

DOPPEL

GESICHT

DOPPELGESICHT

HARTE SCHALE, WEICHER KERN

THOMAS GREB

Unnachgiebig und starr erscheint der Stamm eines Baumes. Und doch wächst er, langsam aber stetig. Dazu verhilft ihm eine dünne Gewebeschicht unter der Rinde – das Kambium. Dieses enthält Stammzellen mit einer verblüffenden Doppelfunktion: Nach innen produzieren sie hartes Holz, nach außen weichen Bast.

B

Bäume sind gemacht, um zu bleiben – bei vielen Arten zumindest für einige Jahrhunderte. Sie sind ein Symbol für Dauerhaftigkeit und Stärke schlechthin und produzieren eins der härtesten Materialien, das von Organismen produziert wird: Holz. Trotzdem sind Bäume Wachstumsweltmeister. Von uns meist unbemerkt, akkumulieren sie kontinuierlich Biomasse und verwandeln flüchtige Dinge wie Kohlendioxid und Licht in etwas Dauerhaftes, etwas Festes. Wie geht das? Wie kann es sein, dass eine so stabile Struktur wie ein Baumstamm in der Lage ist, zu wachsen? Wie kann es sein, dass so weiche Strukturen wie Zellen, die das Wachstum offenbar antreiben, etwas so Hartes wie Holz produzieren?

Das Geheimnis der Bäume

Das Geheimnis liegt im „Kambium“ verborgen, einer dünnen Zellschicht gleich unter der Rinde. Wenn sich Zellen des Kambiums teilen, produzieren sie nach innen

„Wie kann etwas so Fragiles wie eine Zelle so etwas Festes wie einen Baumstamm wachsen lassen?“

harte Holzzellen und nach außen weiche Bastzellen. Ein faszinierendes System – an das man viele Fragen stellen muss: Gibt es separate Zellen für die Herstellung von Holz und Bast? Und wenn ja: Wie kommunizieren die Zellen miteinander, um die Produktion von Holz oder Bast zu steuern? Und vor allem: Wie untersucht man das? Wir können Bäume schließlich nicht unter das Mikroskop legen und dem Kambium bei seiner Arbeit zuschauen.

Es gibt eine Alternative, und sie trägt den klangvollen wissenschaftlichen Namen „*Arabidopsis thaliana*“ – die berühmte Laborpflanze, umgangssprachlich Ackerschmalwand genannt, die trotz ihrer unscheinbaren Gestalt seit Jahrzehnten der Star pflanzenwissenschaftlicher Forschung ist. In aller Welt konnten Forscherinnen und Forscher in ihren Laboren dank der Mithilfe des kleinen Krautes ein enzyklopädisches Wissen über das Leben der Pflanzen erarbeiten – und dabei eine immense Kollektion von Untersuchungsmethoden und -werkzeugen entwickeln. Doch kann die Modellpflanze – kaum größer als 30 Zentimeter und mit einer maximalen Lebenszeit von nur acht Wochen – auch dabei helfen, das Leben der Bäume und den Prozess der Holzbildung zu untersuchen? Zumal das lange Leben und die Produktion von Holz gemeinhin den Bäumen, nicht gerade den Kräutern, zugeschrieben wird? Die Antwort darauf gleich vorweg: Ja, sie kann.

Der Nachweis, dass die Ackerschmalwand auch ein Modell für das Wachstum von Bäumen und die Holzbildung sein kann, war ein wichtiger Meilenstein unserer Forschungsarbeiten im Centre for Organismal Studies (COS) der Universität Heidelberg. Unser Pflanzenmodellsystem ist gleichsam ein Baum im Miniaturformat, mit dem wir untersuchen können, wie das Kambium organisiert ist und welche Zellen der Ursprung von Holz und Bast sind. Dazu nutzen wir die molekularbiologischen Werkzeuge, die mit und dank der Ackerschmalwand entwickelt werden konnten: Wir markieren beispielsweise einzelne Zellen mit fluoreszierenden, also leuchtenden Molekülen. Diese werden während der Teilung der Zellen auf alle entstehenden Tochterzellen übertragen und machen so den weiteren Lebensweg der Zellen genau nachvollziehbar.

Das überraschende Ergebnis unserer Fluoreszenzuntersuchungen: Es gibt im Kambium keine separaten Zellen für die Produktion von hartem Holz und weichem Bast – einzelne Stammzellen produzieren sowohl Holz- als auch Bastzellen, und zwar durch abwechselnde Teilungen nach innen und nach außen. Das ist eine bemerkenswerte Erkenntnis, misst sie diesem Stammzelltyp doch eine zentrale Bedeutung als Ursprung eines großen Teils der pflanzlichen Biomasse zu. Wenn es um das dauerhafte Fixieren von Kohlendioxid geht, sitzen im Kambium demnach die wichtigsten Stammzellen dieses Planeten.

Die Kambiumstammzellen sind also ganz offensichtlich „zweigesichtig“: Sie produzieren sehr unterschiedliche Gewebe in entgegengesetzte Richtungen – und das, obwohl sie in eine außergewöhnlich rigide Umgebung eingebettet sind. Das führt zur nächsten Frage, die sich stellt: Wie gelingt ihnen das? Auch bei der Beantwortung dieser Frage hilft die Fluoreszenzmarkierung: Sie erlaubt es uns, Stammzellen zu erkennen, die sich teilen, deren Zellkerne zu isolieren und die Gene zu bestimmen, die in ihnen gerade aktiv sind.

Eines dieser aktiven Gene trägt das Namenskürzel WOX4. Es ist nicht allein in der Ackerschmalwand zu finden, sondern auch in anderen Pflanzen, darunter Bäumen, wo es die gleiche Funktion zu haben scheint. Das Gen WOX4 trägt die Bauanleitung für ein Protein, das als „Transkriptionsfaktor“ fungiert: Es bindet an DNA und kontrolliert die Aktivität von Genen. Welche Gene der Kontrolle von WOX4 unterliegen, ist noch unbekannt. Eines aber wissen wir bereits: Schaltet man das WOX4-Gen mit molekularbiologischen Methoden aus, gehen die Stammzellen des Kambiums verloren. Mit anderen Worten: WOX4 und die Gesamtheit der von ihm kontrollierten Gene sind für den Stammzellcharakter der Kambiumzellen entscheidend. Und auch damit endet das Fragen noch nicht: Wie wiederum wird das WOX4-Gen selbst reguliert?

Einflussreiches Pflanzenhormon

Hier kommt „Auxin“, ein Pflanzenhormon, ins Spiel. Auxin reguliert die Aktivität aller Stammzellen im pflanzlichen Körper, auch die der Stammzellen im Kambium. Die Konzentration von Auxin ist in den Kambiumstammzellen und rund um sie herum sehr hoch. Wird die Hormonkonzentration reduziert, kommt die Aktivität der Kambiumstammzellen zum Erliegen – ähnlich wie beim Verlust des WOX4-Gens. Auch dem Pflanzenhormon, zeigen unsere Untersuchungen, kommt dabei eine Doppelrolle zu: Auxin aktiviert WOX4 und damit die Aktivität der Stammzellen – und es reduziert die WOX4-Aktivität beim Übergang zu den Holzzellen, also zu den Zellen, in deren Wand das Stützmaterial Lignin eingelagert wird, was die Zellen verholzen und absterben lässt.

Welche Rolle Auxin einnimmt, entscheiden Transkriptionsfaktoren, einer davon ist „Monopteros“. Unseren Erkenntnissen nach bindet Monopteros an das WOX4-Gen und unterdrückt dessen Aktivität. Das hilft den Stammzellen, Holzzellen zu produzieren. Andere Transkriptionsfaktoren, die Monopteros sehr ähnlich sind, aktivieren WOX4. Wir gehen davon aus, dass die verschiedenen Transkriptionsfaktoren um die Bindung an die regulatorischen Abschnitte des WOX4-Gens konkurrieren und so eine entweder stärkere oder eine eher moderate WOX4-Aktivität bewirken. So könnten die Auxin-Effekte auf die Aktivität des Kambiums auf genetischer Ebene ausbalanciert werden.

Bislang haben wir über die Holzzellen und die Holzbildung gesprochen. Wie aber entstehen die Bastzellen? Zunächst:

„Wenn es um das dauerhafte Fixieren von Kohlendioxid geht, trägt das Kambium der Pflanzen die wichtigsten Stammzellen auf diesem Planeten.“



PROF. DR. THOMAS GREB leitet seit dem Jahr 2015 die Forschungsgruppe „Entwicklungsphysiologie“ am Centre for Organismal Studies (COS) der Universität Heidelberg. Nach einem Biologiestudium an der Universität Köln wurde er 2003 am Max-Planck-Institut für Pflanzenzüchtungsfor-schung in Köln promoviert. Anschließend forschte er zunächst in Norwich (Großbritannien) am John Innes Centre für molekulare Pflanzenforschung und Mikrobiologie, bevor er 2006 Juniorengruppen-leiter am Gregor-Mendel-Institut für Molekulare Pflanzenbiologie in Wien (Österreich) wurde und sich 2012 an der Universität Wien habilitierte. Für seine Forschungsarbeiten hat Thomas Greb neben einer Heisenberg-Professur der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) auch einen Consolidator Grant des Europäischen Forschungsrates (ERC) in Höhe von rund zwei Millionen Euro erhalten, mit dem seine Arbeiten zu den Vorgängen in Zellen und Zellwänden beim Wachstum von Pflanzen gefördert wurden.

Kontakt: thomas.greb@cos.uni-heidelberg.de

Was ist Bast überhaupt? Aus Bast wird beispielsweise Flachs gewonnen, daraus entsteht Leinen, das zu Kleidung verarbeitet werden kann. In Bäumen ist Bast das unverholzt bleibende lebende, weiche Gewebe direkt unterhalb der Rinde. Im Bast wird der in den Blättern produzierte Zucker durch den ganzen Pflanzenkörper transportiert. Es handelt sich also um ein äußerst wichtiges Gewebe, das sich in nahezu allen Pflanzenarten findet. Wie sich Bast aber bildet, war bis vor Kurzem noch gänzlich unklar. Unsere Genanalysen erbrachten auch hierzu wertvolle Erkenntnisse: Sie führten uns auf die Spur von SMXL5 – einem Gen, das für uns zum Schlüssel für das Verständnis dafür wurde, wie Pflanzen Bast produzieren.

Um mehr darüber zu erfahren, welcher Aufgabe das SMXL5-Gen nachkommt, haben wir es bei Pflanzen ausgeschaltet. Diese Versuche endeten zunächst mit einer Enttäuschung: Pflanzen, denen SMXL5 fehlt, zeigen keinen Unterschied zu Pflanzen, die das Gen noch besitzen. Als wir aber auch noch SMXL4 inaktivierten – das Schwestergen von SMXL5 –, änderte sich das Bild drastisch: Pflanzen, bei denen beide Gene ausgeschaltet sind, zeigen starke Defekte bei der Bildung von Bastgewebe. Ist darüber hinaus auch noch SMXL3 – ein drittes, sehr ähnliches Gen – inaktiviert, können die Pflanzen überhaupt keinen Bast mehr bilden. Diese Pflanzen sterben kurz nach der Keimung, denn ohne Bastgewebe ist es nicht möglich, alle Zellen des Keimlings mit Zucker zu versorgen. Vor allem Pflanzenorgane wie die Wurzeln, die weit von den Blättern entfernt sind, leiden unter dem Zuckermangel.

Molekulare Feinregulation

Wie erfüllen die SMXL-Gene ihre lebenswichtige Aufgabe? Hier ist unser Kenntnisstand, dass alle drei Gene die Bauanleitungen für drei sehr ähnliche Proteine tragen. Die laut genetischer Anweisung produzierten SMXL-Proteine finden sich in den Kernen von sich entwickelnden Bastzellen. Was aber machen sie dort? Sie ähneln keinem der uns bekannten Transkriptionsfaktoren – dennoch ist für Mitglieder der SMXL-Protein-Familie nachgewiesen worden, dass sie imstande sind, an das Erbmolekül DNA zu binden und die Aktivität von Genen zu beeinflussen. Wir nehmen an, dass sich die SMXL-Proteine mit anderen Proteinen zu größeren Gruppen verbinden. Diese Proteinkomplexe könnten die Struktur des Chromatins – des genetischen Grundmaterials aus DNA und assoziierten Proteinen – in den Zellkernen von heranreifenden Bastzellen beeinflussen und Gene anschalten, die die Eigenschaften der Bastzellen festlegen. Darauf weisen unsere bisherigen Untersuchungen hin: Wenn die SMXL-Gen-Aktivität verloren gegangen ist, ist das Chromatin rund um die Gene, die in Bastzellen üblicherweise aktiv sind, enger gepackt. Das verhindert eventuell, dass Gene, die für die Entwicklung der Bastzellen wichtig sind, angeschaltet werden können. Die endgültige Entschlüsselung der SMXL-Funktion wird uns sicher noch längere Zeit beschäftigen.

„In Bäumen ist Bast das unverholzt bleibende lebende, weiche Gewebe direkt unterhalb der Rinde.“

DOUBLE FACE

TOUGH ON THE OUTSIDE, SOFT ON THE INSIDE

THOMAS GREB

A tree trunk seems inflexible and rigid. And yet it grows, slowly but steadily. It does so with the help of a thin tissue layer under the bark – the cambium. This layer contains stem cells that fulfil an astonishing dual function: on the inside of the layer, they produce hard wood, on its outside, soft bast. Our research group uses cambium-driven radial plant growth and the related formation of wood and bast tissues as a paradigm for revealing fundamental concepts of multicellularity and organismal growth. Multicellularity is a fundamental principle of life on our planet, and plants represent ideal objects for deciphering concepts of multi-cellularity and organismal growth.

The past few years were highly productive in this regard, and we were able to make major contributions to the field: we functionally mapped central cambium domains, identified central cell fate regulators, explored the role of auxin in controlling wood formation and established tissue- and cell-specific transcriptomics in the context of the cambium. In addition, computational modelling of cellular dynamics targeting regulatory networks and mechanical aspects of radial plant growth is currently developing into a central part of our work. Building on these achievements, we are in the process of establishing integrated and comprehensive views on one of the most productive terrestrial growth processes with regard to biomass production and long-term sequestration of atmospheric CO₂. ●

PROF. DR THOMAS GREB has been heading the research group “Developmental Physiology” at Heidelberg University’s Centre for Organismal Studies (COS) since 2015. He studied biology at the University of Cologne and in 2003 received his PhD from the Max Planck Institute for Plant Breeding Research in Cologne. He conducted research at the John Innes Centre in Norwich (UK), which specialises in molecular plant research and microbiology; in 2006 he became head of a junior research group at the Gregor Mendel Institute of Molecular Plant Biology in Vienna (Austria) and in 2012 completed his habilitation at the University of Vienna. Thomas Greb was awarded a Heisenberg Professorship of the German Research Foundation and a Consolidator Grant of the European Research Council (ERC) amounting to roughly two million euros for his research on the processes occurring in cells and cell walls during plant growth.

Contact: thomas.greb@cos.uni-heidelberg.de

“How can something as fragile as a cell cause something as hard and solid as a tree trunk to grow?”

„Die Bedeutung von Pflanzen für das globale Ökosystem und die Lebensqualität der Menschen kann nicht hoch genug eingeschätzt werden.“

Kehren wir zur Ausgangsfrage zurück: Wie kann etwas so Fragiles wie eine Zelle so etwas Festes wie einen Baumstamm wachsen lassen? Diese Frage gibt die spannendste

Centre for Organismal Studies

Das Centre for Organismal Studies (COS) ist das größte lebenswissenschaftliche Forschungszentrum an der Universität Heidelberg. Die Wissenschaftler:innen am COS erforschen die komplexen biologischen Mechanismen lebender Systeme über alle Größenskalen und Organisationsstufen hinweg: von der molekularen Analyse über die Ebene der Zelle bis hin zur Gesamtheit eines Organismus im Kontext mit seiner Umwelt. Das Zentrum, das 2010 aus einem Zusammenschluss der Institute für Zoologie und Pflanzenwissenschaften entstand, gehört zu den zentralen wissenschaftlichen Einrichtungen der Universität Heidelberg. Derzeit besteht es aus 16 Abteilungen und vier unabhängigen Nachwuchsgruppen; insgesamt arbeiten hier aktuell 35 Forschungsgruppen mit rund 300 Mitarbeiter:innen. Der Botanische Garten Heidelberg ist mit einer eigenen Organisationsstruktur ebenfalls im COS eingebunden.

www.cos.uni-heidelberg.de

Richtung unserer Forschungsarbeiten vor, ist sie doch noch viel grundlegender als die Frage nach der Regulation des Kambiums. Dennoch kann uns das Studium des Kambiums gute Dienste leisten, um zu erfahren, wie Zellen Organe mit einer bestimmten Form und Festigkeit bilden und wie sie dazu mechanische Signale verarbeiten. Wenn die Stammzellen des Kambiums festes Gewebe produzieren, sind sie einem großen mechanischen Stress ausgesetzt. Wir denken, dass die sich entwickelnden Holzzellen einen starken Druck auf die Stammzellen ausüben und auf diese Weise die Eigenschaften der Stammzellen mitbestimmen. Um unsere These zu prüfen, haben wir die mechanischen Eigenschaften von Holzzellen mit molekularbiologischen Methoden verändert. Da wir die Gene, die in den Stammzellen aktiv sind, bereits kennen, können wir nun untersuchen, ob sie an der Verarbeitung der mechanischen Reize beteiligt sind.

Ein weiteres zentrales Forschungsziel ist es, die Bildung von Biomasse durch Pflanzen besser zu verstehen und zu ermitteln, wie die Bildung von Biomasse modifiziert werden kann, um die Rolle der Pflanzen in einer sich stetig verändernden Umwelt zu stärken. Im Stoffkreislauf der Erde sind Pflanzen die wichtigste Verbindung zwischen der belebten und der unbelebten Welt. Ihre Bedeutung für das globale Ökosystem und die Lebensqualität der Menschen kann nicht hoch genug eingeschätzt werden. ●