

„Prägung“: alternative Resistenzen für Baumarten

Pflanzenschädlinge und eingeschleppte Krankheiten stellen eine wachsende Bedrohung für die Stabilität von heimischen Waldökosystemen dar. Die klassische Forstpflanzenzüchtung verfügt aber nur über eingeschränkte Mittel, sich kurzfristig diesen Herausforderungen zu stellen, da meistens die dafür erforderlichen resistenten Bäume fehlen. Die Förderung von Resistenzen durch erworbene individuelle Immunität („Prägung“) hat ein großes Potenzial für die Rettung bedrohter Baumarten.

Hans Hönicka, Matthias Fladung

Der weltweit wachsende Handel hat alte existierende geografische Grenzen inzwischen vollständig überwunden. Das ungewollte Verschleppen von Mikroorganismen, Pflanzen und Tieren zwischen geografisch weit getrennten Gebieten war früher ein seltenes Ereignis. Das hat sich in den letzten Jahrzehnten radikal geändert. Aus der gezielten Einführung nicht-einheimischer Arten hat die Menschheit sehr profitiert, da viele Arten für die Land- und Forstwirtschaft unschätzbar geworden sind. Dazu gehören krautige Pflanzen wie die Kartoffel, der Mais und die Tomate und verschiedene Baumarten, wie die Gewöhnliche Douglasie (*Pseudotsuga menziesii*) und die Roteiche (*Quercus rubra*).

Die Einführung von nicht-einheimischen Tier- und Pflanzenarten hat erfahrungsgemäß meistens keine negativen Folgen für die betroffenen Ökosysteme [1, 2]. Dennoch sind nicht-einheimische Arten manchmal in der Lage, sich an neuen Lebensräumen so gut anzupassen, dass die einheimischen Arten von ihnen verdrängt werden. Die Erfahrungen in der Vergangenheit haben gezeigt, dass etwa 10 % der eingeführten, nicht-einheimischen Arten invasiv werden können. Biologische Invasionen gelten bereits als zweitwichtigster Gefährdungsfaktor der biologischen Vielfalt, der

in seiner Wirkung nur durch die Änderung anthropogener Landnutzungen übertroffen wird [3]. Der Klimawandel kann diese Problematik zusätzlich verschärfen, da häufig nicht-einheimische Arten sich besser an die neuen klimatischen Bedingungen als heimische Arten anpassen können.

Bedrohung der Wälder durch invasive Organismen

Die wachsende Anzahl von invasiven, nicht-einheimischen Insekten, Pilzen und Mikroorganismen stellt für Waldökosysteme eine große Gefahr dar. Das sogenannte „Ulmensterben“, das von den ostasiatischen Schlauchpilzarten *Ophiostoma ulmi* und *O. novo-ulmi* verursacht wird, ist ein gutes Beispiel dafür. Beide Pilzarten wurden wahrscheinlich Anfang des letzten Jahrhunderts mit Nutzholz nach Europa eingeschleppt. Die Feldulme (*Ulmus minor*) und die Bergulme (*Ulmus glabra*) werden von beiden Pilzarten stark befallen. Folglich sind bereits Millionen von europäischen Ulmen der

Krankheit zum Opfer gefallen und ein Ende der Seuche ist nicht in Sicht (s. Abb. 1).

Ein aktuelles Beispiel einer durch den Befall mit einem eingeschleppten Pilz bedrohten Baumart ist die Gemeine Esche (*Fraxinus excelsior*). Das durch den ostasiatischen Pilz (*Hymenoscyphus fraxineus*) verursachte Eschentriebsterben (Abb. 2) bedroht die Gemeine Esche grundlegend in ihrer Exis-

tenz. Der Pilz wurde wahrscheinlich zusammen mit infizierten Eschenpflanzen bzw. -samen nach Europa eingeschleppt. Eindeutige Krankheitssymptome wurden bei Eschenpopulationen erstmals in den frühen 1990er-Jahren in Polen und Litauen beobachtet. Von dort aus breitete sich der Pilz schnell im gesamten natürlichen Verbreitungsgebiet der Gemeinen Esche aus.

Klassische Bekämpfungsmaßnahmen gegen invasive Pilzkrankheiten im Wald

Wenn eine Bedrohung von Baumarten durch eingeschleppte Krankheiten zu befürchten ist, stellt die klassische Forstpflanzenzüchtung eine Möglichkeit dar, resistente Bäume zu erzeugen. Leider stößt die Resistenzzüchtung bei Bäumen häufig an ihre Grenzen. Neben den langen Zeiträumen, die eine Forstpflanzenzüchtung objektbedingt benötigt, ist das Hauptproblem, dass für die eingeschleppten Krankheiten häufig keine resistenten Bäume verfügbar sind (Abb. 2). Der Grund hierfür liegt hauptsächlich an dem fehlenden Selektionsdruck für diese Krankheiten. Die Identifizierung von resistenten Bäumen im Wald gleicht „der Suche nach der Nadel im Heuhaufen“.

Die Geschichte der Maßnahmen gegen das Ulmensterben beschreibt diese Problematik sehr anschaulich. Intensiv durchgeführte Züchtungsprogramme mit europäischen Ulmen konnten diese Krankheit in 100 Jahren nicht besiegen. Allerdings werden dennoch die betroffenen Ulmenarten wahrscheinlich nicht aussterben, da junge Ulmen von dem Pilz nicht befallen werden und nicht erkranken. Daher können diese Bäume in Strauchform überleben und sich auch vermehren.

Schneller Überblick

- Resistenzen werden nicht nur von den Gensequenzen bestimmt
- Die „Resistenzprägung“ hat ein großes Potenzial für die Rettung bedrohter Baumarten
- Veränderungen beim Epigenom sowie das endophytische Mikrobiom sind bei der „Prägung“ Schlüsselfaktoren



Foto: H. Hönicka

Abb. 1. Das Ulmensterben bedroht seit 100 Jahren die Populationen von Feld- und Bergulmen in Deutschland. Diese Krankheit wird von ostasiatischen Schlauchpilzarten aus der Gattung *Ophiostoma* ausgelöst. Das Foto zeigt tote Feldulmen bei Magdeburg in Sachsen-Anhalt.

Die Leidensgeschichte der Ulmen scheint sich jetzt mit der Gemeinen Esche zu wiederholen. Die Existenz der Esche als wertvolle Baumart wird allerdings vom pilzlichen Erreger des Eschentriebsterbens besonders stark bedroht, da anders als bei der Ulme neben alten auch junge Eschen von dieser Krankheit befallen werden. Aus diesem Grund könnte diese Pilzkrankheit gravierendere Konsequenzen für das Überleben der Eschen haben als die Ulmenkrankheit für die europäische Ulmenpopulationen bisher hatte.

Ein anderer Ansatz zur Förderung von Krankheitsresistenz basiert auf interspezifischen Kreuzungen. Dabei werden die einheimischen, krankheitsanfälligen Baumarten mit resistenten, fremdländischen Arten gekreuzt. Durch solche sogenannten interspezifischen Hybridisierungen konnten in der Vergangenheit resistente Ulmenhybriden erhalten werden. Allerdings wird die Einkreuzung fremdländischen Genmaterials in den

heimischen Genpool kritisch gesehen, da die Freisetzung solcher Hybriden den Gen-Pool der betroffenen Arten verändert. Verschiedene internationale Abkommen und nationale Gesetze regeln und beschränken die Nutzung von nicht-einheimischen Organismen in Deutschland. Dazu gehören international das Übereinkommen für die Biologische Vielfalt CBD (2000), die Berner Konvention (2003) sowie die EU-Verordnung zu invasiven Arten (Nr. 1143/2014) und auf nationaler Ebene das Bundesnaturschutzgesetz (BNatSchG), Bundesartenschutzverordnung (BArtSchV), das Pflanzenschutzgesetz, das Bundeswaldgesetz, die Saatgutverordnung und das Sortenschutzgesetz.

Ein weiteres Problem der klassischen Forstpflanzenzüchtung zur Resistenzförderung stellen die langen Generationszeiten der Baumarten dar, d. h. Bäume entwickeln erst nach einer sehr langen nicht-reproduktiven Phase zum ersten Mal Blüten [4]. Aus diesem Grund kön-

nen, je nach Baumart, die ersten Kreuzungsnachkommenschaften erst nach sieben bis vierzig Jahren erzeugt werden. Dieses Problem hat die Entwicklung der Forstpflanzenzüchtung stark gebremst.

Alternative Strategien zur Förderung von Resistenzen in Forstbäumen

Zur Förderung von Resistenzen bei bedrohten Baumarten werden dringend alternative Methoden benötigt. Der Ansatz von Gentechnik und Genomeditierung hat ein großes Potenzial zur Förderung von Resistenzen und der frühzeitigen Blüte [5]. Dennoch werden beide Methoden von der Öffentlichkeit und der Politik in Deutschland bisher nicht akzeptiert [1]. Das Gesetz zur Regelung der Gentechnik (GenTG, 1990) hat die praktische Nutzung von genveränderten Pflanzen in Deutschland jahrzehntelang behindert. Der Europäische Gerichtshof hat dieses Jahr entschieden, dass auch



Foto: H. Hönicka

Abb. 2: Das Eschentriebsterben ist eine Krankheit, die durch den ostasiatischen Pilz (*Hymenoscyphus fraxineus*) verursacht wird. Die Suche nach resistenten Bäumen bleibt oft ohne Erfolg. Die Krankheitstoleranz der Bäume kann von Jahr zu Jahr variieren. Zunächst als „resistent“ eingestufte Bäume erweisen sich oft später als nicht resistent. Das Foto zeigt kranke und gesunde Eschen beim Forstamt Schuenhagen in Mecklenburg-Vorpommern.

die Genomeditierung in der EU den Gentechnik-Richtlinien folgen muss. Diese Entscheidung betrifft auch Pflanzen, die keine fremden Gene beinhalten. Daher ist in Europa die Anwendung beider Züchtungsmethoden für die angewandte Resistenzforschung sehr schwierig.

Aufgrund der in einigen Baumarten sich aktuell rasch ausbreitenden Krankheiten und der zukünftig in Anbetracht der Folgen des derzeit stattfindenden Klimawandels auch für andere Baumarten zu prognostizierenden Probleme, ist die Suche nach effizienten Methoden für eine Resistenzbildung eine wichtige Aufgabe der Resistenzforschung. Die „Prägung“ ist eine Methode, die das Potenzial hat, bei bedrohten Baumarten die Förderung von Resistenzen entscheidend voranzutreiben. Unter „Prägung“ wird ein physiologischer Zustand verstanden, der den Zellen/Pflanzen eine schnellere und robustere Abwehrreaktion gegenüber Stressfaktoren (biotisch oder abiotisch) ermöglicht.

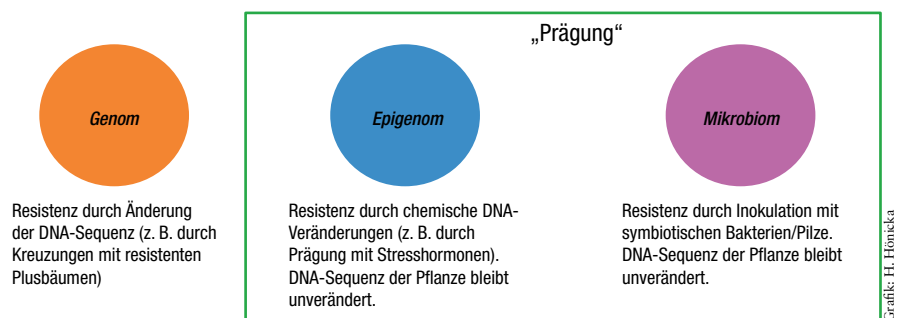
Bisher wurden die Ursachen von Resistenzen bevorzugt auf genetischer Ebene gesucht. Dennoch zeigen immer mehr veröffentlichte Studien, dass Resistenzen und andere Merkmale nicht nur von den Gensequenzen bestimmt werden (Abb. 3). Durch „Prägung“ geförderte Resistenzen verändern die DNA-Sequenz nicht. Veränderungen beim Epigenom [6] sowie das endophytische Mikrobiom [7] sind

bei der „Prägung“ [8] Schlüsselfaktoren (Abb. 3). Das Epigenom besteht aus einem Satz von chemischen Veränderungen der DNA und der Proteine, die eng mit der DNA assoziiert sind. Unter dem endophytischen Mikrobiom wird die Gesamtheit aller Mikroorganismen (meistens Pilze und Bakterien) verstanden, die in den Pflanzen leben.

Es ist schon lange bekannt, dass genetische Veränderungen, d. h. Variationen der Gensequenzen, an die Nachkommenschaft weitergegeben werden. Dennoch konnte jetzt belegt werden, dass Pflanzen auch über weitere Strategien verfügen, Informationen an ihre Nachkommen weiterzugeben und diese damit anpassungsfähiger zu machen. Die Weitergabe von

epigenetischen Veränderungen [9], Endophyten [10] sowie durch „Prägung“-induzierte Merkmale [11] an die Nachkommenschaft wurde bereits mehrfach beschrieben. Diese neuen Erkenntnisse haben für die Resistenzzüchtung der Zukunft bei langlebigen Waldbäumen eine unermessliche Bedeutung.

Mithilfe der „Prägung“ konnte bereits mehrfach bei krautigen Pflanzen eine schnelle Resistenzverbesserung herbeigeführt werden [8, 12]. „Prägung“ wird in der Pflanze durch die Erkennung von Stressfaktoren, natürlichen und künstlichen Substanzen, wie z. B. Pipecolinsäure, Methyljasmonat und β -Amino-Buttersäure (BABA), aber auch durch Endophyten ausgelöst. Obwohl dieses Phänomen



Grafik: H. Hönicka

Abb. 3: Die Induktion von Resistenzen ohne die Änderung der DNA-Sequenz ist durch „Prägung“ möglich. Die „Prägung“ ist ein physiologischer Zustand, der den Zellen/Pflanzen eine schnellere und robustere Abwehrreaktion gegenüber Stressfaktoren (biotisch oder abiotisch) ermöglicht. Epigenetische und mikrobiomische Veränderungen sind die Basis der „Prägung“.

bereits seit den 1930er-Jahren bekannt ist, weiß man bisher wenig über die zugrunde liegenden molekularen Prozesse. Dennoch konnten bereits in mehreren Fällen durch „Prägung“ entwickelte Resistenzen epigenetischen Faktoren zugeschrieben werden [12]. Die Induktion von Resistenzen durch „Prägung“ bei Reis- und Kartoffelpflanzen mit Methyljasmonat bzw. β -Amino-Buttersäure konnte bereits mit epigenetischen Veränderungen verknüpft werden [13, 14].

Mikroorganismen sind für die „Prägung“ auch besonders wichtig. Der Begriff „Holobiont“ betrachtet Pflanzen, aber auch andere eukaryotische Organismen, als Gesamtlebewesen, die aus einem Wirtsorganismus und einer Mehrzahl mit diesen eng zusammenlebenden pro- und eukaryotischen Arten bestehen (Abb. 4). Es gibt unzählige wissenschaftliche Studien, die den Einfluss von endogenen Mikroorganismen auf die biotische und abiotische Widerstandsfähigkeit von Pflanzen zeigen. Die Interaktionen zwischen der „Gastpflanze“ und der besiedelnden Mikroorganismen können äußerst komplex sein. Ein besonders interessantes Beispiel ist die Hitzetoleranz bei *Dichanthelium lanuginosum*. Diese Grasart kann auf geothermischen Böden wachsen, die Temperaturen von bis zu 65° C erreichen können. Die Hitzetoleranz wird durch eine Symbiose mit dem endogenen Pilz *Curvularia protuberata* ermöglicht. Bei Studien zu dieser Symbiose konnte festgestellt werden, dass der Pilz eine Hitzetoleranz nur vermitteln kann, wenn er vom Virus CThTV infiziert ist [15]. Noch interessanter ist die Tatsache, dass diese Hitzetoleranz auf andere Pflanzenarten übertragen werden konnte. Tomatenpflanzen (*Solanum lycopersicon*), inokuliert mit CThTV-infizierten *Curvularia protuberata*, wiesen eine gesteigerte Hitzetoleranz auf. Es gibt unzählige weitere Beispiele bei krautigen Pflanzen, aber auch bei Baumarten. Bei Graupappeln (*Populus x canescens*) beispielsweise konnte gezeigt werden, dass die Behandlung mit dem Mykorrhizapilz *Laccaria bicolor* die Resistenzfähigkeit dieser Baumart gegenüber den Pappelblattkäfer (*Chrysomela populi*) erhöht [16]. Beide Beispiele belegen die komplexen Interaktionen zwischen Pflanzen und Mikroorganismen und die positive Wirkung auf die

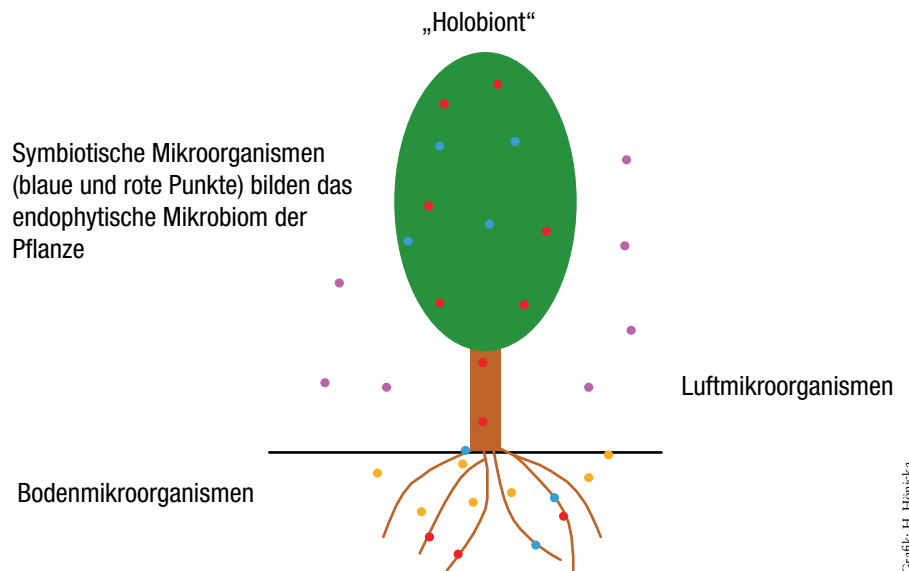


Abb. 4: Der Begriff „Holobiont“ betrachtet Pflanzen, aber auch andere eukaryotische Organismen, als Gesamtlebewesen, die aus einem Wirtsorganismus und einer Mehrzahl mit diesen eng zusammenlebenden pro- und eukaryotischen Arten bestehen. Diese Assoziationen können einen starken Einfluss auf die Widerstandsfähigkeit von Pflanzen haben.

Widerstandsfähigkeit von Pflanzen, die daraus entstehen kann.

Potenzial der „Prägung“ zur Resistenz-Induktion bei bedrohten Baumarten

Die Behandlung von jungen Pflanzen, Samen und Blüten mit „Prägung“ induzierenden Substanzen bzw. endogenen Mikroorganismen wird bereits von mehreren Firmen für die Erhöhung der Widerstandsfähigkeit bei annuellen Pflanzen angewendet, z. B. Indigo Agriculture (www.indigo.com) und Seminis (www.seminis.com). Die von beiden Firmen verfolgte Strategie könnte zukünftig auch für Forstbäume zur Förderung von Resistenzen angewendet werden.

Literaturhinweise:

- [1] HOENICKA, H.; FLADUNG, M. (2006); *Trees* 20:131-144. [2] WILLIAMSON, M. (1993); *Experientia* 49:219-224. [3] KOWARIK, I. (2003); *Biologische Invasionen*, Verlag Eugen Ulmer GmbH & Co. [4] FLADUNG, M. (1998); *Vortr. Pflanzenzüchtung* 43:124-133. [5] FLADUNG, M.; HÖNICKA, H. (2016); *AFZ-DerWald* 23/2016, S. 21-23. [6] LUNA, E.; TON, J. (2012); *Plant Signal Behav* 7:615-8. [7] GOPAL, M.; GUPTA, A. (2016); *Front Microbiol* 7:1971. [8] BECKERS, G.J.; CONRATH, U.; (2007); *Curr Opin Plant Biol* 10:425-31. [9] QUADRANA, L.; COLOT, V. (2016); *Ann Rev Genet* 50:467-491. [10] GUNDEL, PE.; RUDGERS, JA.; WHITNEY, KD. (2017); *Am J Bot* 104: 78-792. [11] RAMÍREZ-CARRASCO, G.; MARTÍNEZ-AGUILAR, K.; ALVAREZ-VEGAS, R. (2017); *Front. Plant Sci* 8:696. [12] CONRATH, U. (2015); *Ann Rev Phyt* 53:97-119. [13] MELLER, B.; KUZNICKI, D.; ARASIMOWICZ-JELONEK, M.; DECKERT, J.; FLORYSZAK-WIECZOREK, J. (2018); *Front. Plant Sci* 9:1228. [14] BERTINI, L.; PROIETTI, S.; FOCARACCI, F.; SABATINI, B.; CARUSO, C. (2018); *J Plant Physiol* 228:166-177. [15] MÁRQUEZ, LM.; REDMAN, RS.; RODRIGUEZ, RJ.; ROOSSINCK, MJ. (2007); *Science* 315:513-5. [16] KALING, M.; SCHMIDT, A.; MORITZ, F.; ROSENKRANZ, M.; WITTING, M.; KASPER, K.; JANZ, D.; SCHMITT-KOPPLIN, P.; SCHNITZLER, JP.; POLLE, A. (2018); *Plant Physiol* 176:2639-2656.

Im Rahmen des Forschungsprogramms „Waldklimafonds“ wird seit 2017 im Thünen-Institut für Forstgenetik das Potenzial der „Prägung“ zur Resistenzförderung bei bedrohten Baumarten getestet. Dabei sollen geeignete Methoden etabliert werden, die zu einer Resistenzsteigerung bei der Feldulme und der Gemeinen Esche führen. Hierfür werden verschiedene abiotische und biotische „Prägungs“-Methoden getestet. Bei der abiotischen „Prägung“ werden Samen und junge Pflanzen beider Baumarten mit verschiedenen Konzentrationen von BABA behandelt. Die biologische „Prägung“ wird mit Mikroorganismen durchgeführt, die bereits bei anderen Pflanzenarten Resistenzen gefördert haben. Darüber hinaus werden Methoden getestet, die eine Mikrobiomübertragung von resistenten auf nicht-resistente Arten ermöglichen. Nach der „Prägung“ werden die behandelten Bäume zunächst im Gewächshaus angezogen und anschließend auf Trockentoleranz und Pilzresistenz überprüft. Später sollen diese Bäume im Rahmen eines Feldversuches getestet werden.

Dr. Hans Hönicka,
hans.hoenicka@thuenen.de,
ist wissenschaftlicher Mitarbeiter
beim Thünen-Institut für Forstgenetik
in Großhansdorf. PD Dr. Matthias Fladung,
ist stellvertretender
Institutsleiter.

