

**IMMER DER
SCHWERKRAFT NACH**

IMMER DER SCHWERKRAFT NACH

DAS GEHEIME LEBEN DER PFLANZEN

ALEXIS MAIZEL

Sie führen ein weitgehend unbeachtetes Dasein im Verborgenen: die Wurzeln der Pflanzen. Dabei sind sie von großer Bedeutung. Indem Pflanzen imstande sind, ständig neue Organe wie Blätter, Zweige, Blüten und Früchte zu bilden, gelingt es ihnen, schnell auf jahreszeitliche oder klimabedingte Veränderungen zu reagieren. Die Fähigkeit, neue Wurzeln wachsen zu lassen und das Wurzelsystem der Umgebung anzupassen, ist dabei die wichtigste Eigenschaft: Sie garantiert das Überleben der Pflanze und bestimmt ihre gesamte weitere Entwicklung. Doch wie wachsen Wurzeln eigentlich? Und wie finden sie in die richtige Richtung?

P

Pflanzen dienen uns Menschen als Nahrung, Pflanzen produzieren für uns den Sauerstoff, wir nutzen sie als Treibstoffe, wir produzieren aus ihnen Medikamente – und wir erfreuen uns an ihrer Schönheit. Doch das, was wir von den erstaunlich vielfältigen Pflanzen sehen, die Blätter und Blüten, die Früchte und Stängel, ist immer nur die Hälfte des Ganzen. Was uns zumeist verborgen bleibt, ist das unterirdische Wurzelwerk. Die „verborgene Hälfte“ der Pflanze zu erforschen ist von Natur aus schwierig, aber von entscheidender Bedeutung – auch angesichts einer wachsenden Weltbevölkerung. Bis zum Jahr 2050 müssen sich die landwirtschaftlichen Erträge verdoppeln, um alle Menschen ausreichend mit Nahrung versorgen zu können. Düngemittel hingegen müssen reduziert werden, um eine nachhaltige und umweltfreundliche Landwirtschaft zu garantieren. Hinzu kommt der Klimawandel, der es uns erschweren wird, die erforderlichen landwirtschaftlichen Erträge zu erreichen. Seine Auswirkungen werden vor allem jene Länder treffen, die schon heute von Dürreperioden und anderen Naturkatastrophen gebeutelt sind – vorrangig Länder im Globalen Süden. Vor diesem Hintergrund ist das Verständnis der Prozesse, wie Wurzeln wachsen, nicht nur ein interessantes naturwissenschaftliches Forschungsgebiet – es ist auch wichtig, um eine Antwort auf drängende gesellschaftliche Fragen geben zu können.

Die bisherige Forschung mit dem Ziel, die Erträge der Pflanzen zu steigern, hat sich vornehmlich auf die oberirdischen Pflanzenorgane konzentriert. Die Wurzel aber – der eigentliche limitierende Faktor für die Nährstoffaufnahme der Pflanze – wurde vernachlässigt. Das Wissen darüber, wie Wurzeln auf Umweltveränderungen reagieren und wie sie wachsen, kann uns künftig helfen, das Pflanzenwachstum zu verbessern, die Erträge zu erhöhen und Düngemittel zu minimieren.

Wie Wurzeln Wurzeln schlagen

Was machen eigentlich Wurzeln, und wie entstehen sie? Wurzeln sind nicht weniger als die entscheidenden Schnittstellen der Kommunikation zwischen Pflanze und Umwelt: Über die Wurzeln erkennt die Pflanze die Boden- und Wachstumsbedingungen und passt sowohl ihr ober- wie ihr unterirdisches Wachstum entsprechend an. Das erlaubt

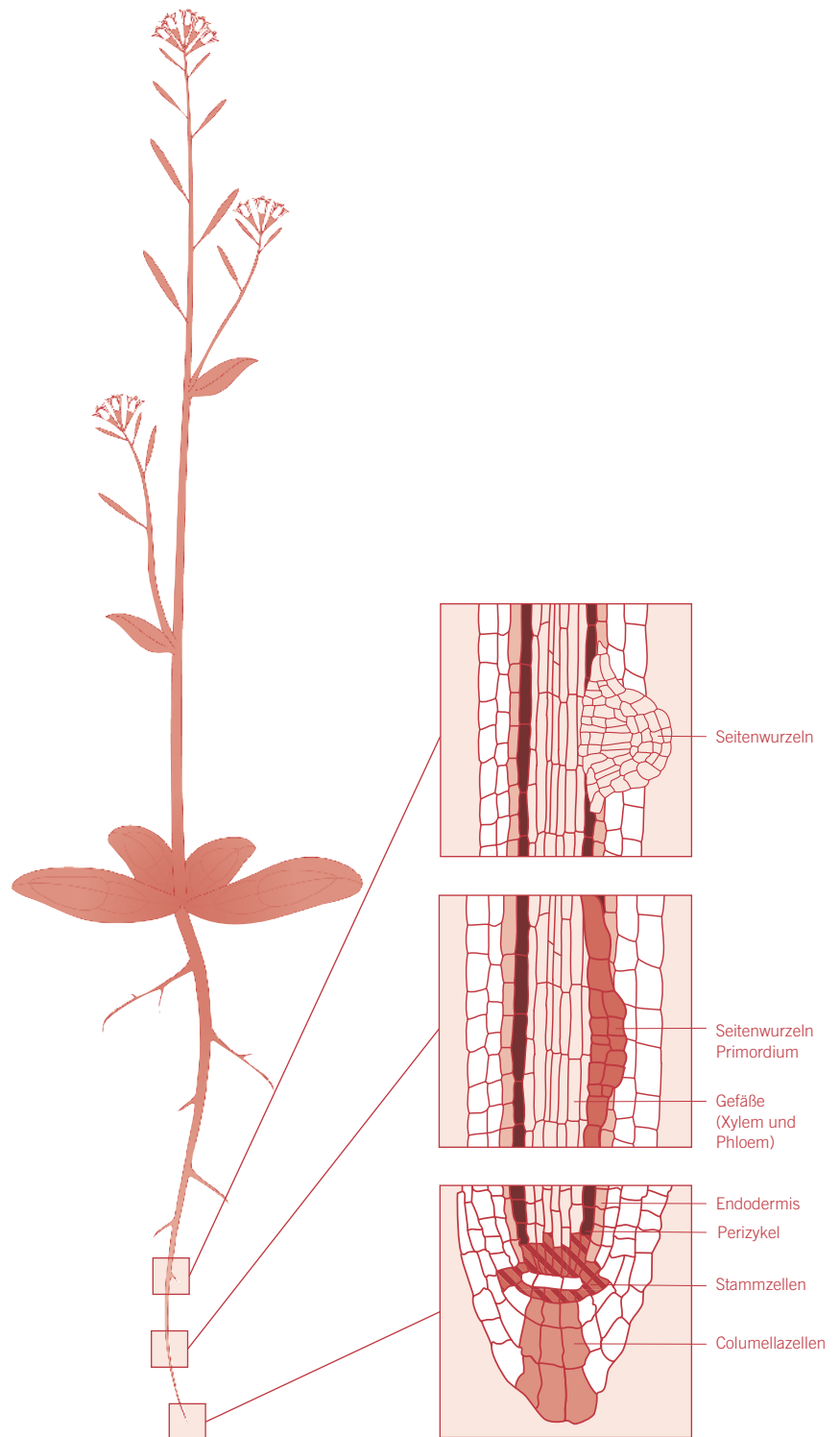
**„Die bisherige
Forschung hat sich
vornehmlich
auf die oberirdischen
Pflanzenorgane
konzentriert.
Die Wurzel aber –
der eigentliche
limitierende Faktor für
die Nährstoff-
aufnahme – wurde
vernachlässigt.“**

es der Pflanze zu überleben – obwohl sie sesshaft ist und ihren Standort nicht verändern kann.

Die erste Wurzel der Pflanze entwickelt sich bereits beim Pflanzenembryo im Samen. Das ist die Primär- oder Hauptwurzel. Aus ihr gehen später Seitenwurzeln, die sogenannten Sekundärwurzeln, hervor. Beide Wurzeltypen sind weitgehend identisch gebaut. Sie besteht aus Gefäßen, dem „Xylem“ für den Wassertransport und dem „Phloem“ für den Stofftransport. Diese Gefäßtypen sind von einer Gewebeschicht, dem „Perizykel“, umgeben. Ein weiteres wichtiges Wurzelgewebe ist das „Meristem“. Es enthält besondere Zellen, Stammzellen, aus denen alle Zelltypen der Wurzel hervorgehen können. An der Spitze der Wurzel findet sich die Wurzelhaube. In einem Teil der Wurzelhaube, der „Columella“, sind Zellen angesiedelt (Statocysten), die für das Wachstum der Pflanzenwurzel Richtung Erdmittelpunkt notwendig sind. Die Statocysten enthalten stärkehaltige Partikel (Amyloplasten), die sich auf die Unterseite der Zelle verlagern, wenn die Schwerkraft einwirkt. Das verändert den Transport von Auxin, einem „Streckungshormon“, das das Wachstum reguliert und die gewünschte Wuchsrichtung gen Erdmittelpunkt entsprechend anpasst.

Das Wachsen von Seitenwurzeln und somit die Wurzelverzweigung ist wichtig, damit sich die Oberfläche des Wurzelsystems vergrößert und die Pflanze auch entferntere Wasserreserven sowie Nährstoffe aufnehmen kann. Darüber hinaus ermöglicht die Wurzelverzweigung der Pflanze, sich besser im Boden zu verankern. Die Seitenwurzeln entstehen während eines komplexen Entwicklungsprozesses aus mehreren aufeinanderfolgenden Schritten. Zunächst werden Zellen nahe der Spitze der Hauptwurzel so umprogrammiert, dass sie zu Gründerzellen der neuen Wurzel werden. Diese Zellen entstammen dem Perizykel, sie kommen also aus einer tief liegenden Gewebeschicht. Die Gründerzellen teilen sich und bilden im Innern der Hauptwurzel eine kuppelförmige Zellsammlung, das sogenannte Primordium. Es wächst durch mehrere Schichten der Hauptwurzel hindurch, um schließlich aus ihr herauszutreten. Nun ist die neue Seitenwurzel auch für das bloße Auge sichtbar.

Alle diese Schritte sind exakt aufeinander abgestimmt. Wir haben während unserer Studien zur Seitenwurzelbildung beobachtet, dass die Gründerzellen ein größeres Volumen annehmen, bevor sie sich vermehren. Das erlaubt es ihnen, die Endodermis – die über ihnen liegende Zellschicht – zu verdrängen. Die Endodermis ist ein sehr starres Gewebe, dessen Zellen eng miteinander verbunden sind. Sie fungiert als Schutzbarriere vor Schädlingsbefall und Nährstoffverlust. Das Anschwellen der Gründerzellen löst mechanisch ein Schrumpfen der Endodermis aus. Dies wirkt wie ein Startsignal und veranlasst die Gründerzellen





PROF. DR. ALEXIS MAIZEL studierte Mathematik, Physik und Biologie in Lille und Lyon in Frankreich. Im Jahr 2002 wurde er an der École normale supérieure und der Université René Descartes in Paris promoviert. Nach Forschungsaufenthalten am Max-Planck-Institut für Entwicklungsbiologie in Tübingen sowie dem Salk Institute for Biological Studies und dem Cold Spring Harbor Laboratory in den USA kehrte er im Jahr 2006 nach Frankreich zurück. Dort arbeitete er als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Plant Sciences Institute des Centre national de la recherche scientifique (CNRS). 2010 wurde Alexis Maizel mit seiner Arbeit zur Kontrolle morphogenetischer Prozesse bei Tieren und Pflanzen habilitiert und wechselte an die Universität Heidelberg, um als Nachwuchsgruppenleiter im Exzellenzcluster „CellNetworks“ am Centre for Organismal Studies (COS) zu forschen. Seit 2015 ist er Professor für Biologie und leitet die Abteilung „Entwicklungsplastizität der Pflanzen“ am COS.

Kontakt: alexis.maizel@cos.uni-heidelberg.de

„Einfache mathematische Regeln können erklären, wie die komplexe Selbstorganisation bei der Wurzelbildung vonstatten geht.“

dazu, sich zu teilen. Die Kuppelform, die das aus den Gründerzellen hervorgehende Primordium einnimmt, wird von den mechanischen Eigenschaften der darüber liegenden Gewebe bestimmt. Für das Ausbilden der Seitenwurzeln ist also ein Wechselspiel von physikalischen Kräften und zellbiologischen Gegebenheiten entscheidend. Die Bedeutung physikalischer Kräfte für die korrekte Entwicklung der neuen Wurzel ist groß: Selbst eine vorübergehende Biegung der Hauptwurzel reicht aus, um eine neue Seitenwurzel an der konvexen Seite entstehen zu lassen.

Komplexe Selbstorganisation nach verblüffend einfachen Regeln

Wir haben in unserer Arbeitsgruppe in Heidelberg untersucht, inwieweit bei verschiedenen Pflanzen ein festgelegtes, identisches Programm der Seitenwurzelbildung abläuft. Dabei erkannten wir, dass sich die Zellen der künftigen Seitenwurzel von selbst in verschiedene Gewebeschichten organisieren. Das ist unabdingbar, damit eine funktionierende Wurzel entstehen kann. Gemeinsam mit Wissenschaftlern der Universität Frankfurt ist es uns gelungen, mathematische Regeln aufzustellen, die erklären, wie diese komplexe Selbstorganisation vonstatten geht. Dazu haben wir moderne Methoden der Mikroskopie und aufwendige Computeranalysen miteinander kombiniert.

Forschung an komplexen biologischen Netzwerken

Der Exzellenzcluster „Cellular Networks“, kurz CellNetworks, hat zum Ziel, das Verhalten und die dynamische Veränderung komplexer biologischer Netzwerke zu beschreiben und ihre Regulationsmechanismen zu verstehen. Dafür vereint CellNetworks exzellente Forschungsgruppen aus verschiedenen Instituten der Heidelberger Lebenswissenschaften und findet bei vielen internationalen Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern aus den Biowissenschaften, der Medizin, der Mathematik, der Chemie und der Physik Beachtung. Gemeinsam erarbeiten die Mitarbeiter des Clusters Grundlagenwissen, forschen für medizinische Anwendungen und untersuchen technische Weiterentwicklungen. Durch seine interdisziplinäre Zusammenarbeit und internationale Kooperationen stellt der Exzellenzcluster eine Plattform für optimale Forschungsbedingungen bereit. CellNetworks investiert in die Gewinnung hervorragender Nachwuchswissenschaftler und bietet ein breites Forschungsnetzwerk sowie modernste Infrastruktur im Bereich der Zellbiologie.

www.cellnetworks.uni-hd.de

FOLLOWING GRAVITY

THE SECRET LIFE OF PLANTS

ALEXIS MAIZEL

They lead a largely unnoticed life in the dark: the roots of plants. And yet they are of essential importance. The fact that plants can continuously form new organs like leaves, branches, blooms, fruits and roots enables them to quickly react to seasonal or climate changes. Their ability to grow new roots and adapt their root system to the environment is the most important characteristic of all: It ensures the plant's survival and determines its entire further growth.

Being able to understand the basic mechanisms that govern how roots grow not only poses an interesting fundamental scientific problem; it is also an important societal challenge. Indeed, the ever-increasing world population makes food availability a pressing issue. Agricultural production must double by 2050 to keep pace with global population growth. This target is even more challenging given the impact of climate change and the drive to make agriculture more sustainable by reducing fertiliser input. All efforts to improve plant yield have concentrated on the above-ground part of plants; roots have been neglected, and yet they represent an untapped potential for increasing productivity.

This is the context in which our team is working – we study how plants use the genetic information in their cells to reproducibly generate new roots. We follow an interdisciplinary approach to discover how the plant genes, the mechanical interactions between cells, and the physical environment work together to grow roots. To this end, we use a combination of molecular genetics, high-end microscopy and scientific computing to visualise, analyse and model at high resolution the behaviour of the cells forming the new roots. Our research will significantly advance our physical and biological understanding of how plant organs develop. It will have a profound impact on developmental biology and on our understanding of adaptive processes. ●

PROF. DR ALEXIS MAIZEL studied mathematics, physics and biology in Lille and Lyon, France. He obtained his PhD in 2002 from the Ecole Normale Supérieure and the Université René Descartes in Paris. After completing research stays at the Max Planck Institute for Developmental Biology in Tübingen, the Salk Institute for Biological Studies and the Cold Spring Harbor Laboratory, USA, he returned to France in 2006. He was a research assistant at the Plant Sciences Institute of the French National Centre for Scientific Research (CNRS). Alexis Maizel completed his habilitation in 2010 with a thesis on controlling morphogenetic processes in animals and plants and transferred to Heidelberg University to accept a position as head of a junior research group in the 'CellNetworks' cluster at the Centre for Organismal Studies (COS). He became a full professor of biology in 2015 and now heads the department 'Developmental Plasticity in Plants' at the COS.

Contact: alexis.maizel@cos.uni-heidelberg.de

“Research to date has mainly focused on the plant organs that grow above ground. The roots – the actual limiting factor for nutrient uptake – have been neglected.”

Von Molekülen zu lebenden Systemen

Das Centre for Organismal Studies (COS) ist das größte lebenswissenschaftliche Forschungszentrum an der Universität Heidelberg. Ziel der Wissenschaftler am COS ist es, die komplexen biologischen Mechanismen lebender Systeme über alle Größenskalen und Organisationsstufen hinweg zu erforschen: von der molekularen Analyse über die Ebene der Zelle bis hin zur Gesamtheit eines Organismus im Kontext mit seiner Umwelt. Das Zentrum besteht aus 15 Abteilungen und neun unabhängigen Nachwuchsgruppen. Insgesamt arbeiten hier 40 Forschungsgruppen mit fast 400 Mitarbeitern. 2010 wurde das Centre for Organismal Studies aus einem Zusammenschluss der beiden Heidelberger Institute für Zoologie und Pflanzenwissenschaften gegründet; es gehört zu den zentralen wissenschaftlichen Einrichtungen der Universität.

www.cos.uni-heidelberg.de

Für unsere mikroskopischen Studien verwendeten wir ein sogenanntes Lichtscheibenfluoreszenzmikroskop, das Langzeitbeobachtungen an lebenden Organismen erlaubt. Damit ist es uns gelungen, das Entstehen einer Seitenwurzel von der ersten Zelle an bis hin zum kompletten neuen Organ zu beobachten und das Geschehen in einem dreidimensionalen Film festzuhalten. Die Filme über den gesamten Entwicklungsprozess haben wir anschließend mit Methoden der Informatik analysiert und mathematisch ausgewertet.

Die Ergebnisse dieser fachübergreifenden Auswertung sind sehr aufschlussreich. Vergleicht man zwei neu gebildete Wurzeln miteinander, zeigt sich, dass die Anzahl der Gründerzellen ebenso wie die Anzahl der sich teilenden Zellen sehr unterschiedlich ist. Das System scheint auf den ersten Blick keinerlei festen Regeln zu folgen – dennoch organisieren sich die Zellen immer in den typischen Gewebeschichten. Wie kann das sein? Eine Antwort auf diese Frage fanden wir, als wir Computersimulationen vornahmen, neue Seitenwurzeln also virtuell auf dem Bildschirm wachsen ließen. Dabei erkannten wir, dass nur zwei Regeln vonnöten sind, damit eine neue Wurzel mit ihrer komplexen Gewebearchitektur entstehen kann. Die erste Regel: Die Gründerzellen müssen sich asymmetrisch teilen; auf diese Weise entstehen kleine und große Zellen, die am Anfang jeder Seitenwurzelbildung stehen. Die zweite Regel: Die Achse der Zellteilung muss bestimmten Gesetzmäßigkeiten folgen. Unsere Filme vom realen Wachstum der Wurzeln zeigen, dass die biologische Seitenwurzelbildung tatsächlich den während der Computersimulationen erkannten Regeln folgt.

„Der ebenso einfache wie robuste Entwicklungsprozess der Wurzelbildung ist womöglich grundlegend für die große Widerstandskraft, die Pflanzen gegenüber Umweltstörungen aufweisen.“

Die Selbstorganisation eines so komplexen Organs wie der Wurzel kann also mit wenigen Prinzipien erklärt werden. Es handelt sich um einen ebenso einfachen wie robusten Entwicklungsprozess – der womöglich grundlegend ist für die große Anpassungsfähigkeit, die Pflanzen gegenüber Umweltstörungen aufweisen. Diesen Aspekt untersuchen wir derzeit in weiteren Forschungsarbeiten. Sie erlauben nicht nur wertvolle neue Einblicke in den Prozess, wie Pflanzen neue Wurzeln bilden. Sie sind auch von großer Bedeutung für die Entwicklungsbiologie generell und das allgemeine mathematisch-biologische Verständnis von Anpassungsprozessen. ●