



Bisher schorffrei: *Malus floribunda*
am Standort Laimburg.

Die Züchtung schorfwiderstandsfähiger Apfelsorten

Thomas Letschka, Sabine Öttl, Walter Guerra, Versuchszentrum Laimburg

Von den weltweit über 100 Apfel-Züchtungsprogrammen peilt ein Drittel gezielt eine schorfwiderstandsfähige Sorte an. Die Ansätze und Methoden in der Züchtung haben sich stark verändert. Sie werden im Artikel ebenso erklärt wie etliche Begriffe, die in den nachfolgenden Beiträgen häufig verwendet werden.

Es begann zufällig

Die systematische Schorffresistenz-züchtung beim Apfel hatte ihren Ursprung eigentlich rein zufällig im fernen Jahr 1914 im amerikanischen Illinois. Damals wurde die großfruchtige Apfelsorte Rome Beauty mit der kleinfruchtigen Wildform des Apfels

Malus floribunda gekreuzt, um die Vererbbarkeit der Fruchtgröße zu erforschen. Erst mehrere Jahre später wurden die Resistenzeigenschaften einzelner Individuen der Wild-Apfelart *Malus floribunda* gegen den Schorf entdeckt. Man griff demzufolge auf die Nachkommen der obgenannten Kreuzung, insbesondere auf die Linie *Malus*

floribunda 821, zurück und bearbeitete sie zunächst in den USA über etliche Generationen züchterisch weiter.

Erste Züchtungsprogramme

Die erste systematische Züchtung einer schorfwiderstandsfähigen Ap-

felsorte erfolgte im Rahmen des in den 1950er-Jahren gestarteten PRI-Programms, ein Akronym, das für die drei kooperierenden amerikanischen Universitäten Purdue, Rutgers und Illinois steht. Diesem historisch gesehen ersten Programm mit dem Zuchtziel Schorfresistenz folgten weitere aus aller Welt, wobei der Großteil als Grund-

lage Nachkommen der Rome Beauty \times *Malus floribunda*-Kreuzung, also die Resistenz von *Malus floribunda* mit dem sogenannten Vf-Gen, verwendete. Das in der Zwischenzeit identifizierte und sequenzierte Resistenzgen wurde nämlich mit dem Kürzel Vf gekennzeichnet, wobei V für die lateinische Bezeichnung für Schorf *Venturia*

inaequalis und *f* für *Malus floribunda* steht. In der neuen Nomenklatur wird dieses Resistenzgen als *Rvi6* (*Rvi* von Resistance *venturia inaequalis*) bezeichnet. Da ein einziges Gen dafür verantwortlich ist, dass der Resistenzmechanismus funktioniert, spricht man von monogener Resistenz.

Die Selektion von monogen widerstandsfähigen Nachkommen aus einer Kreuzungsserie ist beim Schorf verhältnismäßig einfach: Im Glashaus werden die jungen Sämlinge mit dem Schorfpilz inokuliert und nur jene weitergezogen, welche keine oder kaum Krankheitssymptome aufweisen.

Von den heutzutage weltweit rund 100 aktiven Apfelzüchtungsprogrammen verfolgt jedes dritte als Hauptziel die Resistenz gegen den pilzlichen Schad-erreger Schorf; ein Überblick zu den wichtigsten Programmen findet sich in Tabelle 1. Nach fast einem Jahrhundert an züchterischen Bemühungen gibt es heutzutage eine Generation von Sorten mit monogener Resistenz mit beachtenswerten Eigenschaften, welche in jedem Fall mit den traditionellen Sorten mithalten können. Als Beispiel sei hier die Sorte Bonita genannt, welche auch in Südtirol angebaut wird. Sie wurde von dem inzwischen verstorbenen tschechischen Professor Jaroslav Tupý, einem der erfolgreichsten Resistenzzüchter überhaupt, gekreuzt und hat acht Kreuzungsgenerationen seit der ursprünglichen im Jahr 1914 hinter sich (siehe Grafik).

Tabelle 1: Apfelzüchtungsprogramme, welche systematisch das Zuchtziel Schorfresistenz verfolgen.

Land	Institut/Züchtungsinitiative	Beispielsorten
Australien	DAFF Queensland	RS103 130/Kalei [®] /Azana [®]
Belgien	Better3fruit	Ipador/Giga [®]
Belgien	CRA Gembloux	
Brasilien	Epagri	Catarina, Monalisa
Deutschland	JKI Dresden-Pillnitz	Re-Serie (Resi, Rewena, Reanda usw.)
Deutschland	KOB Bavendorf (Kooperation ÜEB Prag)	
Deutschland	apfel:gut	
England	EMR-NIAB	Saturn, Falstaff, Fiesta
Estland	Polli	
Frankreich	INRA/Novadi	Inobi, Inolov/Mandy [®] , Inored/Story [®] , Ariane, Lespin/Garance [®]
Frankreich	IFO	
Frankreich	Carrier	Xeleven/Swing [®]
Holland	Fresh Forward	SQ 159/Natyra [®] , Santana
Italien	Versuchszentrum Laimburg	Lb17906
Italien	FEM, San Michele all'Adige	
Italien	Universität Bologna	
Italien	CREA (ex ISF)	Golden Orange, Forlady CIVG198/Modi [®] , CIV323/Isaaq [®] , CIVM49/RedPop [®] , Fujion, Smeralda
Italien	CIV	
Lettland	Dobele	Edite, Gita
Litauen	Babtei	Aldas, Auksis
Neuseeland	PFR	PREMA34/Cherish [®]
Polen	InHort Skierniewice	Resista
Schweiz	Fruture	Lumaga/Galant [®]
Schweiz	Agroscope	Ariwa, Ladina, Rustica, CH 101/Galiwa [®]
Serbien	Novi Sad	
Tschechische Republik	UEB Institut für Experimentelle Botanik Prag	Topaz, Bonita, Luna, Sirius, Heliodor, Rubinola, Orion, Rajka
Tschechische Republik	RIBP Holovousy	
USA	PRI	Coop 33/Pixie [®] , Coop 38/GoldRush [®] , Coop 39/Crimson Crisp [®] , Coop43/Juliet [®]
Weißrussland	belsad Minsk	

Schorfpilz ist variabel

Der Schorfpilz ist genetisch sehr variabel, die Population des Erregers passt sich im Laufe der Zeit an die (Haupt-)sorten in einem Produktionsgebiet an. Fast 20 virulente Schorfstämme wurden inzwischen identifiziert (Tabelle 2, S. 8), welche ursprünglich unempfindliche Sorten befallen können. Sogar die Südtiroler Hauptsorte Golden Delicious war vor langer Zeit wenig bis kaum empfindlich und besitzt die sogenannte *Vg*-Resistenz, welche selbstverständlich schon seit langem durchbrochen wurde. In der Schorf-



Links: Bereits zum Sortenschutz angemeldet: die Laimburger Vf-Sorte Lb17906, eine Kreuzung zwischen Topaz und Coop 38.
Rechts: *Malus baccata*, auch diese Apfel-Wildform hat ein Schorfresistenz-Gen.

population sind bereits Schorfstämme entstanden, die auch Vf-resistente Sorten infizieren. Bereits 1979 wurde bei einer Bepflanzung mit den Vf-Sorten Prima, Priam, Priscilla und Sir Prize auf dem ehemaligen Proefboomgaard De Schuilenburg in Kesteren in Holland Schorfbefall festgestellt. 1984 wurden bei der Sortenprüfung an der ehemaligen niederländischen Teststation in Wilhelminadorp die ersten Schorfflecken auf Vf-schorfresistenten Sorten gefunden, 1997 folgte ein schwerer Schorfausbruch, der eine große Anzahl

von Vf-Sorten in der Sammlung betraf. In der gleichen Zeitperiode wurde in anderen Apfelanbaugebieten die Resistenz von *Malus floribunda* durch die Schorfstämme 6 und 7 durchbrochen. Die ersten publizierten Stämme von *Venturia inaequalis*, welche die Vf-Resistenz durchbrochen haben, wurden 1993 in Deutschland und 1994 in England entdeckt. In der Folge wurden mehrere Berichte über das Vorhandensein dieser Stämme in Europa veröffentlicht. Der Schorfstamm 7 wurde im Jahr 2000 in Frankreich, im Jahr

2002 in Belgien und 2004 in Spanien gefunden, sowohl der Schorfstamm 6 als auch 7 in Dänemark im Jahr 2000 und in Schweden im Jahr 2003. In Südtirol sind diese Schorfstämme bis heute noch nicht nachgewiesen worden. Der Durchbruch einer monogenen Resistenz ist letztendlich nur eine Frage der Zeit. Durch ein gezieltes Resistenzmanagement kann dieser aber zumindest zeitlich verzögert werden.

Pyramidisierung

Die allermeisten schorfresistenten Sorten, die heute erhältlich sind, sind Nachkommen der achten, neunten oder zehnten Generation der oben erwähnten Kreuzung aus Illinois und tragen somit das bekannte Vf-Gen. Mittlerweile wurde aber eine Reihe von weiteren Genen entdeckt, welche nicht von *Malus floribunda*, sondern von anderen Wildarten oder Sorten des Apfels stammen (Tabelle 2, S. 8). Die Kombination von mehreren Schorfresistenz-Genen wird als Pyramidisierung bezeichnet und stellt eine weitere Strategie dar, den Durchbruch der Schorfresistenz zu verzögern.

Wie Resistenz entsteht

Der Resistenz-Mechanismus ist einfach erklärt: Beim Kontakt des Schorf-

Grafik: Genealogie der resistenten Sorte Bonita mit 8 Generationen (F).

		Malus floribunda 821	X	Rome Beauty
F1		9433-2-2	X	9433-2-8
F2	Golden Delicious	X	26829-2-2	
F3		14-126	X	Jonathan
F4	Spartan	X	OR 38T 16	
F5	1966	Jolana	X	Lord Lambourne
F6	1977	Rubin	X	Vanda
F7	1984	Topaz	X	Cripps Pink
F8	1998			Bonita

Tabelle 2: Derzeit bekannte Schorfresistenzgene beim Apfel.

Zeigersorte/Ursprung der Resistenz	Alter Name	Neuer Name	Chromosom	DNA-Marker einsetzbar
Golden Delicious	<i>Vg</i>	<i>Rvi1</i>	12	ja
TSR34T15	<i>Vh2</i>	<i>Rvi2</i>	2	ja
Geneva	<i>Vh3</i>	<i>Rvi3</i>	4	ja
TSR33T239	<i>Vh4</i>	<i>Rvi4</i>	2	ja
9-AR2T196	<i>Vm</i>	<i>Rvi5</i>	17	ja
Priscilla	<i>Vf</i>	<i>Rvi6</i>	1	ja
<i>Malus floribunda</i> 821	<i>Vfh</i>	<i>Rvi7</i>	8	ja
4B5	<i>Vh8</i>	<i>Rvi8</i>	2	ja
K2	<i>Vdg</i>	<i>Rvi9</i>	2	nein
A723-6	<i>Va</i>	<i>Rvi10</i>	1	nein
A722-7	<i>Vbj</i>	<i>Rvi11</i>	2	ja
Hansen's baccata #2	<i>Vb</i>	<i>Rvi12</i>	12	ja
Durello di Forlì	<i>Vd</i>	<i>Rvi13</i>	10	ja
Dülmener Rosenapfel	<i>Vdr1</i>	<i>Rvi14</i>	6	ja
GMAL 2473	<i>Vr2</i>	<i>Rvi15</i>	2	ja
MIS op 93.051 G07	<i>Vmis</i>	<i>Rvi16</i>	3	ja
Antonovka APF22	<i>Va1</i>	<i>Rvi17</i>	1	ja
1980-015-025	<i>V25</i>	<i>Rvi18</i>	11	ja
Honeycrisp	–	<i>Rvi19</i>	1	ja
Honeycrisp	–	<i>Rvi20</i>	15	ja

pilzes mit den Zellen des Apfelblattes einer resistenten Sorte erkennt das pflanzliche Immunsystem ein spezielles Pilzprotein und startet die Abwehr-Maschinerie. Hierbei erkennen die unterschiedlichen Schorfresistenzgene

aber unterschiedliche Pilzproteine und unterschiedliche Mechanismen werden in Gang gesetzt. Das Resultat ist aber meist dasselbe: Durch punktuell Absterben (Nekrotisieren) der betroffenen Blatteile wird ein Eindrin-

gen und Sporulieren des Schorfpilzes verhindert und somit im Keim erstickt. Fehlt der Pflanze das Resistenzgen (wie in sämtlichen nicht resistenten Sorten) oder verändert der Pilz sein Protein minimal, so kann das pflanzliche Immunsystem nicht reagieren und eine Infektion ist möglich.

Es ist daher besonders wichtig zu beobachten, wo der Schorferreger seine Pilzproteine bereits dermaßen angepasst hat, dass die beschriebenen Resistenzmechanismen nicht mehr funktionieren. Aus diesem Grund haben Andrea Patocchi (Agroscope, Schweiz) und Vincent Bus (PFR, Neuseeland) 2008 das Projekt www.vinquest.ch initiiert. Dabei wird für jedes Resistenzgen eine entsprechende Sorte gepflanzt, die dieses Gen trägt und somit den jeweiligen Resistenzmechanismus abrufen kann. Würden alle Resistenzmechanismen noch funktionieren, wären selbst ohne Schorfbehandlung alle diese Zeigerpflanzen symptomfrei. Da aber bereits etliche der Mechanismen durchbrochen wurden, können in verschiedenen Zeigerpflanzen bereits Schorfsymptome entdeckt werden. Ein Verteilen dieser Zeigerpflanzen auf 27 verschiedene Standorte in 14 Ländern der Welt lässt klar erkennen, wo welche Resistenzmechanismen bereits durchbrochen wurden und welche hingegen noch standhalten. Am Standort Laimburg wurde z.B. ein Durchbruch der Gene *Vg*, *Vh3*, *Vh8*, *Vd* und *Vdr1* beobachtet. Für das am häufigsten in resistenten Sorten verwendete Resistenzgen *Vf* wurde in ganz Italien noch kein Durchbruch gemeldet, in weiten Teilen Deutschlands, Frankreichs, Österreichs oder der Tschechischen Republik ist dies aber, wie vorab erwähnt, anders.

Die Daten aus dem Vinquest-Monitoring helfen vor allem bei der Auswahl geeigneter Kreuzungspartner für die Resistenzzüchtung. Denn für eine effiziente Kombination von Resistenzgenen werden jene Resistenzträger verwendet, welche weltweit noch nicht durchbrochene Resistenzen tragen. So haben z.B. am Versuchszentrum Laimburg bereits Kreuzungen stattgefunden

Züchtungsprogramm Laimburg inklusive Kooperation Agroscope

Seit 1996 besteht am Versuchszentrum Laimburg ein Apfelzüchtungsprogramm, welches seit 2019 die Bietergemeinschaft VOG und VIP als Lizenznehmer hat. Neben der Züchtung kommerzieller Sorten für den Anbau besteht großes Interesse an der Entwicklung neuer Methoden (Züchtungsforschung). Im Jahr 2012 sind einige interne Projekte unter der Leitung des Molekularbiologischen Labors gestartet, welche die Implementierung und Optimierung der markergestützten Selektion als Ziel haben. Seit nunmehr fünf Jahren wird auch im Laimburger Züchtungsprogramm gezielt an der Pyramidisierung von Schorfresistenzen gearbeitet. Die langjährige Zusammenarbeit in der Sortenprüfung und Apfelzüchtung zwischen dem Versuchszentrum Laimburg und dem renommierten Schweizer Institut Agroscope am Standort Wädenswil wurde 2020 durch eine Kooperationsvereinbarung besiegelt und ermöglicht eine engere Zusammenarbeit, um in der Resistenzzüchtung anhand von Pre-Breeding, Pollenaustausch und molekularer Selektion gemeinsam voranzuschreiten. Im Bereich Pre-Breeding verfolgen beide Institute die Erschließung von neuen Resistenzquellen und die Weiterentwicklung von Schorf-, Mehltau- und Feuerbrand-Resistenzpyramiden in Kombination mit hoher Fruchtqualität. Ziel der Kooperation bei der molekularen Selektion ist der Erfahrungsaustausch und die gemeinsame Nutzung von externen Analyseplattformen, um die Anwendung möglichst kosteneffizient zu gestalten.

den, welche die Gene *Vh4* mit *Vf* oder *Vm* mit *Vr2* verbinden, um durch diese Pyramidisierung mehrere Resistenzmechanismen in einer neuen Sorte zu vereinen und somit dem Schorfpilz einen Durchbruch zu erschweren.

Molekulare Marker

Welche Resistenzgene ein neues Kreuzungsprodukt vererbt bekommen hat, ist durch den eingangs beschriebenen Resistenztest im Gewächshaus nicht unterscheidbar. Es braucht dafür den Einsatz molekularer Methoden, um eine erfolgreiche Pyramidisierung zu bestätigen. Dies geschieht durch die Hilfe von DNA-Markern, welche stellvertretend für die Resistenzgene im Labor nachgewiesen werden können und zwar bereits im Blatt eines wenige Wochen alten Sämlings. Werden nämlich die Marker für die jeweilige Resistenz im DNA-Extrakt eines Blattstücks nachgewiesen, weist dies auch auf die Anwesenheit der entsprechenden Resistenzgene hin. Der Sämling bleibt somit im Züchtungsprogramm. Fehlen die DNA-Marker hingegen, so haben diese Sämlinge die Resistenzgene nicht vererbt bekommen und werden aus dem Züchtungsprogramm ausgeschlossen.

Monogene Resistenzen sind durch den Einsatz molekularer Marker einfach und leicht zu erkennen. Der Nachteil ist, dass sie aufgrund des hohen Selektionsdrucks, dem der Schorferreger ausgesetzt ist, anfällig für einen Durchbruch sind. Sogenannte Feld-Resistenzen (oder polygene Resistenzen) basieren hingegen auf mehreren sich ergänzenden Gen-Regionen und sind ein weiterer erfolgversprechender Ansatz gegen Durchbrüche. Polygene Resistenzen zeigen im Allgemeinen einen geringeren Widerstand gegen den Pilz als monogene Resistenzen, aber sie können auf ein breites Spektrum der Schorfstämme wirken. Es wird außerdem angenommen, dass sie weniger Selektionsdruck auf den Erreger ausüben und dieser somit komplexe Anpassungen vornehmen muss, um die Resistenz zu überwin-



Im Glashaus werden die Sämlinge aus den Kreuzungen bonitiert.

den. Leider ist der Nachweis von polygenen Resistenzen durch DNA-Marker noch nicht möglich.

Neue Züchtungsmethoden

Sämtliche bisher beschriebenen Ansätze der Resistenzzüchtung fußen auf der klassischen Kreuzung zweier Elternsorten – mindestens eine davon ist schorffresistent – und dem Heranwachsen neuer resistenter Sämlinge mit komplett neuen Eigenschaften. Es kann aber unter Umständen auch erwünscht sein, bereits etablierte, schorffanfällige Qualitätssorten beizubehalten und dahingehend zu verbessern, dass sie auch eine Schorfresistenz erhalten. Dies funktioniert entweder durch dutzendfach wiederholte Rückkreuzung im Laufe von vielen Jahrzehnten oder über neue Züchtungsmethoden. Bei diesen erfolgt der Einbau des Resistenzgens in das Genom einer Qualitätssorte im Labor und zwar über Methoden namens Cisgenese oder CRISPR/Cas9. Die ersten

cisgenen Gala-Bäume mit *Vf* standen für Forschungszwecke bereits im Versuchsfeld von Agroscope Schweiz. Ebenso wird an der Genschere CRISPR/Cas9 geforscht, welche im Apfel zu erhöhter Resistenz gegen Schorf führen soll. Das Ergebnis beider Ansätze sind neue Varianten etablierter Sorten, die eine zusätzliche Eigenschaft erhalten haben (die Schorfresistenz), sich aber von klassischen Kreuzungsprodukten, die in einem viel längeren Zeitraum gezüchtet werden müssten, nicht unterscheiden. Zum aktuellen Zeitpunkt fallen diese Technologien juristisch gesehen noch in die Kategorie Gentechnik und sind deshalb in Europa nur für Forschungszwecke einsetzbar. Sollte sich diese Einstufung in der Zukunft aber ändern, stünde eine Vielzahl weiterer Möglichkeiten zur Verfügung, um dem Schorf und auch weiteren Pilzkrankheiten besser entgegenzutreten zu können. 🍏

thomas.letschka@laimburg.it