



Abbildung 1 (von links): Gespaltenes Ahornstumpf mit charakteristischer Riegelstruktur; mikroskopische Aufnahme von geriegeltem Ahorn, In-Vitro-Kulturen von Ahornbäumen, historisches Cello mit geriegeltem „Fiddleback“-Ahornboden
Fotos: Volker Haag (3), Germann Violins e.K (2)

Die Riegelung des Holzes (Teil I)

Wissenschaftler der Fachbereiche Holzanatomie, Genetik und Pflanzenzucht entdecken Anhaltspunkte für Wachstumsmerkmal

Von Volker Haag¹, Cornelia Bäucker², Andreas Meier-Dinkel⁴, Anne-Mareen Eisold², Annette Fuchs³, Imke Hutter⁶, Vitalina Karfik⁴, Tim Lewandrowski¹, Heike Liesebach⁸, Mona Quambusch⁷, Lothar Schatz⁵, Volker Schneck² und Michael Wallbraun³

Seit Dekaden beschäftigen sich Wissenschaftler unterschiedlichster Disziplinen mit einer besonderen Wuchseigenschaft einer Vielzahl von Hölzern, der Riegelung. Neben der charakteristischen Ästhetik, die die „wellenförmige“ Holzstruktur hervorbringt, werden den Hölzern auch spezielle physikalische und technische Qualitäten wie die Unterstützung der akustischen Eigenschaften und besonders hohe Festigkeiten zugesprochen. Bereits vor über 300 Jahren hatte Antonio Stradivari (1648–1737) die Besonderheiten des Riegelahorns erkannt und nutzte sie für den Bau seiner Instrumente. Während die Ursachen der Wuchseigenschaft immer noch weitestgehend ungeklärt sind, bemüht sich seit 2015 ein Team aus Wissenschaftlern und Pflanzenzuchtexperten um die Vermehrung von Riegelahornbäumen und sucht nach Erklärungen des Phänomens. Nach acht Jahren Projektarbeit glaubt man nun, erste richtungweisende Anhaltspunkte gefunden zu haben.

Die „Riegelung“ ist lediglich eines einer ganzen Reihe unterschiedlicher wertsteigernder Strukturmerkmale, die in bestimmten Gruppen von Holzarten teilweise regelmäßig, teilweise unregelmäßig auftreten. Was sie alle eint, ist, dass sie im Vergleich zu schlicht gewachsenem Holz eine weitaus individuellere Ästhetik besitzen, und es gilt: je seltener, desto kostbarer.

Die bekanntesten Hölzer, die neben den schlichten Sortimenten sehr hohe Preise erzielen, sind beispielsweise Vogelaugenahorn (Abbildung 2 I) (meist aus dem amerikanischen Zuckerahorn (*Acer saccharum*), gemaserte Hölzer, die auch als Wurzelhölzer angeboten werden (Abbildung 2 II+III) oder Hölzer mit besonders ausgeprägtem Wechseldrehwuchs, wie wir es von einer ganzen Reihe Tropenhölzern, beispielsweise den Meliaceae (Mahagonigewächsen) und hier insbesondere der Holzart Sapeli (*Entandrophragma cylindricum*), kennen. Die genannten Wuchsformen unterscheiden sich von dem Phänomen der Riegelung (Abbildung 2 V+VI) u. a. darin, dass ihre Entstehung, abgesehen von spezifischen Details, im Zusammenhang mit Infektionen erklärt werden kann.

So handelt es sich beim Vogelaugenahorn beispielsweise um ständigen Austrieb von Proventiv- bzw. Adventivknospen, die dann im Wachstum wieder überwallen, wodurch das Holz einen verwirbelten Faserlauf ausprägt. Die sogenannten Maserknollen (oder Maserkröpfe) entstehen hingegen in krankhaften knollenartigen Tumorerwucherungen, die an bestimmten Baumarten wie Nussbaum (*Juglans* spp.) (Abbildung 2 III), Amboina (*Pterocarpus* spp.) oder der Baumheide (*Erica arborea*), die für die berühmten Bruyère-Pfeifen verwendet wird (u. v. m.), sehr regelmäßig auftreten (Richter 2019). Ebenso sind der Wechseldrehwuchs und die meisten Ursachen für die Streifungen bestimmter Furnierhölzer sehr gut verstanden und erklärt worden. Bei der Riegelung ist das bis heute nicht der Fall. Hier sind weder die Ursachen, noch was in der Holzbildung geschieht oder welche Vor- und Nachteile beispielsweise für die Statik des lebenden Baumes, den Nährstofftransport oder die Wasserleitung resultieren, bekannt (Naujoks et al. 2013; Ewald and Naujoks 2015, Quambusch et al. 2021).

Ein Grund für die wenigen bekannten Daten ist, dass es sehr schwierig ist, klärende Studien durchzuführen, da man es einem lebenden Baum von außen nicht ansehen kann, ob und wie stark eine Riegelung ausgeprägt ist. Bekannt ist lediglich, dass das Phänomen selten ist und der „Riegelahorn“ im gesamten geografischen Verbreitungsgebiet von beispielsweise dem Bergahorn (*A. pseudoplatanus*) mit einer Häufigkeit von bis zu 7% beobachtet werden kann, manchmal mit lokalen Konzentrationen, die von den Standortbedingungen unabhängig zu sein scheinen (Conrad 1988; Krajnc et al. 2015). Mit den Fortschritten in der Vermehrung von geriegelten Bäumen verschiedener Pflanzenfamilien und Gattungen, die im Rahmen der Projekte entstanden sind,

scheinen spezifischere Untersuchungen jedoch in Zukunft planbarer.

Zwei Verbundprojekte mit sechs Projektpartnern

In Deutschland beschäftigt sich seit 2015 ein Team von sechs Projektpartnern, genauer die RLP Agrosience GmbH, die Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt (NW-FVA), das Thünen-Institut für Forstgenetik, das Reinhold Hummel GmbH & Co. KG und das Institut für Pflanzenkultur

GmbH & Co. KG, mit der Erforschung der besonderen Wachstumsanomalie im Kontext der Holzbildung sowie Vermehrung geriegelter Klone und deren Vermarktung und Pflanzenzüchtung im Rahmen von zwei umfangreichen Verbundprojekten.

Im Projekt „Riegelahorn“ (Laufzeit 2015 bis 2019, gefördert von der Landwirtschaftlichen Rentenbank) erarbeiteten die Experten Methoden zur Identifizierung, Erhaltung, Vermehrung und Nutzung selektierter Riegelahorn-Bäume für die Wertholzproduktion. Das Ziel des Projekts „Wertholz“ (Laufzeit

2021 bis 2024, gefördert von der Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe) ist die Erhöhung des Wertschöpfungspotenzials europäischer Wirtschaftsbaumarten. Hierzu sollen neben Bergahorn auch für andere Baumarten Methoden erarbeitet werden, die zur Identifikation, Erhaltung, Vermehrung und Verwertung von Bäumen mit besonderen Holzstrukturen beitragen. Inhalt beider Projekte waren Arbeiten im Zusammenhang mit erstens der Sicherung, der In-vitro-Vermehrung und der geneti-

Fortsetzung auf Seite 818



Abbildung 2 Vogelaugenahorn (I), Rosskastanie-Maser (II), Nussbaum-Maser (III), Ahorn-Maser mit partieller Riegelung (IV), Riegelahorn mit grober Riegelung (V), Riegelahorn mit feiner Riegelung (VI), gemuschelter Ahorn (VII), pommeliertes Sapeli-„Pommelé“ (VIII), pommeliertes Sapeli mit vereinzelt „Eisblumen“ (IX).
Fotos: Volker Haag

¹ Thünen-Institut für Holzforschung, Hamburg

² Thünen-Institut für Forstgenetik, Waldsiedersdorf

³ RLP Agrosience GmbH, Neustadt an der Weinstraße

⁴ Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt (NW-FVA), Hann. Münden

⁵ Reinhold Hummel GmbH & Co. KG, Stuttgart

⁶ Institut für Pflanzenkultur GmbH & Co. KG, Schnega

⁷ Julius Kühn-Institut, Institut für Pflanzenschutz in Gartenbau und urbanem Grün, Braunschweig

⁸ Thünen-Institut für Forstgenetik, Großhansdorf

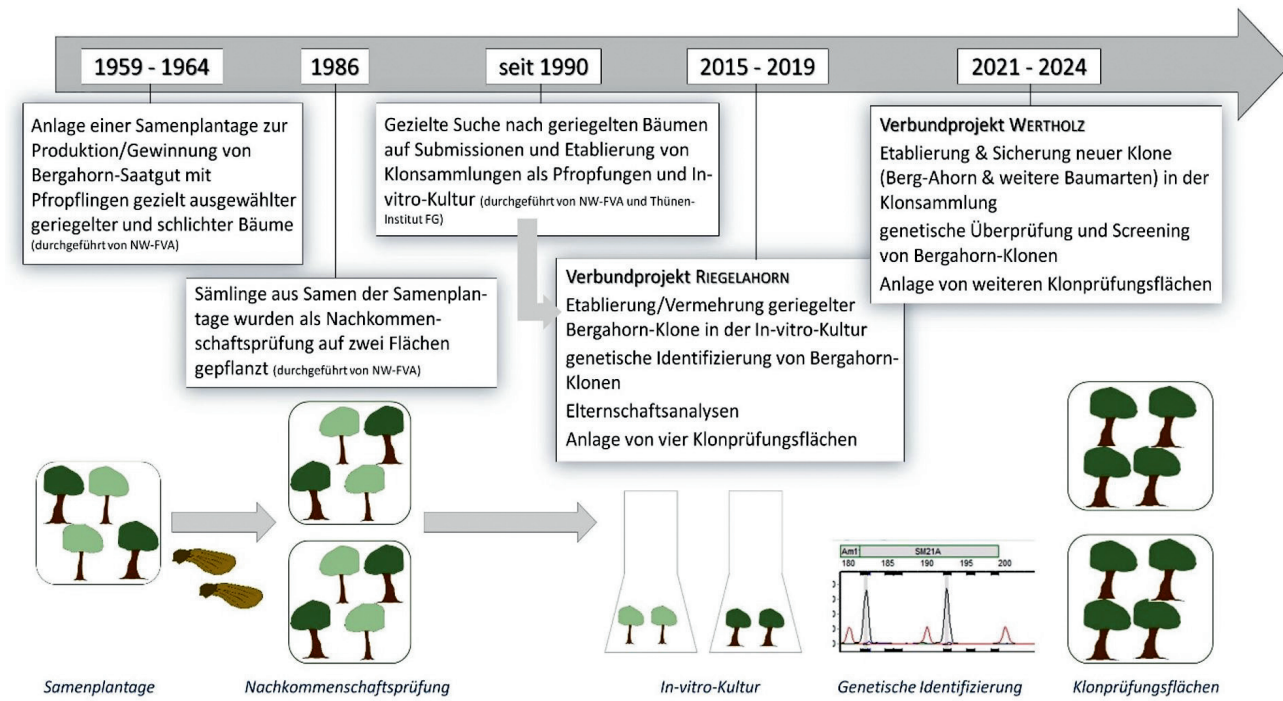


Abbildung 3 Überblick über den zeitlichen Rahmen der Forschung zur Untersuchung und Sicherung geriegelten Materials bei der Baumart Bergahorn. Die Submissionsbäume in der Vorlauforschung (seit 1990) waren eine Voraussetzung für die Forschung, die im Riegelahornprojekt durchgeführt werden konnte.

Die Riegelung des Holzes (Teil I)

Fortsetzung von Seite 817

schon Identifizierung von Riegelahorn-Material ausgewählter Spenderbäume, zweitens der Anlage von Klonprüfungsflächen und drittens der Erforschung der Ursache für die Riegelung. Eine Besonderheit beider Projekte ist das einzigartige Untersuchungsmaterial, welches bereits aus einer fast 75 Jahre andauernden Vorgeschichte hervorgeht (Abbildung 3).

Jahrzehnte der Forschung

Die Frage nach den Ursachen und der Vererbbarkeit der Riegelung ist für zukünftige Züchtungsbestrebungen von hoher Relevanz. Bereits in den 1950er-Jahren wurde das Potenzial gerieglter Bäume erkannt und von 1959 bis 1964 eine Samenplantage aus Pflanzungen von Bergahorn zur Gewinnung hochwertigen Saatgutes an der NW-FVA im Forstamt Reinhardshagen angelegt. Die Kriterien zur Auswahl der Plus-Bäume umfassten verschiedene Parameter wie Geradschaftigkeit, Wuchseistung oder Besonderheiten des Holzes. Unter den insgesamt 21 ausgewählten Plus-Bäumen befanden sich auch einige mit Riegelung sowie ein Vogelaugenahorn. Aus der Samenplantage wurde im Jahr 1983 Saatgut von elf Klonen geerntet. Die aus dem Saatgut angezogenen Sämlinge wurden 1986 in einer Nachkommenschaftsprüfung zur späteren Bewertung der Wuchseigenschaften und holzanatomischen Merkmale auf zwei Flächen in Hessen angepflanzt, im Forstamt Romrod und in Schotten. Die inzwischen fast 40-jährigen Nachkommenschaften erlauben eine Bewertung des Holzes hinsichtlich der Riegelung. Somit besteht die Chance, anhand der bekannten Samenplantageneltern die mögliche Vererbung der Riegelung nachzuverfolgen und daraus weitere Erkenntnisse zu gewinnen.

Parallel wird das Material der gefällten Nachkommen durch Pflanzung und In-vitro-Etablierung in der Gewebekultur gesichert. Die Sicherung über das Verfahren der Gewebekultur ist möglich, da seit 1990 Methoden für die Kultivierung klonalen Materials unter sterilen Bedingungen entwickelt wurden. Diese Forschungen waren verbunden mit der gezielten Suche nach geriegelten Bäumen, vor allem von Bergahorn, um diese als Klone in die Gewebekultur zu bringen (Ewald & Naujoks 1995).

Im Vorfeld des Projekts konnte so bereits Material von mehreren Bergahorn-Klonen in-vitro etabliert werden. Zusätzlich wurden verschiedene Versuchsserien durchgeführt und die ersten Rezepte für die Nährböden in den unterschiedlichen Phasen der Gewebekultur ausgehend von der In-vitro-Etablierung über In-vitro-Vermehrung bis hin zur In-vitro-Bewurzelung entwickelt (Ewald & Naujoks 2015). Durch diese Pionierarbeiten wurde der wissenschaftliche Grundstock für die im Projekt „Riegelahorn“ erfolgten Forschungsarbeiten gelegt, die derzeit im Projekt „Wertholz“ fortgeführt und auf weitere Baumarten ausgedehnt werden (Abbildung 3).

Was genau ist Riegelung?

Bei der Riegelung handelt es sich um einen S-förmigen Verlauf der Holzstruktur entlang der radialen Holzstrahlen bzw. entlang der Holzstrahlen (Abbildung 4A). Diese kann leicht mit anderen wellenartigen Strukturverläufen im Holz verwechselt werden. Für die Erforschung der Entstehung und das Verständnis der Riegelung im physiologischen Kontext ist es wichtig, sie von anderen „Wellen“ im Holz zu differenzieren. Christoph Richter hat in seinen bekannten Büchern „Holzmerkmale“ und „Die Holzmerkmale der Bäume“ deutlich veranschaulicht, wie die Wellentypen unterschieden werden können. So ist die Unterscheidung zur sogenannten Wimmerung (oder auch Elefantenhaut) wichtig, die exakt orthogonal (90°) zur Riegelung verläuft (Abbildung 4B).

Diese findet sich häufig an der Stammbasis oder unterhalb von Astansätzen. Im Gegensatz zur Riegelung ist die Wimmerung meist deutlich auf der Stammoberfläche sichtbar, weniger gleichmäßig und breitet sich nicht über den ganzen Stamm aus (Richter 2015 und 2019). Abbildung 4C zeigt ergänzend eine dritte Möglichkeit eines welligen Verlaufs, der in verschiedenen Hölzern beobachtet werden kann, die Haselung. Die Haselung verläuft innerhalb der Jahringgrenzen und tritt häufig bei Nadelhölzern beispielsweise der sogenannten „Haselfichte“ auf und gilt (ähnlich der Riegelung) als optisches wie akustisches Qualitätsmerkmal bei Resonanzhölzern.

In seltenen Fällen jedoch ist es auch möglich, dass bestimmte Wachstumsmerkmale gleichzeitig auftreten und besonders einzigartige Holzstrukturen erkennbar werden. Bei einheimischen Hölzern wie beispielsweise Ahorn oder Rosskastanie wird daher ein besonderes Sortiment als „gemuschelt“ (Abbildung 2 VII) bezeichnet. Nach Richter handelt es sich dabei um das Aufeinandertreffen von Riegelung, Wimmerung und einem ausgeprägten Dreh- oder Wechseldrehwuchs. Aus dieser Kombination resultiert auch die Entstehung der besonders seltenen „Pommelerung“, die u.a. bei allen Meliaceae aus den Tropen Afrikas, aber auch Teak oder Akazien (u.v.m.) auftreten kann. Bei dem Sortiment „Pommelé“ (Abb. 2 VIII) handelt es sich um pommeliertes Sapeli (*Entandrophragma utile*). In besonderen Fällen wird diese Struktur auch als „Eisblumen“ bezeichnet, wenn dort einzelne, rundlich oder ovale Blütenstrukturen (Abbildung 2 IX) erkennbar werden.

Wie wird das Holz genutzt und welchen Einfluss hat die Struktur auf die Verwendung?

Geriegeltes Holz, insbesondere das des Bergahorns, findet weitgehend Anwendung im hochpreisigen Möbel- und Instrumentenbau. Nicht zuletzt wegen seiner Seltenheit und damit einhergehender ökonomischer Relevanz findet dieses Phänomen auch in der Wissenschaft Interessenten. Seit Jahrhunderten zieren geriegelte Furniere die Rückseiten der teuersten Violinen und Cellos. Dies wirft die Frage auf, ob es sich etwa bei der Auswahl von geriegeltem Ahornholz nur um reine Ästhetik handelt, oder ob es auch quantitativ messbare physikalische Größen mit Einfluss auf die akustischen Eigenschaften des verwendeten Materials gibt.

Tatsächlich zeigen Untersuchungen, dass die spezifische Steifigkeit, also das Verhältnis von E-Modul zur Rohdichte des Materials, bei geriegeltem Ahornholz im Gegensatz zu gradfaserigen Vergleichsproben niedriger ist, während der Verlustfaktor, in der englischen Literatur „internal friction“ genannt, in geriegelten Proben höher ist (Alkadri et al. 2016, Alkadri et al. 2018). Der Verlustfaktor beschreibt den inneren Widerstand eines festen Körpers gegen Verformung (Meriam & Kraige 2002) und damit den Dämpfungseffekt in einem Bauteil. Höhere innere Dämpfung in bspw. Musikinstrumenten kann

oft wünschenswert sein, weil so Vibrationen reduziert werden.

Bei Betrachtung der subzellularen Ebene gibt es noch Wissenslücken. Es ist bekannt, dass der Winkel, in dem die Zellulosefibrillen in der Zellwand zur Zellachse ausgerichtet sind, der Mikro-fibrillenwinkel, die mechanischen Eigenschaften beeinflusst (Burgert 2006). Es liegt also nahe, dass dieser Winkel einen Einfluss auf die Ausprägung der Riegelung hat. Dies ist bisher aber noch nicht ausreichend geklärt. Allerdings gibt es Hinweise, die einen Zusammenhang zur Bildung von Wechseldrehwuchs nahelegen (Brémaud et al. 2010).

Grundsätzlich zeigen aktuelle Untersuchungen, dass es klare Verbindungen zwischen physikalisch-mechanischen Parametern und akustischen Eigenschaften gibt (Dinulica et al. 2023) und dass die Holz Anatomie diese mitbestimmt. Allerdings ist die Riegelung ein Merkmal mit einer hohen Variabilität, sodass einige Bäume stark ausgeprägten welligen Faserverlauf aufweisen und andere nur schwache Wellen. Darüber hinaus gibt es eine hohe Diversität bei der Ausprägung bzw. der Amplituden der Wellen. Diese können beispielsweise sehr grob (Abbildung 2 V) oder sehr fein (Abbildung 2 VI) ausgeprägt sein. Die Stärke der Ausprägung hat dabei signifikanten Einfluss auf die akustischen Eigenschaften (Alkadri et al. 2018).

Im Hinblick auf die Variabilität des Merkmals ist eine breite Datenbasis wünschenswert, bestehend aus Untersuchungsmaterial unterschiedlicher Provenienzen und Altersgruppen, um herauszufinden, wie sich die Ausprägung der Riegelung im Verlauf des Baumlebens entwickelt und inwieweit die Position im Stamm die Intensität des Merkmals und damit die akustischen Eigenschaften beeinflusst.

Was sind die Ursachen?

Das Bestreben, die Ursache der Riegelung aufzuklären, ist aufgrund der Seltenheit und des hohen Wertes des Holzes sehr hoch. Bis heute konnten aber die Auslöser des Phänomens nicht aufgedeckt werden (Ewald & Naujoks 2015). Über die Ursachen der Riegelung wurde schon lange spekuliert. Zunächst wurden bestimmte Standort- bzw. Umweltbedingungen als mögliche Ursachen vermutet. Dass diese Annahme aber eher unwahrscheinlich ist, unterstreichen folgende Gegebenheiten: Bereits in den 1980er-Jahren gab es Anzeichen für die Stabilität der Ausprägung des Merkmals durch Pflanzung (Conrad 1988). Außerdem hat der geographische Ursprung keinen Einfluss auf die Häufigkeit des Vorkommens des Riegelahorns. Das kam 2015 eindeutig bei einer Untersuchung in Slowenien heraus (Krajnc et al. 2015), die von 2007 bis 2013 die Häufigkeit der auf Submissionen angebotenen Riegelahorn-Stämme im gesamten Verbreitungsgebiet verglichen hat.

Wird Riegelahorn über Pflanzung oder Stecklingsvermehrung an einem anderen Standort als dem des Fundorts gepflanzt, zeigen die so erhaltenen Bäume ebenfalls die Riegelung. Diese Beweisführung gelang dem Thünen-Institut für Forstgenetik, als es im Holz eines elfjährigen Riegelahorn-Stecklings die Riegelung detektieren konnte (Ewald & Naujoks, 2015). Ebenfalls als Indiz für eine Vererbung war eine in den 1970er-Jahren beschriebene Ahornprobe, von der angenommen wird, ein Längsschnitt durch eine Pflanzungsebene zu sein, unten mit deutlich gerieglter und oben mit glatter Holzfasern. Beide Pflanzteile konnten ihre Holzeigenschaft bei identischen Umweltbedingungen behalten.

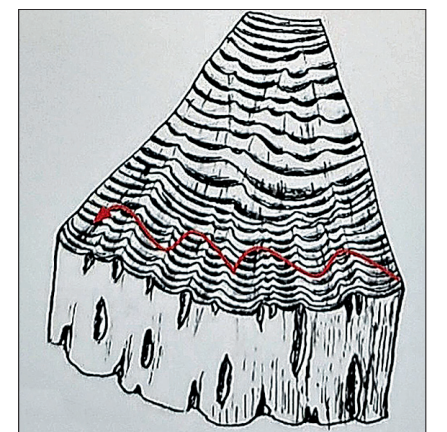
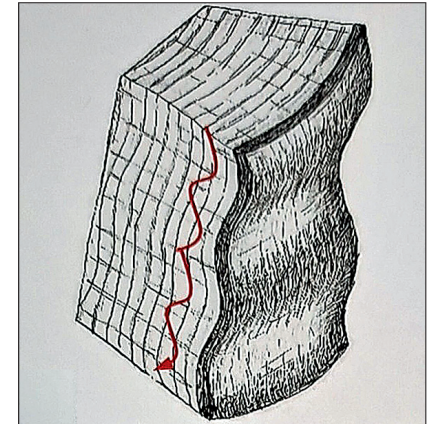
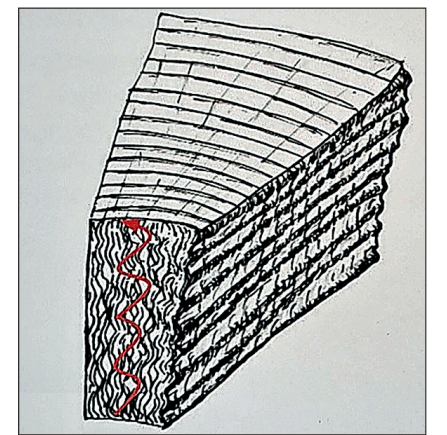


Abbildung 4 Abbildungen verschiedener Wellenmuster in Holz aus „Die Holzmerkmale der Bäume“ (mit freundlicher Genehmigung von Dr. Christoph Richter). Oben: Riegelung, Mitte: Wimmerung, Unten: Haselung.

Zum Teil gibt es sogar widersprüchliche Erklärungsansätze wie beispielsweise, dass die Ausprägung am deutlichsten an gradchaftigen und gesunden Bäumen beobachtet werden kann (Krajnc et al. 2015). Diese Einschätzung deckt sich nicht mit den Erfahrungen, die die Mitarbeiter des Thünen-Instituts für Holzforstgenetik bei der Baumernte für das vorliegende Projekt in den Forstämtern Schotten und Romrod gesammelt haben. Hier waren es insbesondere eine Reihe Bäume mit ausgeprägtem Säbelwuchs, bei denen das Merkmal in deutlicher Ausprägung an überwiegenen Anteilen des Stamms diagnostiziert wurde. Die Baumgröße hat daher offenbar keinen Einfluss auf die Merkmalsausprägung, das Alter hingegen schon. Bei bestehender Veranlagung tritt das Phänomen ab einem bisher unbestimmten Zeitpunkt im Lebenszyklus des Baumes auf und verstärkt sich ab diesem Zeitpunkt konstant.

Ausrichtung der Kambiumzellen

Zahlreiche Wissenschaftler vertreten die Theorie, dass die Ausrichtung der Kambiumzellen der wichtigste Faktor bei der Bildung der wellenförmigen Maserung ist und so zur Entstehung der Riegelung beiträgt (Harris 1989, Kramer 2006). Es konnte aber noch nicht geklärt werden, was zu der Neuorientierung der Kambiumzellen führt und wie diese beeinflusst wird. Neben der Expression bestimmter Gene, die eine Rolle spielen können, könnten auch Phytohormone oder sogar strukturelle (anatomische) Ursachen zur Entstehung der Riegelung beitragen. Auch epigenetische Modifikationen von Genabschnitten können ursächlich für die Ausprägung der Riegelung sein (Naujoks et al. 2013). Da die Riegelung auch bei anderen heimischen Laubbäumen vorkommt, wie z. B. Nussbaum, Esche, Eiche und Speierling, und darüber hinaus

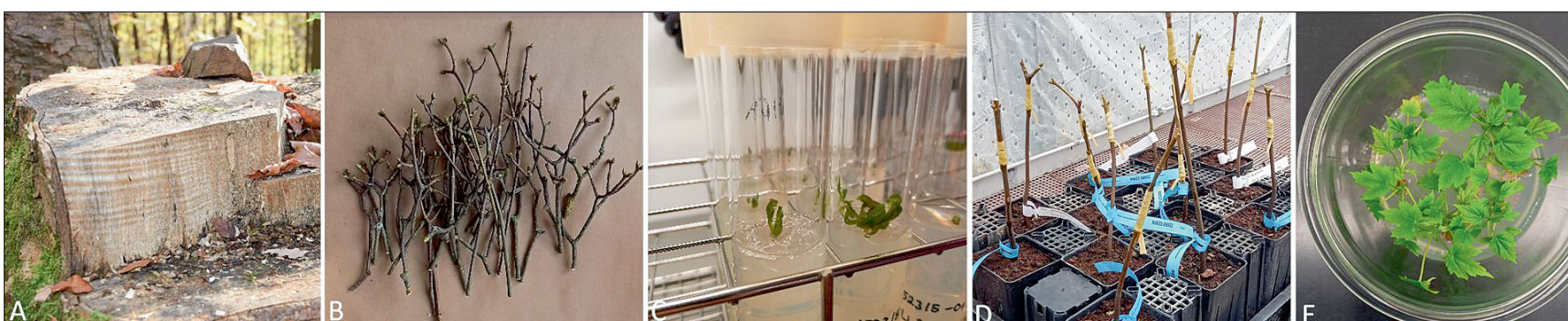


Abbildung 5 Überblick über die Materialgewinnung von einem geriegelten Bergahorn bis zur In-vitro-Etablierung

Fortsetzung auf Seite 819

Die Riegelung des Holzes (Teil I)

Fortsetzung von Seite 818

bei diversen tropischen Baumarten wie Mahagoni, Teak oder verschiedenen Akazien auftritt, scheint dieses Phänomen unter diversen Baumspezies eine durchaus verbreitete Wachstumsanomalie zu sein, was auf eine Ursache in der allgemeinen Holzformation hinweisen könnte.

Beugungs-Interferenz-Hypothese

Ein Phänomen, das bei allen geriegelten Hölzern gleichermaßen nachzuweisen ist, ist die Beobachtung, dass die Riegelung weder zu Beginn des Wachstums eines natürlich ausgetriebenen Stecklings (oder im Bereich des Marks im juvenilen Bereich eines Baums) erkennbar ist, noch dass sie abrupt auftritt. Vom inneren Mark an ist die Riegelung zunächst nicht wahrnehmbar, ist ab einem (un-)bestimmten Zeitpunkt mit dem bloßen Auge erkennbar und nimmt im Laufe des weiteren Wachstums konstant zu. In den meisten untersuchten Fällen liegt der Zeitpunkt, an dem die Riegelung startet, in etwa zwischen dem zehnten und 30. Jahring der Bäume. Die Beobachtungen hierzu stützen sich auf makroskopische Untersuchungen von einheimischen Baumarten wie etwa Ahorn, Nussbaum oder Weide, die während des Wertholzprojekts durchgeführt wurden.

In einem ähnlichen Zeitraum durchlaufen Bäume eine Transformation von sogenanntem juvenilem (Jugend-)Holz zu adultem (Reif-)Holz, bei dem die einzelnen Zelltypen eine Metamorphose durchlaufen (Haag et al. 2019, Haag et al. 2020). Auf Basis dieser parallelen Entwicklung entstand die Beugungs-Interferenz-Hypothese (Riegelmodell nach Haag), die darauf beruht, dass ein Zusammenhang zwischen den Veränderungen der Zellmorphologie in der Transformationsphase zwischen juveniler zu adulter Holzbildung und der Initialisierung der Riegelung besteht. Weitere Informationen zu dieser Hypothese sollen in Kürze im IAWA-Journal (Journal der International Association of Wood Anatomists) vorgestellt werden.

Welchen Einfluss haben genetische Faktoren?

Die Holzbildung beginnt im Kambium, einem meristematischen Gewebe, in dem ein komplexes Netzwerk von Genen für Ausbildung und Ausrichtung der Holzfasern verantwortlich ist und in dem auch ein Ursprung der Riegelung liegen könnte. Aus diesem Grund ist das Kambium das Gewebe der Wahl, um Informationen auf genetischer Ebene über den Prozess der Holzbildung zu bekommen. Wenn die Riegelung auf einer Mutation beruht, dann müsste diese Mutation als Unterschied zwischen schlichtem und geriegeltem Bergahorn nachweisbar sein.

2017 wurden Kambium-Proben im Rahmen des Riegelhorn-Projekts auf der oben genannten Samenplantage durch „Fenster“ an lebenden Bäumen entnommen. In diesen Proben wurden durch RNA-Sequenzierung alle aktiven Gene bestimmt und verglichen. Aufgrund der Komplexität und der Diversität des Materials konnten bisher keine eindeutigen Unterschiede zwischen geriegelten und schlichten Exemplaren festgestellt werden. Im Rahmen des Wertholz-Projekts konnten auf die gleiche

Art Kambium-Proben von geriegelten und schlichten Vollgeschwistern entnommen werden, die eine geriegelte Mutter und einen schlichten Vater hatten (Quambusch et al. 2021). Aufgrund der Verwandtschaftsverhältnisse ist dieses Material wesentlich weniger genetisch divers. Das Konsortium erwartet, mit der Analyse dieses Untersuchungsmaterials einen wesentlichen Schritt in Richtung Ursachenaufklärung der Riegelung zu machen.

Viele Beobachtungen deuten auf eine Beteiligung genetischer Faktoren sowie eine mögliche Vererbbarkeit dieses Merkmals hin. Bereits in den 1980er-Jahren gab es Anzeichen für die Stabilität der Ausprägung des Merkmals durch Pfropfung (Conrad 1988). So konnte in einer Studie die wellenförmige Messung der Riegelung bei vegetativ vermehrtem Bergahornmaterial bestätigt werden (Ewald & Naujoks 2015). Ausgehend davon werden die gleichen Ergebnisse bei mikrovermehrten Pflanzen erwartet, wie es der Fall bei der Braumnasenerbirke ist (Ewald et al. 1997).

In-vitro-Kulturen von Bergahorn-Klonen

Da der oben genannte Beweis für den Riegelhorn, erzeugt durch In-vitro-Techniken, noch aussteht, wurden zur Klonprüfung im Riegelhorn-Projekt bereits vier Versuchsflächen angelegt. Die Ergebnisse zur Merkmalsausprägung sind in frühestens 15 Jahren zu erwarten. Das Ausgangsmaterial für die Erzeugung von in-vitro vermehrten Pflanzen stammt von Bäumen, die als geriegelt auf Holzsubmissionen angeboten wurden. Es konnten Winterknospen aus den Kronen der gefällten Bäume gesichert werden.

Grundsätzlich ist es für die spätere praktische Nutzung notwendig, vegetatives Material von geriegelten Altbäumen zu sichern. Dies wird im Rahmen der Forschungsprojekte „Riegelhorn“ und „Wertholz“ durch zwei Methoden erreicht. Zum einen werden dabei Reiser aus dem Kronenbereich geschlagener Bäume entnommen (Abbildung 5A, B), an die beiden Forschungseinrichtungen Thünen-Institut für Forstgenetik und NW-FVA versandt und dort auf Sämlingsunterlagen gepfropft (Abbildung 5D). Parallel werden von den Reisern, die nicht für die Pfropfung Verwendung finden, die Winterknospen in einem zeitaufwendigen Verfahren freipräpariert und in die In-vitro-Kultur überführt (Abbildung 5C). Bei diesem Prozess muss mit einer hohen Ausfallquote gerechnet werden, sodass möglichst viele Knospen eines Spenderbaumes verwendet werden, um schließlich einen Klon sicher in der In-vitro-Kultur zu etablieren (Abbildung 6E). Der Klon ist dabei genetisch identisch mit dem Spenderbaum und kann auf diesem biotechnologischen Weg idealerweise über lange Zeit erhalten und vermehrt werden. Die Sicherung der Klone in Klonarchiven ist im Rahmen der Projekte ein weiterer wichtiger Aspekt und bildet die Voraussetzung für die Nutzung nach der Klonzulassung.

Entscheidend für die Gewinnung des Ausgangsmaterials, sowohl für die Pfropfung als auch die Etablierung in der In-vitro-Kultur, ist hierbei die Zusammenarbeit mit Förstern und Waldbesitzern. Der Weg vom geschlagenen

Baum, über die Identifizierung der Riegelung bis hin zur Sicherung des genetischen Materials in den Klonsammlungen sollte möglichst wenig Zeit in Anspruch nehmen. Im Grunde wäre es ideal, bereits unmittelbar nach dem Schlagen des Baumes die Reiser zu entnehmen und entsprechend zu versenden.

Seit Beginn der Forschungen streben die Wissenschaftler an, zum einen über das Projekt zu informieren und zum anderen, geriegelte Stämme anhand von Berichten oder Submissionslisten auffindig zu machen. Die Zurückverfolgung der Stämme bis zum ursprünglichen Standort ist mitunter nicht einfach. Jedoch lohnt es sich, auch die Stubben der geriegelten Stämme zu identifizieren, da einige Arten wie beispielsweise der Bergahorn durchaus Stockausschläge bilden, die dann für die Gewinnung des vegetativen Materials genutzt werden können.

Wie geht es weiter?

Auf Holzsubmissionen erzielen geriegelte Bergahornstämme regelmäßig Spitzenpreise. Aktuell noch ein Glücksfund für Waldbesitzer, könnte eine gezielte Aufforstung mit Riegelhorn, Riegelweide, Riegelerele oder Riegelbirke eine Möglichkeit sein, den Ertrag bewirtschafteter Wälder deutlich zu steigern. Die in dem Projekt „Wertholz“ untersuchte These der Riegelung als vererbbares Merkmal ist sehr vielversprechend und bietet die Chance auf ein hochwertiges Produkt in Form von Riegeljungpflanzen. Daher arbeiten die Industriepartner, die Reinhold Hummel GmbH & Co. KG, und das Institut für Pflanzenkultur GmbH & Co. KG im Projekt daran, das in-vitro etablierte Baum-Material zu vermehren (Abbildung 6). So können genetisch identische Jungpflanzen produziert werden, die der Waldbesitzer auspflanzt und die mit hoher Wahrscheinlichkeit ebenfalls eine Riegelung als deutlich wertsteigerndes Merkmal aufweisen. Im Rahmen des Projekts „Wertholz“ wurden nicht nur Riegelhorn, sondern auch geriegelte Birke und Weide im Labor kultiviert und zudem marktreife Produktionsprotokolle ausgearbeitet. So hat schon bald jeder Waldbesitzer die Chance, aus einem kleinen Sortiment besonders werthaltiger Baumarten auszuwählen.

Wie eingangs bereits erwähnt, erhoffen sich die Partner durch die dargestellte Forschung zur Erhaltung, Vermehrung und Verwertung von Bäumen mit besonderen Holzstrukturen beizutragen. Darüber hinaus erhoffen sich die Autoren des vorliegenden Artikels, den Lesern damit einen interessanten Einblick in die Untersuchungen und Bemühungen zu geben und ein bisschen von der Faszination an der Forschung weiterzugeben.

Der Artikel hat primär das Ziel, einen Einblick in die sehr unterschiedlichen Forschungsbereiche zu geben, während (noch) nicht zu sehr auf die Details eingegangen wurde. Dabei wurde insbesondere Wert darauf gelegt, vorhandenes Wissen und mögliche Hypothesen zusammenzufassen, ohne neueste Forschungsergebnisse zu präsentieren, die noch nicht in einem wissenschaftlichen Journal publiziert wurden. Da sehr viele der unterschiedlichen Forschungsbereiche ihre Projekt-Ergebnisse derzeit noch generieren, ist davon auszugehen, dass es in naher Zukunft Anlass geben wird, dass die Publikationsreihe um „die Riegelung des Holzes“ in weiteren Teilen fortgesetzt wird.

Literatur:

- Alkadri A, Carlier C, Langbour P, Brémaud I (2016) Relationships between Quantitative Anatomy, Microstructure, and Vibrational Properties of Wavy Maple Wood. 3rd Annual Conference COST FP1302 WoodMusICK „Making Wooden Musical Instruments – An Integration of Different Forms of Knowledge“ Proceedings, Barcelona
- Alkadri A, Carlier C, Wahyudi I, Gril J, Langbour P, Brémaud I (2018) Relationship between anatomical and vibrational properties of wavy sycamore maple. IAWA Journal 39 (1), 2018: 63-86
- Bäucker C, Liesebach H (2018) From in vitro clones to high-quality timber production: the Project „Wavy Grain Maple.“ In: Degen B, Krutovsky KV, Liesebach M (eds) German Russian Conference on Forest Genetics. Johann Heinrich von Thünen-Institut, Braunschweig, pp 49-54



Abbildung 6 In-vitro etabliertes Baum-Material in Form von Riegel-Jungpflanzen im Aufzuchtthaus des Instituts für Pflanzenkultur GmbH & Co. KG.

- Brémaud I, Cabrolier P, Gril J, Clair B, Gérard J, Minato K, Thibaut B (2010) Identification of anisotropic vibrational properties of Padouk wood with interlocked grain. Wood Science and Technology 44(3) : 355-367 (2010)
- Burgert I (2006) Über das mechanische Design der Holzzellwand. Forschungsbericht – Max-Planck-Institut für Kolloid- und Grenzflächenforschung. Online https://www.mpg.de/593551/forschungsschwerpunkt
- Conrad J (1988) Seltene, abnorme Holzstrukturen und -farben bei Laubhölzern. Die Holzzucht 42:1-9
- Ewald D., Naujoks G. 1995. Die aus dem Glas kamen. Der Wald Berlin 45 (7), 231-235.
- Dinulica F, Savin A, Stanciu M D (2023) Physical and Acoustical Properties of Wavy Grain Sycamore Maple (*Acer pseudoplatanus* L.) Used for Musical Instruments. Forests 2023, 14,197. https://doi.org/10.3390/f1402019
- Ewald D, Naujoks G (2015) Vegetative propagation of wavy grain *Acer pseudoplatanus* and confirmation of wavy grain in wood of vegetatively propagated trees: a first evaluation. Dendrobiol 74:135-142
- Haag V, Koch G, Richter HG, Evans R, Silva Guzmán JA, Schmitt U. 2019. Wood anatomical and topochemical analyses to characterize juvenile and adult wood of lesser-known species from Central America (Mexico). IAWA J. Vol. 40(4):2019
- Haag V. 2020. Anatomisch-strukturelle und topochemische Untersuchungen zur Charakterisierung der Holzigenschaften neu eingeführter Handelshölzer (lesser known-species), Dissertation, Universität Hamburg, Fakultät für Mathematik, Informatik und Naturwissenschaften
- Harris JM (1989) Spiral grain and wave phenomena in wood formation New York, USA: Springer-Verlag.
- Kiaei M, Bakshi R, Veylaki S. 2012. Determination of fiber length and juvenile and mature wood zones in *Acer velutinum* Boiss. trees grown in Iran. For. Stud. China 14: 323-326.
- Krajnc L, Cufar K, i Brus R (2015). Characteristics and Geographical Distribution of Fiddleback Figure in Wood of *Acer pseudoplatanus* L. in Slovenia. Drvna industrija, 66 (3), 213-220. https://doi.org/10.5552/drind.2015.1447
- Kramer E (2006). Wood Grain Pattern Formation: A Brief Review. Journal of Plant Growth Regulation. 25.290-301.10.1007/s00344-006-0065-y.
- Meriam J L, Kraige L G (2002) Engineering Mechanics (5th ed.). John Wiley & Sons. p.328 ISBN 978-0-471-60293-4
- Naujoks G, Ewald D, Meier-Dinkel A, Wallbraun M (2013): Endlich hinter Schloss und Riegel: Stand und Perspektiven der Forschung beim Riegelhorn. AFZ Der Wald 68 (5): 10-12
- Naujoks, G.; Ewald, D.; Schneck, V. (2017): 30 Jahre In-vitro-Vermehrung der Braumnasenerbirke. AFZ/DerWald 72/5, 32-35.
- Ewald D, Naujoks G, Kohlstock N, Frühwald A (1997) Braumnasenerbirke aus dem Pflanzgarten. Wie lang ist der Weg von der Gewebekultur zum Furnier? (Brown curly-ribbed. How long is the road from tissue culture to veneer?). Furnier-Magazin 12: 66-69.
- Ewald D, Naujoks G (2015) Vegetative propagation of wavy grain *Acer pseudoplatanus* and confirmation of wavy grain in wood of vegetatively propagated trees: a first evaluation. Dendrobiol 74:135-142
- Quambusch M, Bäucker C, Haag V, Meier-Dinkel A, Liesebach H (2021) Growth performance and wood structure of wavy grain sycamore maple (*Acer pseudoplatanus* L.) in a progeny trial. Ann Forest Sci 78(1):15. DOI:10.1007/s13595-021-01035-6
- Reiterer A, Burgert I, Sinn G, Tschegg S. 2002. The radial reinforcement of the wood structure and its implication on mechanical and fracture mechanical properties – A comparison between two tree species. J. Mater. Sci. 37: 935-940. DOI: 10.1023/A:1014539612423
- Richter C. 2015. Wood characteristics: description, causes, prevention, impact on use and technological adaptation. Springer International Publishing, Switzerland
- Richter C. 2019. Holzmerkmale der Bäume. DRW-Verlag Weinbrenner GmbH & Co. Kg, Leinfelden-Echterdingen. ISBN 978-3-87181-935-3

Danksagung: Für die finanzielle Förderung der Verbundprojekte „Riegelhorn“ und „Wertholz“ bedanken wir uns bei der Landwirtschaftlichen Rentenbank (Forschung für Innovationen in der Agrarwirtschaft) und bei der Fachagentur für Nachwachsende Rohstoffe (Förderprogramm Nachwachsende Rohstoffe).

Wir bedanken uns herzlich bei Dr. Christoph Richter, Autor der Bücher „Holzmerkmale“ und „Die Holzmerkmale der Bäume“ (siehe oben). Mit seinen Darstellungen, einleuchtenden Erklärungen und Beschreibungen hat er uns, in beiden Projekten (Riegelhorn und Wertholz) stets begleitet und inspiriert. Daher haben wir uns gefreut, dass er uns seine Abbildungen (Abbildung 4) für diesen Artikel zur Verfügung gestellt hat, womit wir uns an dieser Stelle bedanken möchten.

Nicht weniger Dank gebührt Dieter Becker aus Neuwied, der mit seiner bemerkenswerten Holzsammlung (größte private Holzsammlung Deutschlands mit etwa 5 000 Baum- und Straucharten [Stand 2023], siehe auch HZ Nr. 35/2011) ebenfalls einen Beitrag zur Veranschaulichung in diesem Artikel geleistet hat. Becker hat für einen Großteil der Abbildungen in Bildtafel 2, insbesondere der extrem seltenen „Muschelung“ und dem pommelierten Sapeli, die Furniere zur Verfügung gestellt. Auch ihm möchten wir an dieser Stelle unseren besten Dank ausdrücken.

Darüber hinaus bedanken wir uns bei den hessischen Forstämtern Romrod und Schoten, die uns beim Zugang zu den Ahornplantagen unterstützt haben. Im Weiteren möchten wir uns bei allen bedanken, die uns bei der Beschaffung von Reisermaterial und somit bei der Ausweitung der Riegelhornsammlung unterstützt haben.