für die Backqualität. Die dafür in der Regel notwendige Stickstoffspätdüngung zur Kornfüllung werden nicht erst seit der im Jahre 2017 in Kraft getretenen novellierten Düngeverordnung (DüVO) kritisch gesehen. Zwar scheinen sich die anfänglichen Befürchtungen eines Rückgangs der

Proteingehalte derzeit nicht zu bewahrheiten, jedoch ist ohne Anpassungsmaßnahmen im Düngungsregime mit einem Rückgang der mittleren Rohproteingehalte von Backweizen im Bereich von 0,2 bis 0,3% zu rechnen, wenn der Nmin-Gehalt im Boden entsprechend reduziert wird. Dieser Abfall wird bei hohen Erträgen höher sein als bei mittlerem Ertragsniveau, wie einschlägige Erfahrungen belegen. Hier bietet die Züchtung vermehrt Sorten, die eine gute Backqualität mit niedrigeren Proteingehalten, aber verbesserter Proteinzusammensetzung (HMW) erzielen können. Bislang wird dies durch den Erfassungshandel noch nicht honoriert, der Bedarf wird auf Grund der bisherigen und zukünftigen Anpassungen am Düngemittelrecht aber auch hier weiter steigen. Einen ersten Schritt stellt hier die 2019 erfolgte Änderung der Qualitätseinstufung (E bis C-Weizen) durch das Bundessortenamt dar. Seit diesem Jahr wird der Proteingehalt nur noch beschrieben, nicht aber in der Qualitätseinstufung verrechnet.

**Ausblick:** Auf Grund der notwendigen Steigerung der Effizienz in der Düngung und Nährstoffversorgung wird die Nachfrage nach Sorten mit noch besserer Stickstoffeffizienz weiter zunehmen. Dabei werden Qualitätsweizensorten, die bei einem geringeren Rohproteingehalt und einer besseren Proteinzusammensetzung (Gliadin/Glutenin-Verhältnis) trotzdem sehr gute Backvolumina erreichen, höchstwahrscheinlich an Bedeutung gewinnen.

### **Neue Anforderungen an Qualitätsweizen für die Ernährung**

Anhand der Wertprüfungsdaten von über 300 Winterweizen-Sorten aus amtlichen Prüfungen des Bundessortenamtes der Jahre 1983 bis 2015 wurde eine kontinuier-

<sup>1</sup><https://de.statista.com/statistik/daten/studie/262303/umfrage/erntemenge-von-weizen-in-deutschland/>

liche Steigerung des Ernteertrages dokumentiert (siehe oben). Und nicht nur das: wie LAIDIG et al. (2017) gezeigt haben, wurden neben der Steigerung des Kornertrages um 24% gleichzeitig auch maßgebliche Qualitätsparameter verbessert. In den Exaktversuchen zeigten sich die Fallzahl (5,8% besser) ebenso wie der Sedimentationswert (7,9%) sowie die Kornhärte (13,4%), Wasseraufnahme (1,2%) und Mehlausbeute (2,4%) gegenüber 1983 verbessert, während eine Reduktion des Proteingehaltes (-8,0%) und des Backvolumens (-8,5%) festgestellt wurde; weitere Details wie Proteinfraktionen wurden hier nicht erfasst. Für die einzelnen Parameter wurden die genetischen versus nicht-genetischen Varianzanteile bestimmt, um die erblichen Anteile an der Veränderung der einzelnen Merkmale zu berechnen (LAIDIG et al., 2017) – wichtige Parameter im Hinblick auf künftige züchterische Verbesserungen.

Es ist seit langem bekannt, dass die Vorratsproteine im Weizenkorn maßgeblich für seine Mahl- und Backeigenschaften sind. Dabei zeigen neuere Untersuchungen, dass weniger das Gesamtprotein entscheidet. Vielmehr sind bestimmte Proteinkomponenten maßgeblich: Gliadine und Glutenine – und zwar sowohl bei Weichweizen als auch bei Dinkel, Einkorn, und Emmer. Die Gliadine korrelieren negativ mit dem Backvolumen, Glutenine dagegen positiv und hochmolekulare Gluteninfraktionen sogar stark positiv mit dem Volumen (GEIßLITZ et al., 2019). Für eine genaue Bestimmung der Fraktionen bietet sich die HPLC-Analytik an, aber es stehen heute auch schnelle und zuverlässige Vorhersagemethoden zur Verfügung, wie von GEIßLITZ et al. (2019) beschrieben. Da die Glutenine durch eine hohe Heritabilität gekennzeichnet sind (BILGIN et al., 2015), dürfte die anzustrebende Steigerung dieser Fraktion im Sinne einer weiteren Verbesserung der Mahl- und Backqualität von Weizen aussichtsreich sein.

Weizen ernährt zwar die Welt, wird aber immer häufiger auch für Unverträglichkeit verantwortlich gemacht. Aktuell werden drei Inhaltsstoffe als Ursache dafür diskutiert:

- das Gluten als Vorratsprotein, das zwar für hervorragende Backeigenschaften unverzichtbar ist, aber als Eiweiß auch ein starkes Allergen darstellt (Nicht-Zöliakie-Glutensensitivität, vgl. CZAJA-BULSA, 2015);
- die Amylase-Trypsin-Inhibitoren (ATI), ganz andere Proteine, die für Darmentzündungen verantwortlich gemacht werden (ZEVALLOS et al., 2017), die aber andererseits bei der Kontrolle der Keimung und des Wachstums der Pflanzen eine Rolle spielen;
- und schließlich die FODMAPs, das sind unterschiedliche Zucker und mehrwertige Zuckeralkohole, die ebenfalls als Ursache für die beklagte Unverträglichkeit genannt werden (GIBSON und SHEPHERD, 2010).

Darüber hinaus wird von Praktikern auch die Vermutung geäußert, dass die völlig veränderten Verfahren der Teig- und Brotbereitung – insbesondere Ruhe- und Gehzeiten des Teiges – nicht allein die Backfähigkeit und technische

Gebäckqualität, sondern auch die Verträglichkeit des Weizens und der hergestellten Erzeugnisse bestimmen können.

**Ausblick:** Die Auswertungen zur Entwicklung der Ertrags- und Qualitätsmerkmale in den zurückliegenden Jahrzehnten liefern wichtige Anhaltspunkte für künftige Optimierungsmöglichkeiten. Zudem wird in jüngerer Zeit wieder verstärkt über Weizenprodukte als Ursachen gesundheitlicher Beschwerden („Reizdarmsyndrom“) diskutiert. Derzeit ist die Kausalanalyse nicht über die Beschreibung unterschiedlicher Ursachen (Glutein/ATI/FODMAPs) hinausgekommen. Im Sinne einer Vorsorgestrategie sollten die Berichterstattung über Ursachen und Wirkungen jedoch aufmerksam verfolgt werden, um ggf. zeitig auf neue Qualitätsanforderungen durch Züchtung reagieren zu können.

### Neue Züchtungsmethoden und andere Herausforderungen

Mit der vom Europäischen Gerichtshof (EuGH) im Jahr 2018 vorgenommenen gentechnikrechtlichen Einordnung neuer Pflanzenzüchtungsmethoden und den damit verbundenen Auflagen stehen der europäischen Landwirtschaft und dabei vor allem der mittelständischen Züchtungswirtschaft wichtige methodische Werkzeuge vorläufig nicht zur Verfügung, die eine gezieltere und effektive Züchtung auf spezielle Merkmale – insbesondere Resistenz- und Qualitätseigenschaften – ermöglicht hätten. Als eindrucksvolles Beispiel sei hier des *mlo*-Mehltauresistenzgen der Gerste genannt, das in den *Mlo*-Genen des A-, B- und D-Genoms des Weizens lokalisiert und durch CRISPR/Cas-Mutationen künstlich induziert werden konnte (WANG et al., 2014).

Bekanntlich sind diese Techniken dagegen in vielen anderen Staaten als unbedenklich und nicht den Gentechnikregelungen unterliegend eingestuft worden (DUENSING et al., 2018). Die Folge ist zunächst eine erhebliche Wettbewerbsverzerrung, die sich im internationalen Vergleich für die einheimische Züchtungswirtschaft negativ auswirken kann und vermutlich zu (vorerst unabsehbaren) wirtschaftlichen Verlusten führen wird. Auch der Züchtervorbehalt wird eingeschränkt, da auf eine Verwendung genetischer Ressourcen aus Regionen, in denen diese Methoden verwendet werden dürfen, möglicherweise verzichtet werden muss.

**Ausblick:** Neue biotechnologische Werkzeuge wie das *Genome Editing* haben das Potenzial, die Effizienz der Pflanzenzüchtung im Hinblick auf den Zeitbedarf (und damit vermutlich auch der Kosten) wesentlich zu verbessern. Die Editierung einzelner funktionaler Gene ermöglicht eine bisher nicht gekannte, gezielte Erweiterung der genetischen Variabilität als einer unverzichtbaren Voraussetzung für erfolgreiche Züchtung. Es ist daher angebracht, eine vernünftige Balance zwischen Vorsorge und Innovation zu suchen und auf dieser Basis umsetzbare Regeln für den Einsatz in der Züchtung zu definieren. Die notwendige Risikoforschung und Sicherheitsregulierung

muss auf der Basis wissenschaftlicher Erkenntnisse ins rechte Verhältnis zum Bedarf an Lebens- und Futtermitteln und den Kosten für deren adäquate Produktion gesetzt werden. Hierbei ist eine internationale Harmonisierung und Regulierung anzustreben.

## Danksagung

Wir danken Franz BEUTL und Dennis HEHNEN, Bundesverband Deutscher Pflanzenzüchter e.V. Bonn, für die kritische Durchsicht des Manuskriptes.

## Literatur

- AHLEMEYER, J., W. FRIEDT, 2011: Progress in winter wheat yield in Germany – what's the share of the genetic gain? Tagungsband der 61. Jahrestagung der Vereinigung der Pflanzenzüchter und Saatgutkaufleute Österreichs, 23–25 November 2010, Raumberg-Gumpenstein, Österreich. Ertrag vs. Qualität bei Getreide, Öl und Eiweisspflanzen. Wheat stress, 61, 19–24, ISBN: 9783902559531.
- ANONYM, 2019a: Besondere Ernte- und Qualitätsermittlung 2018 (ISSN 0178 – 899 X). Hrsg. Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL). Zugriff: 10.09.2019, URL: <https://www.bmel-statistik.de/fileadmin/daten/EQB-1002000-2018.pdf>.
- ANONYM, 2019b: Beschreibende Sortenliste Getreide, Mais, Öl- und Faserpflanzen, Leguminosen, Rüben, Zwischenfrüchte 2018. Hrsg. Bundessortenamt, Hannover. Zugriff: 02. September 2019, URL: [https://www.bundessortenamt.de/bsa/media/Files/BSL/bsl\\_getreide\\_2018.pdf](https://www.bundessortenamt.de/bsa/media/Files/BSL/bsl_getreide_2018.pdf).
- ANONYM, 2019c: Bericht zur Markt- und Versorgungslage Getreide 2018. Hrsg. Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung (BLE). Zugriff: 10. September 2019, URL: [https://www.ble.de/SharedDocs/Downloads/DE/BZL/Daten-Berichte/Getreide\\_Getreideerzeugnisse/Wirtschaftsjahr2017\\_2018/Markt\\_Versorgungslage\\_Getreide\\_2018.html](https://www.ble.de/SharedDocs/Downloads/DE/BZL/Daten-Berichte/Getreide_Getreideerzeugnisse/Wirtschaftsjahr2017_2018/Markt_Versorgungslage_Getreide_2018.html).
- BILGIN, O., C. GUZMAN, I. BASER, J. CROSSA, K.Z. KORKUT, 2015: Evaluation of grain yield and quality traits of bread wheat genotypes cultivated in Northwest Turkey. Crop Sci 56 (1), 73–84, DOI: 10.2135/cropsci2015.03.0148.
- CZAJA-BULSA, G., 2015: Non coeliac gluten sensitivity – A new disease with gluten intolerance. Clinical Nutrition 34, 189–194, DOI: 10.1016/j.clnu.2014.08.012.
- DEUTSCH, C.A., J.J. TEWKSBURY, M. TIGCHELAAR, D.S. BATTISTI, S.C. MERRILL, R.B. HUEY, R.L. NAYLOR, 2018: Increase in crop losses to insect pests in a warming climate. Science 361 (6405), 916–919, DOI: 10.1126/science.aat3466.
- DUENSING, N., T. SPRINK, W.A. PARROTT, M. FEDOROVA, M.A. LEMA, J.D. WOLT, D. BARTSCH, 2018: Novel features and considerations for ERA and regulation of crops produced by genome editing. Front. Bioeng. Biotechnol. 6, 79, DOI: 10.3389/fbioe.2018.00079.
- GEIßLITZ, S., A.K. SCHERF, P. KÖHLER, 2019: Proteine im Getreide und die Backeigenschaften. Nachrichten aus der Chemie 67 (1), 38–40, DOI: 10.1002/nadc.20194082916.
- GESSESE, M., H. BARIANA, D. WONG, M. HAYDEN, U. BANSAL, 2019: Molecular mapping of stripe rust resistance gene *Yr81* in a common wheat landrace Aus27430. Plant disease, 103 (6), 1166–1171, DOI: 10.1094/PDIS-06-18-1055-RE.
- GIBSON, P.R., S.J. SHEPHERD, 2010: Evidence-based dietary management of functional gastrointestinal symptoms: The FODMAP approach. J Gastroenterol Hepatol. 25 (2), 252–258. DOI: 10.1111/j.1440-1746.2009.06149.x.
- HAWKESFORD, M.J., 2017: Genetic variation in traits for nitrogen use efficiency in wheat. Journal of Experimental Botany 68 (10), 2627–2632, DOI: 10.1093/jxb/erx079.
- LÄIDIG, F., H.-P. PIEPHO, T. DOBEK, U. MEYER, 2014: Genetic and non-genetic long-term trends of 12 different crops in German official variety performance trials and on-farm yield trends. Theor Appl Genet 127 (12), 2599–2617, DOI: 10.1007/s00122-014-2402-z.
- LÄIDIG, F., H.-P. PIEPHO, D. RENTEL, T. DROBEK, U. MEYER, A. HUESKEN, 2017: Breeding progress, environmental variation and correlation of winter wheat yield and quality traits in German official variety trials and on-farm during 1983–2014. Theor Appl Genet 130 (1), 223–245, DOI: 10.1007/s00122-016-2810-3.
- LEHRKE, U., 2019: Winterweizen: Klimawandel bei der Sortenwahl berücksichtigen. Getreidemagazin 25 (4), 43–47.
- NOLEPPA, S., H. VON WITZKE, 2013: Die gesellschaftliche Bedeutung der Pflanzenzüchtung in Deutschland. Einfluss auf soziale Wohlfahrt, Ernährungssicherung, Klima- und Ressourcenschutz. Humboldt Forum for Food and Agriculture eV (HFFA), Berlin, Deutschland, HFFA Working Paper 02/2013. Zugriff: 10. September 2019, URL: [http://www.bdp-online.de/de/Service/Download-Center/GFP\\_Studie\\_Bedeutung\\_der\\_Pflanzenzuechtung\\_in\\_Deutschland.pdf](http://www.bdp-online.de/de/Service/Download-Center/GFP_Studie_Bedeutung_der_Pflanzenzuechtung_in_Deutschland.pdf).
- NYGREN, J., N. SHA, A. KVARNHEDEN, A. WESTERBERGH, 2015: Variation in susceptibility to wheat dwarf virus among wild and domesticated wheat. PLOS ONE 10 (4), e0121580, DOI: 10.1371/journal.pone.0121580.
- SAPKOTA, S., Y. HAO, J. JOHNSON, B. LOPEZ, D. BLAND, Z. CHEN, S. SUTTON, J. BUCK, J. YOUNG, M. MERGOUN, 2019: Genetic mapping of a major gene for leaf rust resistance in soft red winter wheat cultivar AGS 2000. Molecular Breeding 39, 8, DOI: 10.1007/s11032-018-0909-8.
- SINGRÜN, C., 2002: Untersuchungen zur Lokalisierung und Kartierung von Genen für Resistenz gegen Mehltau und Braunrost in Saatweizen (*Triticum aestivum* L.) und Dinkel (*Triticum spelta* L.). Diss. Fachgebiet für Pflanzenzüchtung und Angew. Genetik, TU München – Freising-Weihenstephan. Zugriff: 18. September 2019, URL: <https://mediatum.ub.tum.de/?id=603331>.
- TRICKER, P.J., A. ELHABTI, J. SCHMIDT, D. FLEURY, 2018: The physiological and genetic basis of combined drought and heat tolerance in wheat. Journal of Experimental Botany 69 (13), 3195–3210, DOI: 10.1093/jxb/ery08.
- VOSS-FELS, K.P., A. STAHL, B. WITTKOP, C. LICHTHARDT, S. NAGLER, T. ROSE, T.-W. CHEN, H. ZETZSCHE, S. SEDDIG, M.M. BAIG, A. BALLVORA, M. FRISCH, E. ROSS, B.J. HAYES, M.J. HAYDEN, F. ORDON, J. LEON, H. KAGE, W. FRIEDT, H. STÜTZEL, R.J. SNOWDON, 2019: Breeding improves wheat productivity under contrasting agrochemical input levels. Nature Plants 706 (5), 706–714, DOI: 10.1038/s41477-019-0445-5.
- WANG, Y., X. CHENG, Q. SHAN, Y. ZHANG, J. LIU, C. GAO, J.L. QU, 2014: Simultaneous editing of three homoeoalleles in hexaploid bread wheat confers heritable resistance to powdery mildew. Nature Biotechnology 32, 947–951, DOI: 10.1038/nbt.2969.
- ZEVALLLOS, V.F., V. RAKER, S. TENZER, C. JIMENEZ-CALVENTE, M. ASHFAQ-KHAN, N. RÜSSEL, G. PICKERT, H. SCHILD, K. STEINBRINK, D. SCHUPPAN, 2017: Nutritional wheat amylase-trypsin inhibitors promote intestinal inflammation via activation of myeloid cells. Gastroenterology 152 (5), 1100–1113.e12, DOI: 10.1053/j.gastro.2016.12.006.
- ZETZSCHE, H., A. SERFLING, F. ORDON, 2019: Breeding progress in seedling resistance against various races of stripe and leaf rust in European bread wheat. Crop Breed Genet Genom 1 (2), e190021, DOI: 10.20900/cbpg20190021.
- ZHANG, R., Y. FAN, L. KONG, Z. WANG, J. WU, L. XING, A. CAO, Y. FENG, 2018: *Pm62*, an adult-plant powdery mildew resistance gene introgressed from *Dasyphyrum villosum* chromosome arm 2VL into wheat. Theor Appl Genet 131, 2613, DOI: 10.1007/s00122-018-3176-5.
- ZOU, S., H. WANG, Y. LI, Z. KONG, D. TANG, 2018: The NB?LRR gene *Pm60* confers powdery mildew resistance in wheat. New Phytol 218 (1), 298–309, DOI: 10.1111/nph.14964.

© Der Autor/Die Autorin 2019.

 Dies ist ein Open-Access-Artikel, der unter den Bedingungen der Creative Commons Namensnennung 4.0 International Lizenz (CC BY 4.0) zur Verfügung gestellt wird (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.de>).

© The Author(s) 2019.

 This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 International License (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.en>).