

Thilo Hammann

Inwertsetzung wilder Verwandter der Kartoffel zur Entwicklung von genetisch erweitertem Keimplasma mit verbesserter Resistenz gegen die Kraut- und Knollenfäule (*Phytophthora infestans*)

Use of Crop Wild Relatives for Genetic Enhancement of Potato Germplasm with Improved Resistance to Late Blight (*Phytophthora infestans*)

285

Zusammenfassung

Der Erreger der Kraut- und Knollenfäule (*Phytophthora infestans*) gefährdet weltweit den Anbau von Kartoffeln und erzwingt den intensiven Einsatz von Fungiziden. Der Erreger ist genetisch sehr anpassungsfähig, so dass er rassenspezifisch wirksame Resistenzgene der Kartoffel schnell überwinden kann. Einen nachhaltigeren Lösungsansatz bietet die verstärkte züchterische Nutzung von *Solanum*-Wildarten des sekundären Genpools als Genressourcen für quantitative Resistenzen. Die genetische Erweiterung der Kulturkartoffel mit Hilfe exotischer Genressourcen ist ein langwieriger Prozess, der eines kontinuierlichen Engagements bedarf. Die Ergebnisse aus der Prebreeding-Arbeit des Julius Kühn-Instituts (JKI) zeigen, dass es auf diese Weise gelingen kann, ein hohes Maß an quantitativer *Phytophthora*-Resistenz mit früherer Abreife und akzeptablen Qualitätseigenschaften zusammenzuführen.

Stichwörter: Kartoffel, *Phytophthora infestans*, *Solanum*-Wildarten, quantitative Resistenz, Qualität, pflanzen-genetische Ressourcen

Abstract

Potato is among the most important food crops worldwide. Production of potatoes is threatened by late blight

(*Phytophthora infestans*), a pathogen which constrains intensive chemical plant protection every season. Use of race-specific resistance genes from the primary genepool is no solution since the genetically adaptive pathogen quickly overcomes this type of resistance. A more sustainable approach appears to be using wild *Solanum* species from the secondary genepool as a genetic resource of quantitative resistance in potato breeding. Genetic enhancement of potato germplasm via introgressive pre-breeding is a time-consuming process which requires continuous commitment. Results obtained from the potato pre-breeding programme at the Julius Kühn-Institut (JKI) demonstrate that it is feasible to combine high degrees of quantitative late-blight resistance with earlier maturation and acceptable quality characters.

Key words: Potato, *Phytophthora infestans*, *Solanum* species, quantitative resistance, quality, plant genetic resources

Einleitung

Die Kulturkartoffel (*Solanum tuberosum* L.) gehört neben Mais, Reis und Weizen weltweit zu den vier bedeutendsten Nahrungspflanzen. In der Kohlenhydratproduktion je Flächen- und Zeiteinheit ist die Kartoffel allen anderen Ackerkulturen überlegen (WOOLFE, 1996). Die Sortenvielfalt bei der Kartoffel ist groß. In der Beschreibenden

Institut

Julius Kühn-Institut – Bundesforschungsinstitut für Kulturpflanzen, Institut für Züchtungsforschung an landwirtschaftlichen Kulturen, OT Groß Lüsewitz, Sanitz

Kontaktanschrift

Dr. Thilo Hammann, Julius Kühn-Institut, Bundesforschungsinstitut für Kulturpflanzen, Institut für Züchtungsforschung an landwirtschaftlichen Kulturen, Rudolf-Schick-Platz 3a, OT Groß Lüsewitz, 18190 Sanitz, E-Mail: thilo.hammann@jki.bund.de

Zur Veröffentlichung angenommen

17. Mai 2013

Sortenliste sind derzeit 205 Kartoffel-Sorten aufgeführt (BUNDESSORTENAMT, 2012). Trotz dieser Vielfalt gibt es aber Defizite in der Widerstandsfähigkeit gegenüber der Kraut- und Knollenfäule und Verbesserungsbedarf in der Nachhaltigkeit der Produktionsbedingungen. Wesentliche Beiträge zur Verbesserung der Nachhaltigkeit im Kartoffelbau müssen durch die Eigenschaften, die die Kulturpflanze mit sich bringt, geleistet werden. Hierzu ist die genetische Erweiterung des züchterisch adaptierten Genpools (Keimplasma) durch Züchtungsforschung und ihre praktische Nutzung durch die Sortenzüchtung erforderlich.

Die genetische Basis der Kulturkartoffel (*Solanum tuberosum* subsp. *tuberosum*) ist eng und wurde durch die *Phytophthora*-Epidemien in den 40er Jahren des 19. Jahrhunderts noch zusätzlich reduziert (HAWKES, 1967). Daher wird versucht, mit Hilfe von Einkreuzungen aus wilden Verwandten, d.h., anderen *Solanum*-Arten, die genetische Basis zu erweitern (CAROLL, 1982; DARSOW, 2008; HAMMANN et al., 2009; THIEME et al., 2010).

Wild- und Primitivformen der Kartoffel zeigen eine hohe genetische Diversität und bieten als potenzielles Genreservoir die Chance, den Genpool der Kulturkartoffel im Hinblick auf Widerstandsfähigkeit gegen Krankheiten und Schädlinge oder Toleranz gegen abiotischen Stress zu erweitern. Ein Beispiel ist *Solanum demissum*, eine hexaploide mexikanische Art des sekundären Genpools mit Widerstandsfähigkeit gegen die Kraut- und Knollenfäule, die bislang am häufigsten als Resistenzquelle genutzt wurde. Diese und weitere Wildarten tragen Resistenzen gegen eine Reihe viröser, pilzlicher und bakterieller Erkrankungen, ebenso wie Resistenzen gegen Nematoden und Schadinsekten. Auch heute werden durch die Züchtungsforschung immer noch neue Resistenzen und andere interessante Eigenschaften in Wildarten entdeckt, zumal sich geografische Herkünfte und Genbankakzessionen derselben Wildart in ihren Genvarianten und Eigenschaften durchaus unterscheiden.

Die meisten der bekannten 188 *Solanum*-Wildarten, von denen bisher nur wenige als Genressource für die genetische Erweiterung des Kartoffel-Genpools genutzt werden, haben ihre ursprünglichen Habitate vom Südwesten der USA bis nach Zentral-Chile und das angrenzende Argentinien (HOUGAS und PELOQUIN, 1957; PELOQUIN et al., 1990; ROSS, 1986).

Die Kraut- und Knollenfäule der Kartoffel (Abb. 1 und 2), verursacht durch den Oomyceten *Phytophthora infestans* (Mont.) de Bary, ist die bedeutendste Krankheit der Kartoffel weltweit und verursacht, trotz der Entwicklung wirkungsvoller Fungizide, beträchtliche Kosten. Der jährliche Fungizidaufwand für die Kraut- und Knollenfäulebekämpfung wird für Europa auf 150 Millionen US\$ geschätzt. Bekämpfungskosten und verbleibende Ertragschäden belaufen sich in Ländern mit intensiver Kartoffelproduktion wie Dänemark, Deutschland oder den Niederlanden auf etwa 750 €/ha (HAVERKORT et al., 2008). In den USA, Europa und den Entwicklungsländern werden insgesamt ca. 1,3 Mrd. US\$ jährlich allein für Fungizide zur Bekämpfung der Kraut- und Knollenfäule aufgewendet (FORBES und LANDEO, 2006). Dennoch ist die Schädigung von *P. infestans* in Form von Produktionsverlust beträchtlich; eine für Entwicklungsländer angestellte Schätzung ergab jährliche Produktionsverluste im Wert von 2,75 Mrd. US\$ (ANONYMOUS, 1996). Die Verbesserung der Widerstandsfähigkeit von Kartoffeln gegen *P. infestans* ist somit eine relevante Aufgabe im Zusammenhang mit der Sicherung der Welternährung.

Die Pathogenpopulation von *P. infestans* in Europa zeigt seit Mitte der 1970er Jahre eine höhere Diversität. So wird neben dem verbreiteten A1- nun auch verstärkt der A2-Paarungstyp nachgewiesen, und es gibt Beweise für sexuelle Reproduktion und genetische Rekombination zu neuen Erregerrassen. Die Folge ist eine schnellere Anpassung des Erregers an veränderte Umweltbedingungen (HJMANS und SPOONER, 2001).



Abb. 1. Befall mit Krautfäule.



Abb. 2. Befall mit Knollenfäule.

Bislang bekannt gewordene neue Erregerassen sind gekennzeichnet durch

- höhere Aggressivität;
- breitere Temperaturtoleranz für die Fortpflanzung;
- schnellere Nekrosebildung;
- stärkere Sporangienbildung;
- deutlich verkürzte Latenzzeit von 3–5 Tagen gegenüber 5–7 Tagen;
- mehr Generationszyklen pro Jahr.

Die hohe Anpassungsfähigkeit des Erregers verdeutlicht, dass die Resistenzzüchtung gegen das Pathogen auch nach mehr als 130 Jahren von hoher Aktualität ist.

Zur Resistenzverbesserung des Zuchtmaterials wurden immer wieder andere *Solanum*-Wildarten eingekreuzt (Tab. 1), mit dem Ziel, eine dauerhaftere Widerstandsfähigkeit gegen den Befall durch *P. infestans* zu erreichen.

Für eine zielführende Resistenzzüchtung gegen *P. infestans* müssen zwei Sachverhalte berücksichtigt werden. Erstens sind Resistenzen gegen einen Befall am Kraut bzw. an den Knollen aus züchterischer Sicht als zwei unterschiedliche Merkmale zu behandeln (FORBES und LANDEO, 2006). Zweitens besteht eine positive Korrelation zwischen der Widerstandsfähigkeit des Krautes und späterer Abreife. Bleibt dies unberücksichtigt, werden bei der züchterischen Auslese auf geringe Anfälligkeit unwillkürlich spät abreifende Typen bevorzugt. Das Brechen dieser Korrelation zugunsten der Kombination von quantitativer Resistenz und früherer Abreife gilt allgemein als schwierig. Dass diese Aufgabe dennoch mit einem konventionellen Züchtungsansatz lösbar ist, belegen aktuelle Ergebnisse aus dem Groß Lüsewitzer Prebreeding-Programm, die im Folgenden vorgestellt werden.

Material und Methoden

Quellen für *Phytophthora*-Resistenz und angewandte Züchtungsstrategie

Als Resistenzressourcen wurden die vier Wildarten *S. demissum*, *S. stoloniferum*, *S. circaeifolium* und *S. okadae* im Rahmen konventioneller Kreuzungsprogramme genutzt. Die interspezifischen Nachkommenschaften wurden mehrfach (BC2 bis BC6) mit verschiedenen Sorten der Kulturkartoffel (*S. tuberosum* subsp. *tuberosum*) zurückgekreuzt.

Resistenzprüfungen

Feldtest. Knollenmaterial von Prebreeding-Zuchtstämmen wurde in den Versuchsjahren 2010, 2011 und 2012 im Feld in zweireihigen Parzellen mit 5 Pflanzen je Reihe kultiviert. Die künstliche Krautfäule-Inokulation wurde Anfang Juli, zur Blüte der Sorte 'Adretta', durchgeführt. Als Inokulum diente ein *P. infestans*-Pathotypengemisch, welches virulent gegenüber den Resistenzgenen R1 bis R11 ist und in Groß Lüsewitz unter Feldbedingungen vorkommt. Das Inokulummaterial war in den Vorjahren im Feld gesammelt und im Labor auf Kartoffelscheiben erhalten und bei Bedarf vermehrt worden. Das Testfeld war

Tab. 1. Züchterisch genutzte *Solanum*-Arten mit hoher Kraut- und Knollenfäule-Resistenz

| Solanum-Arten mit hoher Kraut- und Knollenfäule-Resistenz | | |
|---|------------------------|-------------------------|
| <i>S. acaule</i> | <i>S. x edinese</i> | <i>S. pinnatisectum</i> |
| <i>S. brachistotrichum</i> | <i>S. fendleri</i> | <i>S. polytrichon</i> |
| <i>S. brevicaule</i> | <i>S. hjertingii</i> | <i>S. x sambucinum</i> |
| <i>S. bulbocastanum</i> | <i>S. hougasii</i> | <i>S. stoloniferum</i> |
| <i>S. cardiophyllum</i> | <i>S. jamesii</i> | <i>S. trifidum</i> |
| <i>S. chiquidenum</i> | <i>S. morelliforme</i> | |
| <i>S. demissum</i> | <i>S. papita</i> | |

Quelle: (HAWKES, 1990)

mit einem Hanfstreifen ummantelt, welcher als Windschutz und zur Erhaltung eines feuchten Mikroklimas diente. Bei Bedarf wurde in den Abendstunden zusätzlich künstlich beregnet.

Das unterste Fiederblatt der jeweils ersten Pflanze einer Reihe wurde mit 5 ml einer Sporensuspension ($1,2 \times 10^4$ Sporangien/ml) in den Abendstunden auf der Blattunterseite inokuliert. Die erste Bonitur erfolgte etwa 5 Tage nach der Inokulation (dpi) als prozentual befallene Krautfläche in der Parzelle. Die Bonitur wurde anschließend zweimal wöchentlich bis zum Stadium der Gelbreife (80–90% der Blätter vergilbt) der Zuchtstämme durchgeführt. Das Abreifeverhalten und andere agronomische Eigenschaften der einzelnen Stämme wurden in einem intensiv mit Fungiziden behandelten Feld ermitelt.

Zur quantitativen Bestimmung der Krautfäule-resistenz wurde als Maßzahl die Fläche unter der Befallsverlaufskurve (AUDPC; Area Under Disease Progress Curve) bestimmt, welche sich aus den Boniturterminen ergibt (FRY, 1978; COLON, 1994). Für den Vergleich verschiedener Sorten und Stämme (vgl. Abb. 4) wurden relative AUDPC-Werte (rAUDPC) berechnet (HANSEN et al., 2002, 2003). Eine reifeabhängige Korrektur der Krautfäulebefallswerte erfolgte auf Grundlage einer linearen Regression der rAUDPC-Werte auf die Abreifebonitur. Der Zeitpunkt der Abreife eines Zuchtstamms ist für die Bewertung seiner Krautfäule-resistenz ein wesentliches Merkmal, da Anfälligkeit und Abreifeverhalten korrelieren. Der Δ rAUDPC-Wert entspricht dem Residuum der Regression auf die Reifezeit und dient als Maßzahl für die reifekorreigierte Resistenz (BORMANN, 2003; TRUBERG et al., 2009).

Blatttest. Der Blatttest (detached-leaf assay) ist eine weitere Methode zur Ermittlung der Krautfäuleanfälligkeit und der quantitativen Resistenz und diente neben dem Feldtest der Auslese der Prebreeding-Zuchtstämme. Der Blatttest wurde an Einzelblättern verschiedener Pflanzen eines Zuchtstamms durchgeführt. Die Inokulation der Blattproben erfolgte in einer Feuchtekammer mit einer *P. infestans*-Suspension (ca. 1 μ l; $1,5 \times 10^4$ Sporangien/

ml) je Blatt auf der Blattunterseite, mit sich anschließender Inkubation der Blätter für 7 Tage bei 19°C und 95% RF bei 150 Lx. Die Größe der Nekrosen und die Entwicklung des Mycel wurden 6 Tage auf einer 1–9-Skala je Blatt geschätzt, mit Note 1 = „kein Befall erkennbar“ und Note 9 = „Blattfläche komplett nekrotisiert bzw. vollständig mit Mycel bewachsen“. Anschließend wurde für jedes Prüfglied der Mittelwert aus den Einzelblatt-Bonituren berechnet.

Knollentest. Der Knollentest wurde an jeweils 30 erntefrischen und gewaschenen Knollen der Prebreeding-Zuchtstämme durchgeführt. Die Knollen wurden in eine Sporangiensuspension ($1,2 \times 10^3$ Sporangien/ml) aus der oben beschriebenen Herkunft getaucht und anschließend für ca. 24 h in Dunkelheit bei 19°C/100% RF und für weitere 7–10 Tage bei 19°C/85% RF in Dunkelheit inkubiert. Die Knollenreaktion wurde individuell für jede Einzelknolle auf einer 1–9-Skala geschätzt, mit 1 = kein Befall erkennbar und Note 9 = 100% Befall des Knollengewebes. Anschließend wurde ein mittlerer Boniturwert der befallenen Knollen errechnet. Knollen ohne Befall wurden ein weiteres Mal nach 12 Tagen bewertet und die Boniturnoten je Stamm wiederum gemittelt. Schließlich wurden beide Mittelwerte zu einem Befallsindex zusammengefasst. Hierbei ging die erste Bonitur mit doppelter Wertung und die zweite Bonitur mit einfacher Wertung in den Index ein (DARSOW, 2008).

Ergebnisse

Zur Ernte 2012 standen insgesamt 243 Prebreeding-Stämme, darunter 29 auf diploider Valenzstufe, in der Leistungsprüfung und wurden auf ihre Krautfäule- und Knollenfäule-Resistenz sowie die Ausprägung anderer relevanter Merkmale evaluiert (Tab. 2).

In der Tab. 3 sind die Befallswerte bezüglich *Phytophthora* und andere wichtige Merkmale von 17 JKI-Prebreeding-Stämmen und 4 Vergleichssorten zusammengefasst. Im Feldversuch der Versuchsjahre 2010 bis 2012

variierte der Befall zwischen den Prüfgliedern von 2% bis 56%. Einige JKI-Stämme zeigten einen signifikant geringeren Befall im Feldversuch (Abb. 3). Im Blatttest wurden Befallsbonituren zwischen 1,2 für den annähernd vollständig resistenten Prebreeding-Stamm 04.5211.01 und 5,6 für den früh reifenden, deutlich höher anfälligen Stamm 07.1017.02 ermittelt. Die ältere Sorte 'Adretta' wurde ebenfalls mit Note 5,6 im Blatttest bonitiert und zeigte im Feldtest 85% befallene Krautfläche, was ihre vergleichsweise hohe Anfälligkeit für *P. infestans* demonstriert. Die meisten JKI-Stämme, die im Blatttest eine hohe Resistenz aufwiesen, zeigten sich auch unter Feldbedingungen als wenig befallen. Lediglich der mittelfrüh abreifende Stamm 07.1023.03 erwies sich im Feldtest als mittel-anfällig, während er im Blatttest als annähernd resistent bonitiert wurde.

Die meisten JKI-Prebreeding-Stämme mit einem hohen Resistenzniveau gegen Krautfäule im Feldtest zeigten im Knollentest eine moderate Anfälligkeit. Die Vergleichssorten und die stärker krautfäuleanfälligen Experimen-



Abb. 3. Feldprüfung auf relative Krautfäule Resistenz nach künstlicher Infektion mit Beregnung und Windschutz.

Tab. 2. Umfang des Versuchsmaterials mit *Phytophthora*-Resistenz in Kombination mit verschiedenen anderen Merkmalen in der Leistungsprüfung 2012 in Groß Lüsewitz

| Selektionsrichtung | Ploidiestufe | | Summe | % |
|---|--------------|----|-------|-----|
| | 4x | 2x | | |
| <i>Phytophthora</i> /Speiseeignung | 73 | 8 | 81 | 33 |
| <i>Phytophthora</i> /Veredlungseignung | 39 | 11 | 50 | 21 |
| <i>Phytophthora</i> /Stärkegehalt | 54 | 6 | 60 | 25 |
| <i>Phytophthora</i> /Krebsresistenz | 4 | 3 | 7 | 3 |
| <i>Phytophthora</i> / <i>G. rostochiensis</i> | 17 | 1 | 18 | 7 |
| <i>Phytophthora</i> / <i>G. pallida</i> | 25 | – | 25 | 10 |
| <i>Phytophthora</i> /Trockentoleranz | 2 | – | 2 | 1 |
| Summe | 214 | 29 | 243 | 100 |

Tab. 3. *Phytophthora*-Reaktion in den Versuchsjahren 2010 bis 2012 und weitere Eigenschaften ausgewählter Versuchsstämme im Vergleich zu vier Standardsorten

| Stamm- bezeichnung | Phytophthora-Befall | | | Abreife und Qualität | | | | Speise- eignung |
|------------------------|-------------------------|--------------------------------|-----------------------------------|------------------------------|---------------------|--------------------------|--------------------------------|--------------------|
| | Feldtest rAUDPC % | Blatttest Note ^a | Knollentest Index ^b | Abreife Note ^c | Stärkegehalt (%) | Verarbeitungseignung für | | |
| | | | | | | Chips | Pommes- frites ^d | |
| 07.1001.05 | 55 | 4,8 | 3,5 | 2,5 | 12,2 | 2 | 2 | mittel |
| 07.1017.02 | 56 | 5,6 | 5,8 | 3,0 | 15,6 | 4 | 2 | mittel/gut |
| 07.1084.07 | 35 | 5,1 | 2,2 | 3,1 | 16,8 | 4 | 2 | mittel |
| 07.1005.05 | 2 | 1,3 | 2,3 | 3,2 | 15,7 | 4 | 5 | gering |
| 07.1062.01 | 45 | 3,3 | 3,3 | 3,3 | 15,4 | 4 | 4 | mittel |
| 07.1054.03 | 44 | 3,6 | 5,2 | 3,9 | 21,0 | 5 | 6 | gering |
| 07.1005.06 | 5 | 1,3 | 1,7 | 4,0 | 13,9 | 5 | 5 | gering |
| 04.5233.04 | 4 | 1,3 | 1,6 | 4,1 | 15,4 | 4 | 7 | mittel |
| 07.1001.01 | 35 | 2,4 | 5,7 | 4,2 | 12,7 | 2 | 3 | mittel/gut |
| 07.1086.02 | 13 | 1,6 | 1,6 | 4,5 | 15,6 | 5 | 2 | mittel |
| 07.1006.01 | 11 | 1,7 | 2,8 | 4,6 | 14,4 | 2 | 5 | gering |
| 04.5211.01 | 27 | 1,2 | 2,3 | 4,7 | 18,1 | 3 | 2 | mittel |
| 07.1022.06 | 40 | 5,1 | 4,4 | 5,5 | 16,8 | 1 | 3 | gering |
| 07.1023.03 | 43 | 1,8 | 6,5 | 5,8 | 22,9 | 5 | 6 | gering |
| 07.1078.04 | 24 | 3,5 | 3,4 | 6,0 | 17,4 | 6 | 7 | mittel/gut |
| 01.1286.11 | 24 | 3,3 | 1,7 | 6,2 | 16,6 | 3 | 5 | mittel |
| 07.1069.04 | 35 | 3,8 | 6,1 | 6,8 | 14,7 | 3 | 3 | mittel |
| Adretta | 85 | 5,6 | 5,4 | 3,6 | 16,7 | 3 | 4 | mittel |
| Birgit | 68 | 5,3 | 6,0 | 4,5 | 14,1 | 1 | 5 | mittel |
| Sarpo Mira | 6 | 4,0 | 7,1 | 8,0 | 15,7 | 3 | 4 | gering |
| Kuras | 43 | 4,7 | 5,5 | 8,0 | 19,1 | 2 | 3 | gering |
| Mittel (n = 71) | 53 | 3,3 | 4,0 | 4,7 | 16,2 | 3 | 4 | |
| LSD 5% | 11 | | | | | | | |

Boniturskalen ^a 1 = kein Befall, 9 = Blattfläche vollständig nekrotisiert u. mit Myzel bedeckt, ^b 1 = kein Befall, 9 = 100% Zerfall des Knollengewebes, ^c 1 = sehr früh, 9 = spät, ^d 1 = gering, 9 = hoch

talstämme wiesen meist auch eine höhere Anfälligkeit gegenüber Knollenfäule auf. Lediglich die JKI-Stämme 07.1023.03 und 07.1069.04 zeigten bei mittlerer Krautfäuleresistenz eine relativ hohe Anfälligkeit gegenüber Knollenfäule. Die Resistenzindices gegenüber Kraut- vs. Knollenfäule wiesen in diesen Versuchen keine Korrelationen auf und bestätigten die Annahme, dass Kraut- und Knollenfäule züchterisch als unterschiedliche Merkmale behandelt werden müssen.

Beachtenswert ist, dass die JKI-Prebreeding-Stämme neben verbesserter *P. infestans*-Resistenz auch akzeptable Qualitätseigenschaften aufweisen. Die Kombination quantitativer *Phytophthora*-Resistenz mit Speiseeignung gilt gemeinhin als schwierig. Gleiches gilt auch für die Kombination von hohem Stärkegehalt und *Phytophthora*-Resistenz, bei gleichzeitig nicht zu später Abreife. Wie die Tab. 3 belegt, sind mittlerweile Stämme vorhanden, die diese Merkmale in sich vereinen. Beispielsweise wiesen die Stämme 07.1023.03 und 07.1054.03 im 3-jährigen Mittel stabil hohe Stärkegehalte bei einer mittleren

Krautfäuleresistenz auf. Außerdem konnten Stämme identifiziert werden, die eine gute Veredelungseignung mit hoher Resistenz kombinieren. Die Veredelungseignung wurde als Chips- bzw. Pommes-frites-Eignung direkt an Knollenmaterial aus der 4°C-Lagerung anhand der Verbräunungsneigung untersucht, wobei es sich als deutlich schwieriger erweist, Stämme mit guter Chips-eignung zu identifizieren als Stämme mit guter Pommes-frites-Eignung (Tab. 3).

In den Versuchsjahren 2010, 2011 und 2012 konnten Prebreeding-Stämme identifiziert werden, welche im Vergleich zu den Standardsorten 'Ersteling', 'Adretta', 'Birgit', 'Bintje', 'Sarpo Mira' bzw. 'Kuras' signifikant geringer von Krautfäule befallen wurden, und dies bei früheren oder vergleichbaren Abreifeterminen (Abb. 4). Die bereits erwähnte hohe Korrelation zwischen später Abreife und abnehmender Anfälligkeit gegenüber Krautfäule manifestiert sich bei der Sorte 'Sarpo Mira' augenfällig. Die Tatsache, dass im 3-jährigen Mittel JKI-Stämme mit Reifebonituren unterhalb Note 4 vergleichsweise gering durch Krautfäule

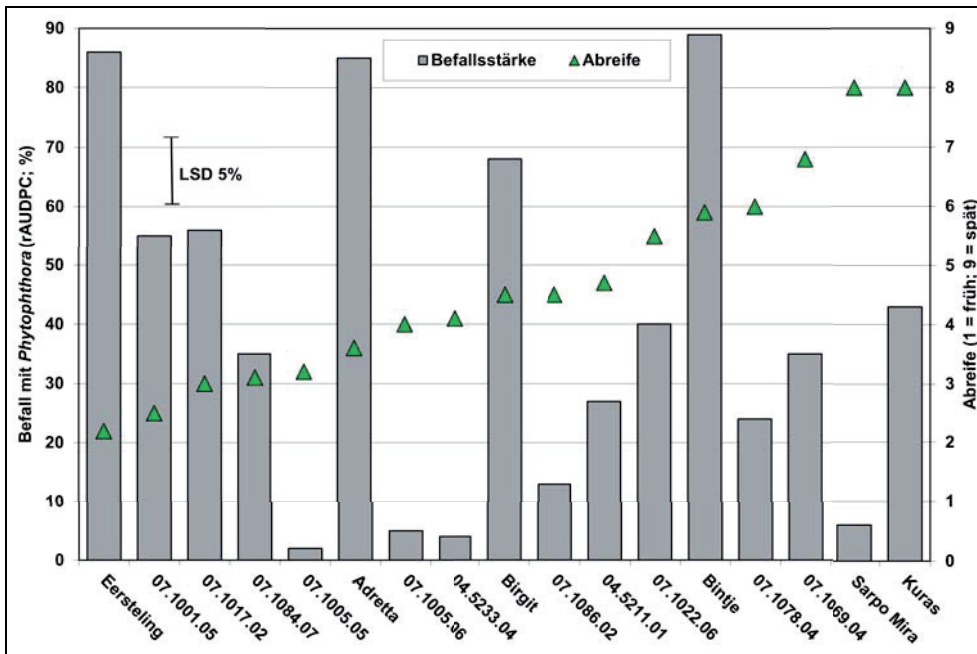


Abb. 4. Befall mit Krautfäule und Abreifeverhalten ausgewählter Versuchsstämme und Sorten im Mittel der Jahre 2010 bis 2012.

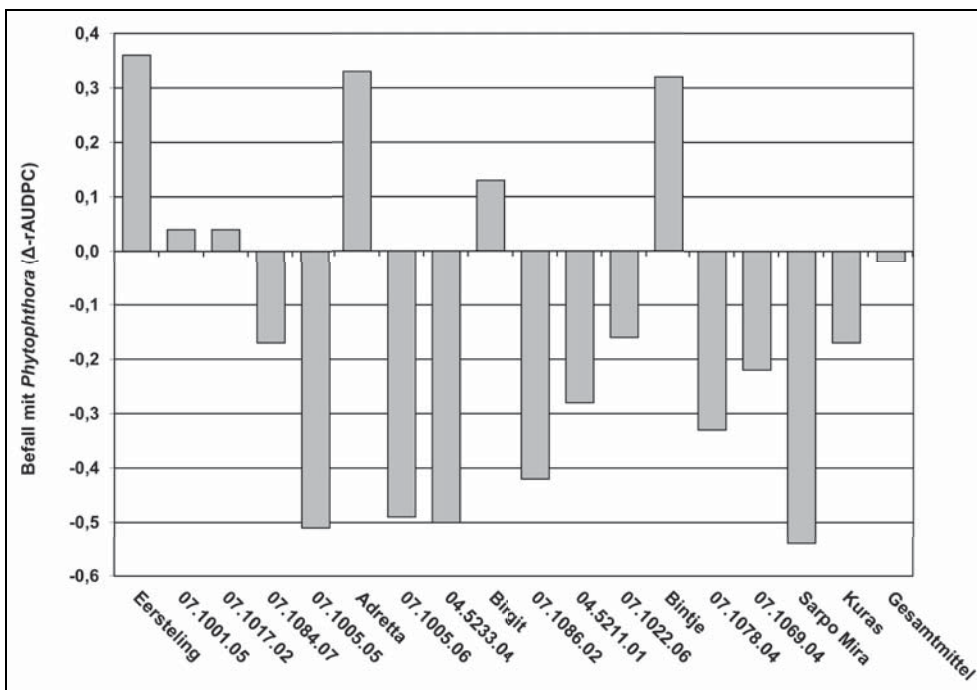


Abb. 5. Reifekorrigierte Krautfäulereaktion ($\Delta rAUDPC$) ausgewählter Versuchsstämme und Sorten im Mittel der Jahre 2010 bis 2012.

befallen wurden, zeigt, dass im Groß Lüsewitzer Prebreeding-Programm die Kombination von guter *Phytophthora*-Resistenz und früher Abreife inzwischen gelungen ist.

Der reifekorrigierte Wert $\Delta rAUDPC$ wird verwendet, um die Beurteilung der Krautfäuleresistenz vom Einfluss später Abreife zu separieren. Niedrige $\Delta rAUDPC$ -Werte beschreiben ein niedriges Niveau in der Anfälligkeit. In Abb. 5 zeigen alle JKI-Prebreeding-Stämme sehr niedrige $\Delta rAUDPC$ -Werte und können daher als gering anfällig bezeichnet werden. Beispielsweise weist Stamm 07.1005.05 eine geringere Anfälligkeit auf als Stamm 07.1001.05 oder Stamm 07.1084.07.

Diskussion

Über viele Jahrzehnte basierte die Züchtung auf Krautfäuleresistenz weltweit auf der Nutzung der Überempfindlichkeit oder qualitativen Resistenz, die durch so genannte *R*-Gene bedingt ist, die aus den Wildarten *S. demissum* und *S. stoloniferum* eingekreuzt wurden und von denen elf dominante Genvarianten – R1 bis R11 – bekannt sind. Wegen ihrer einfachen Vererbung ist diese Form der Resistenz züchterisch relativ einfach zu handhaben, ebenso wie die Durchführung von Resistenzprüfungen. Mittlerweile sind eine große Anzahl molekularer

DNA-Marker für die Selektion von Pflanzen dieses Resistenztyps beschrieben (GEBHARDT und VALKONEN, 2001; DANAN et al., 2011). Die Nutzung der durch die einzelnen R-Gene bedingten Resistenz war jeweils nur kurzzeitig erfolgreich; denn diese Resistenz wirkt rassenspezifisch und wird bei fortwährendem Anbau der resistenten Sorte infolge der selektiven Bevorteilung virulenter Rassen, die sich in der Erregerpopulation rasch durchsetzen, bald durchbrochen (FRY und GOODWIN, 1997). In jüngerer Zeit gibt es Versuche, u.a. auf gentechnischem Wege mehrere rassenspezifische *R_{pi}*-Gene aus verschiedenen *Solanum*-Wildarten zu kombinieren, um auf diese Weise eine dauerhaftere *Phytophthora*-Resistenz zu erzeugen. Inwieweit dieser Ansatz von nachhaltigem Erfolg sein kann, bleibt abzuwarten.

Am Julius Kühn-Institut in Groß Lüsewitz wird in einem langfristig ausgerichteten Programm zur genetischen Erweiterung des Kulturkartoffel-Genpools eine andere Strategie in der Resistenzzüchtung verfolgt, nämlich die Nutzung der rassenspezifischen oder quantitativen Resistenz. Wildarten der Kartoffel, die in ihrem Ursprungsgebiet eine Jahrtausende lange Koevolution mit dem Krankheitserreger durchlaufen haben und während dieser Zeit polygen bedingte Abwehrstrategien entwickeln konnten, werden als Resistenzquellen genutzt.

Eine quantitative Resistenz verleiht der Pflanze zwar keinen absoluten Schutz gegen einen Befall, wirkt aber befallsreduzierend gegen alle oder mehrere Erregerassen. Ihre Nutzung in der Sortenzüchtung könnte somit eine Kartoffelproduktion mit deutlich reduziertem Input an chemischem Pflanzenschutz ermöglichen (DARSOW, 2005).

Die Vorteile dieser Resistenzform haben allerdings auch ihren Preis. An ihrer Ausprägung sind mehrere bis viele Gene – sogenannte Polygene oder QTL (von engl. *quantitative trait loci*) – beteiligt. Die züchterische Nutzung der quantitativen Resistenz wird durch ihre komplexe Vererbung wesentlich erschwert. Außerdem unterliegt die Ausprägung der quantitativen Resistenz einem erheblichen Umwelteinfluss. Resistenztests müssen daher über mehrere Jahre und in verschiedenen Umwelten (Jahre × Prüforste) durchgeführt werden, um belastbare Daten zu erhalten.

Das primäre Zuchtziel der Sortenzüchtung ist nach wie vor die Steigerung des Ertrages, gefolgt von der Verbesserung der Qualität bzw. Verwendungseignung (DALE und BRADSHAW, 2006; ROSS, 1986). In der Kartoffelzüchtung werden besonders komplexe Zuchtziele verfolgt. So werden in einer modernen Kartoffelsorte 60 bis 70 wichtige Merkmale vereint. Dies stellt die Züchtungsforschung vor erhebliche Herausforderungen, weil es nicht ausreicht, das Vorkommen neuer Genvarianten für Krankheitsresistenz in exotischen pflanzengenetischen Ressourcen nachzuweisen. Vielmehr gilt es aufzuzeigen, dass es gelingen kann, solche Genvarianten auch züchterisch, d.h., unter weitgehender Bewahrung der Anbau- und Nutzungseignung, zu erschließen und zu verwenden.

Der Einsatz von Wildart-Eltern als Resistenzressourcen in konventionellen Züchtungsprogrammen ist wegen

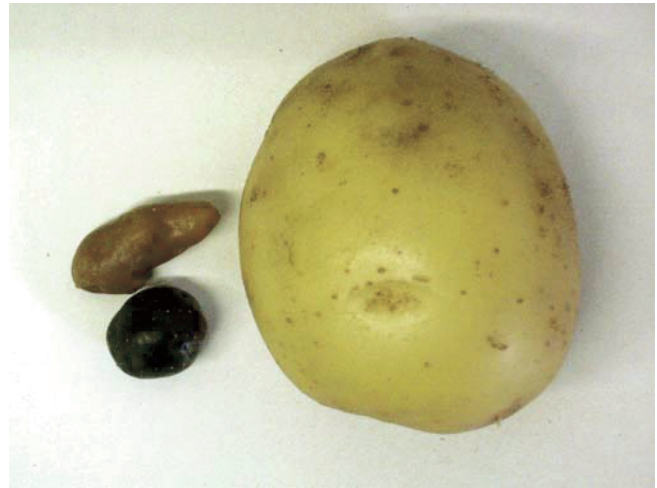


Abb. 6. Knollen-Vergleich, links Wildarten, rechts Kulturkartoffel.

ihrer anderweitigen, in der Regel nachteiligen Eigenschaften (Abb. 6) problematisch. Wertbestimmende Merkmale wie Ertrag, Knollengröße und -form, Augentiefe, Speiseeignung usw. müssen anschließend wieder auf das Niveau der Kultursorte gebracht werden, ohne dabei die eingekreuzte polygene *Phytophthora*-Resistenz zu verlieren. Dies wird durch wiederholte Rückkreuzung der Arthybriden mit der Kulturform und Auslese solcher Nachkommen erreicht, die sowohl quantitativ resistent als auch akzeptabel im Hinblick auf die 60 bis 70 wertbestimmenden Merkmale von Kartoffelknollen erscheinen. Am Ende jedes Rückkreuzungszyklus bleiben nur wenige Nachkommen übrig, die dann für erneute Rückkreuzungen mit der Kulturform ausgewählt werden. Um im Laufe dieser Rückkreuzungen neue Kombinationen von Resistenz-Polygenen herbeizuführen und die quantitative *Phytophthora*-Resistenz auf einem lohnenden Niveau zu halten, müssen zwischen den Rückkreuzungen zusätzliche Kreuzungsschritte zwischen resistenten Nachkommen durchgeführt werden.

Es liegt somit auf der Hand, dass bei der Nutzung polygen bedingter Resistenz mit Hilfe konventioneller Züchtungsmethoden das Resistenzniveau im züchterisch relevanten Kulturkartoffel-Genpool nur allmählich und schrittweise angehoben werden kann (DARSOW, 2008).

Die hier dargelegten Ergebnisse belegen, dass eine deutliche Anhebung des Resistenzniveaus durch die Nutzung der quantitativen, polygen bedingten Resistenz möglich ist, auch in der Kombination mit früher Abreife und einem geeigneten Ausprägungsniveau weiterer, wertbestimmender Merkmale für verschiedene Verwertungsrichtungen. Die Einkreuzung von QTL für quantitative *Phytophthora*-Resistenz in aktuelles Zuchtmaterial wird in Zukunft durch molekulare Selektionsmarker vereinfacht werden (WENZEL, 2006).

Zusammenfassend bietet die genetische Erweiterung des Kulturkartoffel-Genpools durch konsequentes und langfristig orientiertes Prebreeding interessante Perspektiven für einen ökologisch und ökonomisch nachhaltigen Kartoffelbau.

Literatur

- ANONYMOUS, 1996: CIP Circular. International Potato Centre 22, No. 1.
- BORMANN, C.A., 2003: Genetic and molecular analysis of quantitative and qualitative late blight resistance in tetraploid potato. Dissertation Universität Hohenheim, 115 S., ISBN 3-86537-051-9.
- BUNDESSORTENAMT, 2012: Beschreibende Sortenliste Kartoffeln, 96 S.
- CAROLL, C.P., 1982: A mass selection method for the acclimatization and improvement of edible diploid potatoes in the United Kingdom. *Journal of Agricultural Sciences* **99**, 631-640.
- COLON, L., 1994: Resistance to *Phytophthora infestans* in *Solanum tuberosum* and wild *Solanum* species. Thesis Agricultural University Wageningen, 159 p.
- DALE, M.F.B., J.E. BRADSHAW, 2006: Modern methods for modern potato breeding. In: HAASE, N.U., A.J. HAVERKORT (Eds.): *Potato Developments in a changing Europe*. Wageningen Academic Publishers. The Netherlands, p. 36-45.
- DANAN, S., J.B. VEYRIERAS, V. LEFEBVRE, 2011: Construction of a potato consensus map and QTL meta-analysis offer new insights into the genetic architecture of late blight resistance and plant maturity traits. *BioMedCentral Plant Biology* **11**, 16 S.
- DARSOW, U., 2005: Züchtung auf Kraut- und Braunfäuleresistenz der Kartoffel. *Kartoffelbau*, **7** (56. Jg.), 298-302.
- DARSOW, U., 2008: Vorlaufzüchtung der Kartoffel auf quantitative *Phytophthora*-Resistenz im ILK Groß Lüsewitz in der Ressortforschung des BMELV. *Stand der Forschung und Züchtung. Mitteilungen aus dem Julius Kühn-Institut* **415**, 128 S.
- FORBES, G.A., J.A. LANDEO, 2006: Late Blight. In: GOPAL, J., S.M.P. KHURANA (Eds.): *Handbook of Potato Production, Improvement, and Postharvest Management*. New York, Food Products Press, p. 279-314.
- FRY, W.E., 1978: Quantification of general resistance of potato cultivars and fungicide effects for integrated control of late blight. *Phytopathology* **68**, 1650-1655.
- FRY, W.E., S.B. GOODWIN, 1997: Re-emergence of potato and tomato late blight in the United States. *Plant Disease* **81**, 1349-1357.
- GEBHARDT, C., J.P.T. VALKONEN, 2001: Organization of genes controlling disease resistance in the potato genome. *Annual Review of Phytopathology* **39**, 79-102.
- HAMMANN, T., B. TRUBERG, R. THIEME, 2009: Improving Resistance to Late Blight (*Phytophthora infestans*) by Using Interspecific Crosses in Potato (*Solanum tuberosum* ssp.). In: FELDMANN, F., D.V. ALFORD, C. FURK: *Crop Plant Resistance to Biotic and Abiotic Factors* (2009), 407-414. Deutsche Phytomedizinische Gesellschaft, Braunschweig, Germany.
- HANSEN, J., L. BODGER, B.J. NIELSEN, 2002: Implementation of variety resistance control strategies of potato late blight. In: *Proceedings of the 6th Workshop of an European Network for Development of an Integrated Control Strategy of Potato Late Blight*. Special Report No. 8, PPO 304, 111-123.
- HANSEN, J., P. LASSEN, M. KOPPEL, A. VALSKYTE, I. TURKA, J. KAPSA, 2003: Web-blight – regional late blight monitoring and variety resistance information on Internet. *Journal of Plant Protection Research* **43** (3), 263-273.
- HAVERKORT, A.J., P.M. BOONEKAMP, R. HUTTEN, E. JACOBSEN, L.A.P. LOTZ, G.J.T. KESSEL, R.G.F. VISSER, E.A.G. VAN DER VOSSEN, 2008: Societal costs of late blight in potato and prospects of durable resistance through cisgenetic modification. *Potato Research* **51**, 47-57.
- HAWKES, J.G., 1967: The history of the potato. *Journal of the Royal Horticultural Society* **92**, 288-302.
- HAWKES, J.G., 1990: *The Potato: Evolution, Biodiversity and Genetic Resources*. Oxford, U.K., Belhaven Press.
- HLMANS, R., D.M. SPOONER, 2001: Geographic distribution of wild potato species. *American Journal of Botany* **88**, 2102-2112.
- HOUGAS, R.W., S.J. PELOQUIN, 1957: A haploid plant of potato variety Katahdin. *Nature* **180**, 1209-1210.
- PELOQUIN, S.J., J.E. WERNER, G.L. YERK, 1990: The use of potato haploids in genetics and breeding. In: GUPTA, P.K., T. TSUCHIYA (Eds.): *Chromosome Engineering in Plants, Part B. Barking Essex, England, Elsevier*, 79-92.
- ROSS, H., 1986: *Potato Breeding – Problems and Perspectives*. *Advances in Plant Breeding* (Suppl. 13). Berlin, Verlag Paul Parey, 133 S.
- THIEME, R., E. RAKOSY-TICAN, M. NACHTIGALL, J. SCHUBERT, T. HAMMANN, O. ANTONOVA, T. GAVRILENKO, U. HEIMBACH, T. THIEME, 2010: Characterization of the multiple resistance traits of somatic hybrids between *Solanum cardiophyllum* Lindl. and two commercial potato cultivars. *Plant Cell Reports* **29** (10), 1187-1201.
- TRUBERG, B., R. THIEME, T. HAMMANN, U. DARSOW, 2009: A QTL-Study on quantitative maturity-corrected resistance to late blight (*Phytophthora infestans*) in tetraploid potato (*Solanum tuberosum*). In: FELDMANN, F., D.V. ALFORD, C. FURK (eds.): *Crop Plant Resistance to Biotic and Abiotic Factors* (2009) 415-418. Deutsche Phytomedizinische Gesellschaft, Braunschweig.
- WENZEL, G., 2006: Biotechnology in potato improvement. In: GOPAL, J., S.M.P. KHURANA (Eds.): *Handbook of Potato Production, Improvement, and Postharvest Management*. New York, Food Products Press., p. 109-146.
- WOOLFE, J.A., 1996: *Die Kartoffel in der menschlichen Ernährung*. Hamburg, Behr Verlag, 184 S.