



Pflanzen haben im Laufe der Evolution einen schier unerschöpflichen Reichtum an Blattformen entwickelt. Dabei ist jede Form auch eine Anpassung an die jeweilige Umwelt. Das Aussehen von Blättern sagt daher wenig über das Verwandtschaftsverhältnis von Pflanzen aus: Selbst nah verwandte Arten können ganz unterschiedliche Blätter besitzen, wenn sie sich an andere Lebensbedingungen anpassen mussten.

VIELFALT IM BLÄTTERWALD

TEXT: TIM SCHRÖDER

FOTO: ADOBESTOCK

39

Lanzettlich, eiförmig, elliptisch, ganzrandig, gesägt, einfach oder mehrfach gefiedert – die Vielfalt der Blätter hat viele Namen. Doch wie kommt diese Mannigfaltigkeit zustande?

Miltos Tsiantis vom Max-Planck-Institut für Pflanzenzüchtungsforschung in Köln und sein Team suchen nach Genen, die das Blattwachstum kontrollieren. Ein zentrales Steuerelement haben sie schon gefunden.



In Büchern zur Pflanzenbestimmung nimmt allein die Auflistung der vielen Formen von Pflanzenblättern oft mehrere Seiten ein. Die Beschreibungen unterscheiden dabei zwischen einfachen Blättern mit einer zusammenhängenden Blattfläche und solchen, bei denen die Blattfläche aus voneinander getrennten Blättchen besteht, sogenannten Fiederblättern. Das riesige Formenrepertoire ist gut erforscht, denn die Gestalt eines Blattes ist ein wichtiges Merkmal für die Identifizierung einer Pflanze. Doch wie die verschiedenen Formen entstehen und warum selbst die Blätter nahe verwandter Arten ganz unterschiedlich aussehen können, war bis in die jüngste Zeit rätselhaft.

Miltos Tsiantis analysiert zusammen mit seinem Team am Kölner Max-Planck-Institut, wann und wo Gene für die Blattform an- und abgeschaltet werden, wenn eine Blattknospe langsam Gestalt annimmt. Dabei hilft ihm moderne Technik: Mit Spezial-Mikroskopen zoomt er tief ins Gewebe hinein und lässt virtuelle Blätter im Computermodell wachsen. „Wir wollen herausfinden, welche Gene dafür sorgen, dass Blätter so aussehen, wie sie es tun. Da Blütenpflanzen häufig mehrere Zehntausend Gene besitzen, ist das wie die sprichwörtliche Suche nach der Nadel im Heuhaufen“, sagt Tsiantis. Der Wissenschaftler arbeitet seit vielen Jahren mit der Lieblingspflanze der Pflanzengenetiker

schlechthin: Die Ackerschmalwand (*Arabidopsis thaliana*) ist gewissermaßen die Fruchtfliege der Botaniker. Tausende Forscherinnen und Forscher analysieren ihr Erbgut, ihren Stoffwechsel, ihre Entwicklung. Viele Gene dieser Pflanze sind daher relativ gut erforscht.

Doch die Ackerschmalwand allein kann Miltos Tsiantis nicht verraten, wie die unterschiedlichen Blattformen entstehen. Er braucht dazu die Hilfe einer nahen Verwandten. Seine Wahl fällt auf das Behaarte Schaumkraut (*Cardamine hirsuta*), ein zartes Pflänzchen mit weißen Blüten, das wie die Ackerschmalwand zur Familie der Kreuzblütler gehört und das die Kölner Forschungsgruppe zu einem Modellsystem der Pflanzen-genetiker entwickelt hat. Obwohl beide Pflanzen nahe verwandt sind, haben ihre Blätter eine unterschiedliche Form: Die der Ackerschmalwand ähneln runden Spinatblättern, die am Rand ein paar zarte Einkerbungen tragen. Das Behaarte Schaumkraut hingegen besitzt Fiederblätter mit einem größeren, rundlichen Blättchen an der Spitze und darunter links und rechts kleineren Blättchen an zarten Stielen. Miltos Tsiantis züchtet das Schaumkraut in den institutseigenen Gewächshäusern. Für seine Untersuchungen benötigt er genetisch unterschiedliche Individuen. Deshalb behandeln er und sein Team die Samen der Pflanzen mit der Chemikalie Ethylmethansulfonat. Die Substanz



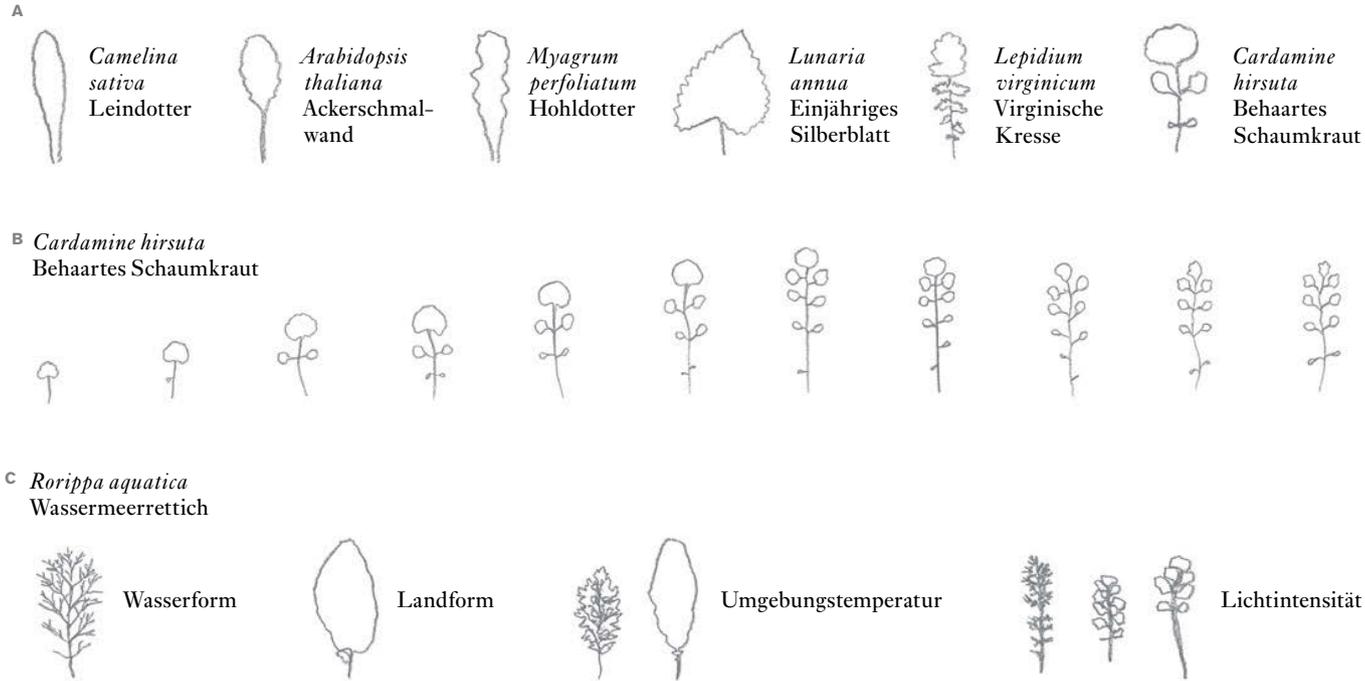
Ideenaustausch in Zeiten von Corona: Miltos Tsiantis, Angela Hay, Neha Bhatia, Ziliang Hu, David Wilson-Sanchez und Shanda Liu (von links).

verursacht hier und da Schäden im Erbgut, sogenannte Punktmutationen. „So lassen sich einzelne Gene verändern. Die Mutationen erfolgen allerdings nach dem Zufallsprinzip. Wir können also nicht beeinflussen, wo sie auftreten“, sagt Tsiantis. Entwickelt eine der behandelten Pflanzen andersartige Blätter, so können die Kölner Forschenden rückwirkend analysieren, welche Gene mutierten und folglich für die Formveränderung verantwortlich sind.

Auf diese Weise hat Tsiantis' ehemaliger Student Huw Jenkins Tausende von Schaumkrautpflanzen mit unterschiedlichen Blattformen gezüchtet: von kraus wie bei der Petersilie bis zu länglich wie beim Lavendel. Dabei gelang den Forschenden eine Entdeckung: Zwischen all den Pflänzchen reckte sich eines empor, dessen Blätter ihnen bekannt vorkamen - rund, mit feinen Einkerbungen am Rand und ganz ohne Fiederblätter. „Dieses Schaumkraut sah ein bisschen aus wie eine Ackerschmalwand“, erzählt Angela Hay, die in der Forschungsgruppe ebenfalls am Schaumkraut forscht. Eine Erbgutanalyse ergab, dass die chemische Behandlung einen DNA-Abschnitt des Schaumkrauts verändert hatte, der bei der Ackerschmalwand überhaupt nicht vorkommt. Die Forschenden hatten also ein Gen entdeckt, welches der Ackerschmalwand mit ihren einfachen Blättern fehlt und dem Behaarten Schaumkraut ebenfalls runde Blätter verleiht, wenn es geschädigt ist. Mithilfe der neuen Technik der Genom-Editierung konnten sie gezielt Mutationen im



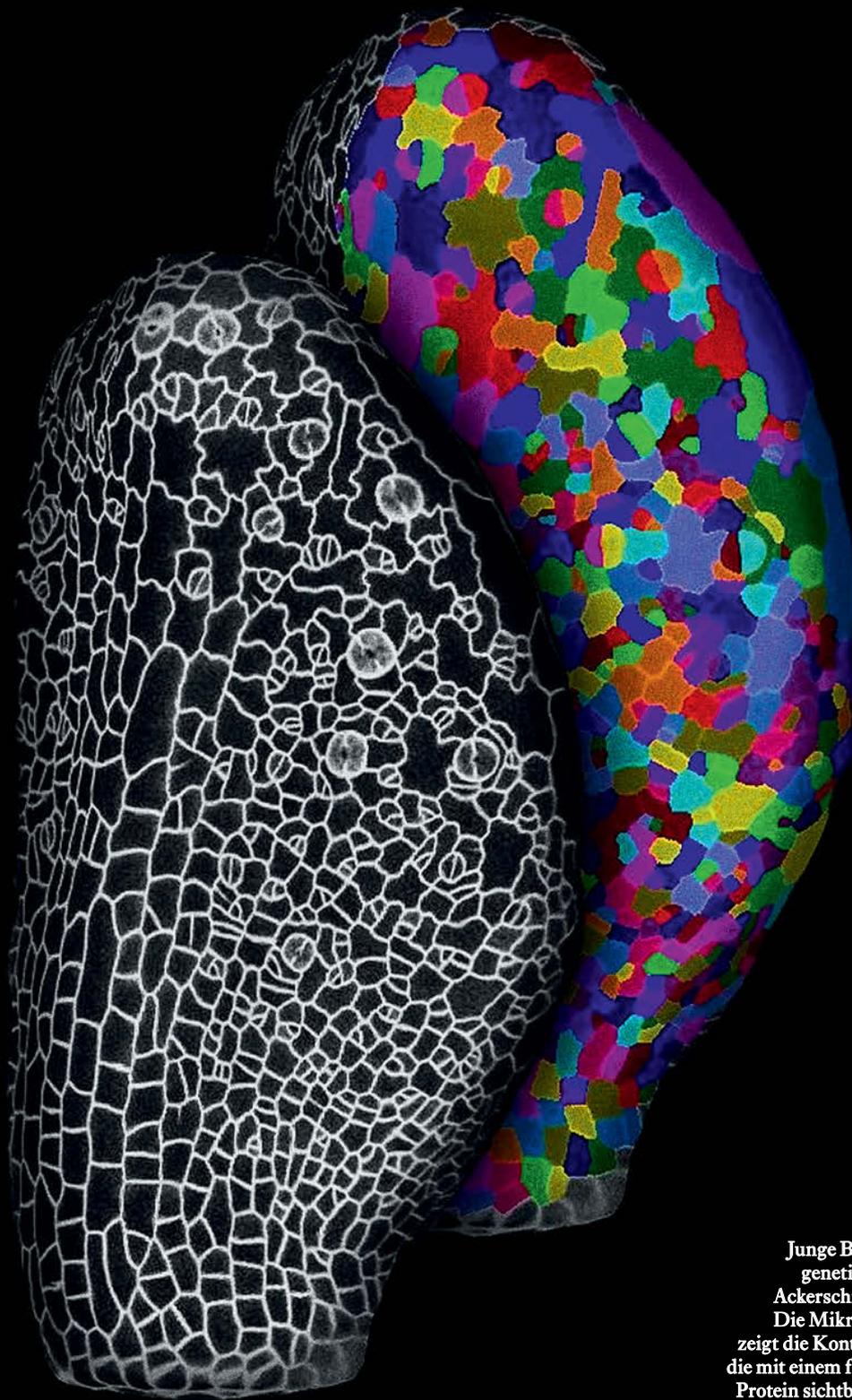
GRAFIK: GCO NACH NAKAYAMA ET. AL. (2014). REGULATION OF THE KNOX-GA GENE MODULE INDUCES



Blattvielfalt innerhalb der Kreuzblütlergewächse: Andersartige Blätter kommen nicht nur bei verschiedenen Pflanzenarten vor (A), auch ein und dieselbe Pflanze kann je nach Alter unterschiedliche Blätter bilden (B). Auch die Umweltbedingungen beeinflussen die Blattform (C).



Eine Blattknospe des Behaarten Schaumkrauts unter dem Mikroskop. Während Zellen, in denen das RCO-Gen aktiv ist (pink), sich nicht vermehren, teilen sich die dazwischenliegenden Zellen weiter. So können sich die Fiederblättchen der Schaumkrautblätter entwickeln.



Junge Blattknospe einer genetisch veränderten Ackerschmalwand (links). Die Mikroskopaufnahme zeigt die Konturen der Zellen, die mit einem fluoreszierenden Protein sichtbar gemacht sind. Mithilfe des Computers können die Zellen derselben Knospe farbig markiert (rechts) und die Vermehrung einzelner Zellen untersucht werden.

RCO-Gen hervorrufen und erneut beobachten, wie sich einfache Blätter bilden. Damit war klar, dass dieses Gen die Blattform kontrolliert. Da die Blätter des Behaarten Schaumkrauts ohne das Gen weniger komplex aufgebaut sind, taufte die Forschenden es RCO („Reduced Complexity“).

Als Nächstes untersuchte Tsiantis' Team genauer, wie sich die Schaumkrautblätter entwickeln. Die Forschenden markierten Proteine mit Fluoreszenzfarbstoffen und konnten so unter dem Mikroskop beobachten, dass das RCO-Gen punktuell am Blattrand aktiv ist – und zwar an der Basis der sich entwickel-

„Das RCO-Gen ist eine meiner wichtigsten Entdeckungen, weil es so anders als andere Gene ist.“

MILTOS TSIANTIS

den Fiederblättchen. Es hemmt das Zellwachstum an diesen Stellen, während die Zellen zwischen den RCO-Banden weiterwachsen. Die auf diese Weise entstehenden Wülste wachsen allmählich zu Fiederblättchen. „Dank RCO können so statt einer zusammenhängenden Blattfläche voneinander getrennte Fiederblätter entstehen“, erklärt Tsiantis.

Wenn RCO also ein Schlüsselgen für die Blattform ist, müsste eine Ackerschmalwand mit künstlich übertragenem RCO-Gen ebenfalls Fiederblättchen entwickeln. Und tatsächlich: Eine genetisch veränderte Ackerschmalwand mit RCO besitzt rundliche Blätter mit deutlich sichtbaren Ausbuchtungen. Zwar wachsen den Pflänzchen keine auf Stielen sitzenden Fiederblätter, die Ähnlichkeit mit dem Behaarten Schaumkraut ist jedoch wirklich verblüffend. „Die Ergebnisse dieser Experimente waren in der Fachwelt eine kleine Sensation, denn es ist sehr selten, dass ein einzelnes Gen die Unterschiede zwischen Pflanzenarten derart stark beeinflusst“, sagt Miltos Tsiantis. „Wir hatten eigentlich erwartet, dass viele Gene mit jeweils kleinen Auswirkungen an Veränderungen so grundlegender Merkmale beteiligt sind.“ Zusammen mit Donovan Bailey von der New Mexico State University hat Tsiantis daraufhin die Stammesgeschichte der Kreuzblütler untersucht, um der Entstehungsgeschichte des Gens auf den Grund zu gehen. Demnach besaßen die Kreuzblütler ursprünglich kein RCO-Gen. Arten, die ent-

wicklungsgeschichtlich alten Mitgliedern der Familie ähneln, haben daher einfache Blätter. Als RCO im Laufe der Evolution durch die Verdopplung eines Gens entstand, konnten Arten wie das Behaarte Schaumkraut oder die mit der Ackerschmalwand noch enger verwandte *Arabidopsis lyrata* tief eingekerbte oder Fiederblätter ausbilden. Später in der Stammesgeschichte ist das Gen dann wieder verloren gegangen, sodass die Ackerschmalwand einfache Blätter bilden konnte. Seit der Entdeckung des RCO-Gens hat das Team um Miltos Tsiantis die Steuerung des Blattwachstums noch genauer ergründet. Tsiantis' Arbeit ist zwar Grundlagenforschung, seine Erkenntnisse könnten aber durchaus praxisrelevant sein, zum Beispiel für die Landwirtschaft: „Mit dem Klimawandel könnte das Wissen um die Entstehung unterschiedlicher Blattformen immer wichtiger werden und einen Beitrag zur Züchtung nachhaltiger und ertragreicherer Pflanzen leisten.“ Als Miltos Tsiantis 2013 von Oxford an das Kölner Max-Planck-Institut kam, setzte er sofort auf den Einsatz hochmoderner Mikroskope. Mit ihnen kann seine Postdoktorandin Neha Bhatia einzelne Zellen sichtbar machen. Mit großem Geschick schneidet sie dafür den nur wenige Millimeter langen Keimlingen die ersten Blättchen ab und legt diese unter das Mikroskop. Dann schaltet Bhatia den Bildschirm ein, stellt scharf, und schon leuchten die Zellen mit den Fluoreszenzfarbstoffen auf. „Wir können inzwischen gleichzeitig mehrere Gene mit unterschiedlichen Farben markieren und so erkennen, wo im Blatt die Gene gerade aktiv sind“, erklärt die Wissenschaftlerin.

Inzwischen haben die Forschenden entdeckt, dass RCO zusammen mit dem sogenannten STM-Gen die Bildung von Fiederblättchen hervorruft. Während RCO das Blattwachstum hemmt, bewirkt STM, dass Zellen weiterwachsen, ohne sich zu einem bestimmten Zelltyp weiterzuentwickeln. Normalerweise teilen sich Zellen zwar nicht mehr, wenn sie sich spezialisieren. Doch mit aktivem STM können sich die Zellen vermehren, sodass das Blatt an dieser Stelle in die Breite wächst. Auf diese Weise bildet der Blattrand breite Ausstülpungen. „Wenn wir beide Gene in den Blättern der Ackerschmalwand aktivieren, sehen diese aus wie die des Behaarten Schaumkrauts“, erzählt Miltos Tsiantis. Mit dem Wissen, warum sich Pflanzen in diesem und anderen Merkmalen unterscheiden, lassen sich dann auch die Merkmale von Nutzpflanzen verändern. Doch es sind nicht die Gene allein, welche die Form eines Blattes bestimmen. Auch der mechani-

AUF DEN PUNKT GEBRACHT

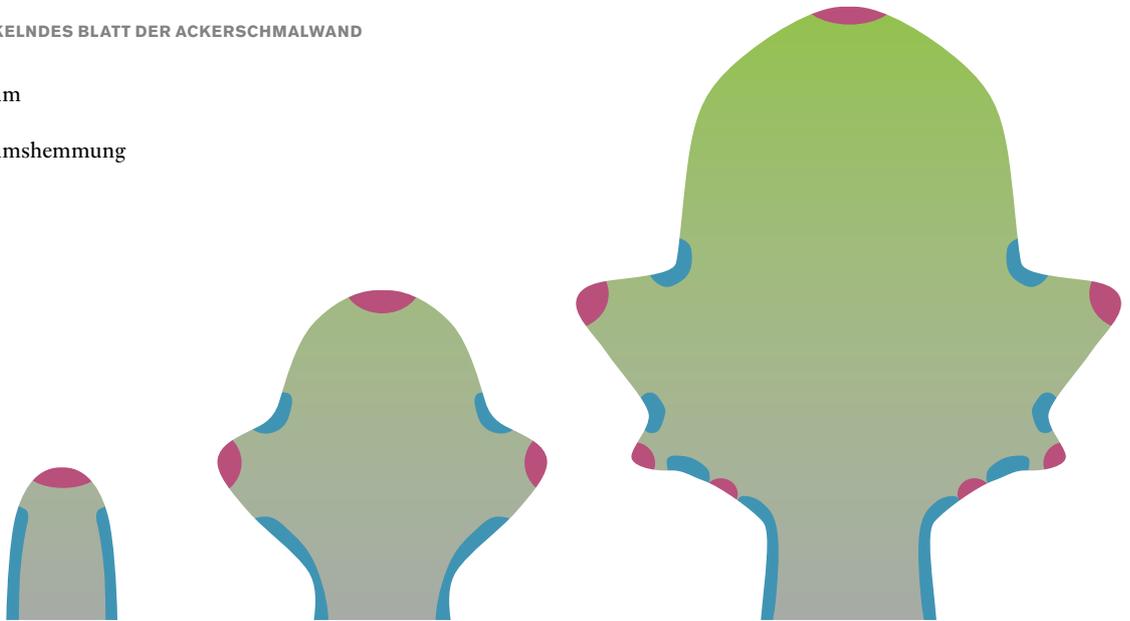
Die Entwicklung des Behaarten Schaumkrauts zu einem Modellsystem der Pflanzenforschung hat neue Erkenntnisse darüber geliefert, wie sich Pflanzen entwickeln. Das sogenannte RCO zum Beispiel ist eines der Gene, die die Form eines Blattes maßgeblich bestimmen.

RCO ist in regelmäßigen Abständen in Zellen am Blattrand aktiv. Es verhindert, dass die Zellen sich teilen.

Das STM-Gen ist ebenfalls am Blattrand aktiv, allerdings in den Zellen ohne aktives RCO. Da es die Vermehrung der Blattzellen unterstützt, kann das Blatt an diesen Stellen in die Breite wachsen. Zusammen mit RCO können sich so Ausbuchtungen bis hin zu voneinander getrennten Fiederblättchen entwickeln.

SICH ENTWICKELNDES BLATT DER ACKERSCHMALWAND

- Wachstum
- Wachstumshemmung



Eine Wachstumszone bildet einen Gradienten von starkem (grün) zu geringem (grau) Wachstum.

Zonen mit Wachstumsaktivierung und -hemmung wechseln einander ab und führen zu Ausbuchtungen des Blattrandes.

Mit zunehmender Größe des Blattes entstehen weitere lokale Wachstumszonen.

sche Widerstand des Blattgewebes, den dieses wachsenden Zellen entgegensetzt, beeinflusst die Blattentwicklung. Adam Runions, ein Informatiker aus Miltos Tsiantis' Team, hat ein mathematisches Modell entwickelt, das physikalische Wechselwirkungen im Blattgewebe berücksichtigt. Damit kann er virtuelle Blätter sprießen lassen. „Wir können zum Beispiel mit unserem Modell unsere Vermutungen über die Funktion eines Gens testen und so die Gesetzmäßigkeiten identifizieren, nach denen sich die Blätter entwickeln“, sagt Tsiantis.

Warum aber besitzen Pflanzen überhaupt so unterschiedliche Blätter? Bei der Beantwortung dieser Frage hilft ein Blick darauf, wie die Umgebung einer Pflanze die Blattform beeinflusst. Das Team von Miltos Tsiantis analysiert daher Schaumkrautpflanzen in Europa und anderen Teilen der Welt. „Wir haben zum Beispiel beobachtet, dass Pflanzen an Orten, wo sie schnell blühen und sich schnell vermehren können, auch schneller mehr Fiederblättchen produzieren. Diese Strategie könnte eine effizientere Bindung von Kohlenstoff und folglich von Nährstoffen für die nächste Generation ermöglichen. Umgekehrt warten Pflanzen in Gebieten wie Mitteleuropa oder Skandinavien, in denen sie spät blühen, weil sie einen kalten Winter überstehen müssen, mit der Bildung von Fiederblättchen bis kurz vor der Blüte. Auch dies könnte dazu dienen, die Samen, die sich bald nach der Blüte bilden werden, besser mit Nährstoffen aus den Blättern zu versorgen“, erklärt der Wissenschaftler. Die verschiedenen Methoden, der Ideenreichtum und die

ungewöhnlichen Wege und Perspektiven von Tsiantis und seinem Team haben wichtige Erkenntnisse über das Blattwachstum möglich gemacht. Er selbst betrachtet das RCO-Gen als eine seiner wichtigsten Entdeckungen – „weil es uns besonders anschaulich zeigt, wie in der Evolution Neuheiten entstehen können“.

Die allermeisten Gene besitzen mehrere Aufgaben. Aus diesem Grund können Mutationen eines Gens ganz unterschiedliche Veränderungen hervorrufen. Eine Mutation kann eine Verbesserung der einen Funktion bewirken und zugleich eine Verschlechterung einer anderen. Fachleute sprechen dabei von Pleiotropie. „Stellen Sie sich vor: Ein Vogel entwickelt Flügel, mit denen er besser fliegen kann. Wenn die dafür verantwortlichen Veränderungen im Erbgut auch die Farbe des Vogels betreffen und ihn damit für Partner unattraktiver machen, wird sich die Änderung der Flügelform sehr wahrscheinlich nicht durchsetzen können“, erklärt Miltos Tsiantis. RCO dagegen ist ein Gen, das kaum pleiotrop ist. Es steuert maßgeblich die Form der Blätter, hat aber ansonsten kaum weitere Aufgaben. „Am Beispiel von RCO kann man deshalb nicht nur das Geheimnis der Vielfalt von Blättern lüften, sondern auch lernen, wie die Evolution funktioniert.“ So ist die Rolle von RCO bei der Bildung getrennter Fiederblättchen vergleichbar mit der Trennung von Fingern und Zehen an sich entwickelnden Gliedmaßen. Allerdings wird in diesem Fall die Trennung vorwiegend dadurch erreicht, dass Zellen gezielt absterben, und nicht dadurch, dass sie im Wachstum gehemmt werden.

www.mpg.de/podcasts/vielfalt