NEUGIERIG AUF WISSENSCHAFT

Woher weiß eine Pflanze, ob es gerade Frühling, Sommer oder Herbst ist und wann sie blühen muss? Vor bald 150 Jahren berichtete Julius Sachs, dass, wenn er ein Blatt einer im Dunkeln stehenden Ackerwinde beleuchtete, die Pflanze prompt ihre Blüte öffnete. Daraus folgerte er, dass es einen systemischen Signalweg vom Blatt zur Blütenknospe geben müsse. Doch weitere Hinweise darauf, was Pflanzen zum Blühen bringt, blieben aus —

beiden Pflanzen begann zu blühen, ehe die Tageslänge eine kritische Anzahl von Stunden unterschritten hatte. Folglich blühten alle Sojabohnenpflanzen — egal, wann sie ausgesät worden waren — erst dann, wenn die Tage kurz genug waren, im September. Der "Maryland Mammoth"-Tabak blühte — egal wie hoch er gewachsen war — nicht vor Dezember, also dann, wenn die Tage noch kürzer sind.



Was lässt Pflanzen blühen? – auf der Suche nach dem geheimnisvollen Florigen

bis zur Entdeckung des Photoperiodismus 1920: In einem Tabakfeld in der Nähe von Washington D.C. in den USA entdeckten zwei Forscher des U.S.-Department of Agriculture, Wightman W. Garner und Harry A. Allard, eine Tabakmutante. Während die anderen Tabakpflanzen mit fortschreitender Jahreszeit blühten, wurde diese Mutante, Maryland Mammoth genannt, einfach nur größer und größer. Die beiden Forscher brachten Pflanzen ins Gewächshaus, wo sie vor Frost geschützt waren und im Dezember endlich blühten.

AUF DIE TAGESLÄNGE KOMMT ES AN

Garner und Allard machten auch Versuche mit der Sojabohnensorte Biloxi mit dem Ziel, den Zeitraum der Sojabohnenernte auszudehnen. Aber unabhängig vom Saattermin blühten alle Pflanzen zur selben Zeit, im September. Die Forscher begannen nun, diese beiden Pflanzensorten – den "Maryland Mammoth"-Tabak und die "Biloxi"-Sojabohne – unter verschiedenen kontrollierten Bedingungen zu kultivieren. Sie drehten an der Temperatur, der Feuchtigkeit, der Nährstoffzufuhr und den Lichtbedingungen. Und sie fanden schließlich heraus, dass der kritische Faktor bei beiden Pflanzen die Tageslänge ist: Keine der

Die beiden US-Forscher bezeichneten dieses Phänomen als **Photoperiodismus**. Die Photoperiode, also die tägliche Belichtungszeit, entscheidet darüber, ob bestimmte Morphosen (Gestaltänderungen) oder biologische Aktivitäten stattfinden können oder nicht. Garner und Allard versuchten, ihre Entdeckung an zahlreichen anderen Pflanzenarten zu bestätigen. Hierbei gelang es ihnen, unzählige Fragen zu beantworten, mit denen sich insbesondere Pflanzenzüchter schon lange beschäftigt hatten: Warum beispielsweise wächst Spinat nicht in den Tropen? Antwort: Weil Spinat, um zu blühen, wenigstens 14 Tage lang mindestens 14 Stunden Licht pro Tag benötigt – und das ist in den Tropen nie der Fall. Die Forscher fanden heraus, dass sich die Pflanzen in drei Haupttypen untergliedern lassen (Abb. B): in Kurztag- und Langtagpflanzen sowie in tagneutrale Pflanzen. Kurztagpflanzen blühen im zeitigen Frühjahr oder Herbst, wenn die Lichtphase relativ zur Dunkelphase kurz ist.

Langtagpflanzen blühen dagegen hauptsächlich im Sommer; sie kommen erst bei Überschreiten einer kritischen Tageslänge zum Blühen.

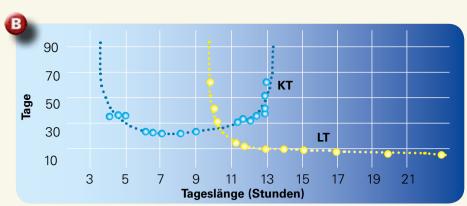
sogenannten Frühblühern.

Buschwindröschen gehören zu den

→ Tagneutrale Pflanzen blühen unabhängig von der Tageslänge. Für die Pflanzen wirkt die Tageslänge als ein Maß der Jahreszeit. Die Bedeutung des Photoperiodismus liegt auf der Hand: Er steuert m Normalfall die Entwicklung so, dass beim Eintreten ungünstiger Witterungsperioden (Kälte- oder Trockenperioden) das Blühen und Fruchten abgeschlossen und Samen als Dauerstadien gebildet sind. Pflanzen können die Tageslänge auf 10 bis 15 Minuten genau erfassen. 1945 nahmen Forscher das Wirkungsspektrum der photoperiodischen Reaktion auf und wiesen auf die Bedeutung von Rotlicht hin. Wie später gezeigt wurde, steht der Photoperiodismus unter der Kontrolle des Phytochrom-Systems, einer weit verbreiteten Klasse von Photorezeptor-Proteinen. Sie messen das Verhältnis von hellrotem zu dunkelrotem Licht und steuern eine breites Spektrum von Antworten auf Lichtreize, unter anderem auch die Keimung und Blütenbildung. Die Photorezeptor-Proteine sitzen in den Blättern der Pflanze.

UNBEKANNTER BLÜHFAKTOR

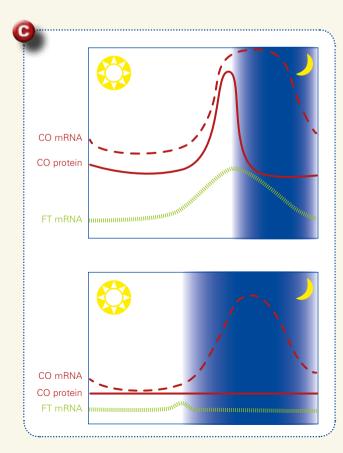
Dass die Lichtwahrnehmung dort erfolgt, hatte 1936 auch schon Michael Chailakhyan anhand seiner Versuche mit der Kurztagpflanze *Chrysanthemum indicum* zeigen können. Er entlaubte den oberen Teil der



▲ Die kritische Tageslänge beim Photoperiodismus ist artspezifisch. Ihre Größe besagt nichts über das Vorliegen einer Kurztags- oder Langtagsreaktion. Entscheidend ist, ob es sich um einen Tageslängenminimalwert oder -maximalwert handelt. Minimalwerte von Langtagpflanzen (LT) und Maximalwerte von Kurztagpflanzen (KT) können sich überlappen, wie hier bei der Kurztagpflanze *Chrysanthemum* und der Langtagpflanze *Hyoscyamus niger*; im Überlappungsbereich werden die entsprechenden Morphosen, z.B. das Blühen, bei beiden ausgelöst.

Pflanze und setzte die Blätter des unteren Teils einer blüteninduzierenden Kurztagperiode aus. Die Pflanze blühte. Hielt er aber den oberen, entlaubten Teil der Pflanze im Kurztag und den unteren, beblätterten Teil im Langtag, so blühte die Pflanze nicht. Chailakhyan interpretierte diese Ergebnisse so, dass die Blätter offenbar eine Substanz bilden, die zur Sprossspitze wandert und dort die Blütenbildung auslöst. Er nannte diesen Blühfaktor "Florigen". Dieser kann

sogar durch Pfropfung innerhalb verwandter Arten von einer Kurztag- auf eine Langtagpflanze und zwischen verschiedenen Arten übertragen werden. Allerdings gelangt Florigen nur von einem Pflanzengewebe zum anderen, wenn zwischen beiden eine Brücke aus lebendem Gewebe besteht. Werden primäre und sekundäre Rinde entfernt, hört der Florigen-Transport auf. Offenbar wandert die Substanz also über das Phloem-System zur Knospe.



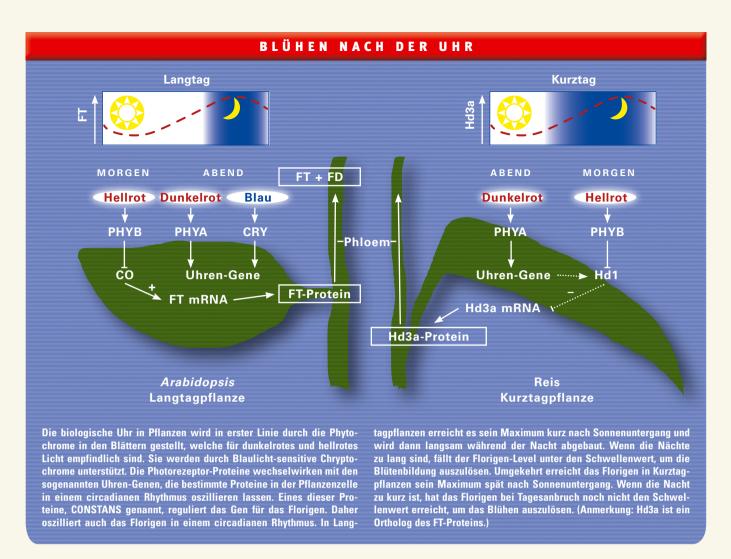
 Einfluss der circadianen Rhythmik auf den Photoperiodismus: Das CONSTANS-Gen wird etwa 12 Stunden nach Tagesanbruch zum ersten Mal abgelesen. An langen Tagen (oben) entsteht daher bereits spät am Tag die entsprechende mRNA, während das an kurzen Tagen (unten) nur in der Nacht geschieht. Cryptochrom und Phytochrom A stabilisieren das neu hergestellte CONSTANS-Protein im Tageslicht. Sind sie iedoch wegen der einsetzenden Dunkelheit nicht mehr aktiv, so wird das Protein abgebaut. Daher ist bei kurzer Tageslänge das CONSTANS-Protein in Pflanzenzellen nicht zu finden, obwohl seine Boten-RNA gebildet wird. Bei dem **CONSTANS-Protein handelt** es sich um einen Transkriptionsfaktor, der das Ablesen des FT-Gens und damit die Herstellung der entsprechenden Boten-RNA (FT mRNA) reguliert.

EIN NEUER ANSATZ

Florigen schien universell in allen Pflanzen der vermittelnde Blühfaktor zu sein – aber den Forschern gelang es nicht, ihn genauer zu charakterisieren. Wie ein Phantom entzog sich das Florigen jedem Zugriff. "Nach keiner anderen Substanz in der Botanik wurde so lange ergebnislos gefahndet" sagt Detlef Weigel, Direktor am Max-Planck-Institut für Entwicklungsbiologie in Tübingen. Viele Wissenschaftler begannen deshalb zu glauben, dass Florigen eine komplizierte Mischung aus verschiedenartigen Molekülen sein müsste.

Als die biochemischen Ansätze nicht weiterführten, kam die Molekulargenetik ins Spiel. Die unscheinbare Ackerschmalwand Arabidopsis thaliana hatte sich zu einem weit verbreiteten Modellorganismus in der Pflanzenforschung entwickelt. Ihr Genom wurde inzwischen vollständig entschlüsselt; es enthält etwa 25.000 Gene, welche die Basis für das pflanzliche Leben darstellen. Arabidopsis ist eine Langtagpflanze, die im Frühling als Folge der länger werdenden Tage blüht. Die Forscher untersuchten Mutan-





ten mit unterschiedlichem Blühverhalten und stießen dabei auf zwei Gene, die maßgeblich am Auslösen des Blühens beteiligt sind: CONSTANS (CO) und FLOWERING LOCUS T (FT). Beide Gene stehen unter der Kontrolle der **inneren biologischen Uhr** der Pflanze. Viele pflanzliche Verhaltensweisen folgen einem **circadianen Rhythmus**, d.h. sie werden von einer inneren Uhr gesteuert, deren Zyklus etwa 24 Stunden dauert, zum Beispiel die Bewegung der Blätter, um das Sonnenlicht optimal zu verwerten, oder das Schließen der Spaltöffnungen an den Blättern, um den Wasserverlust während des Tages möglichst gering zu halten.

LICHTGESTEUERTE GENE

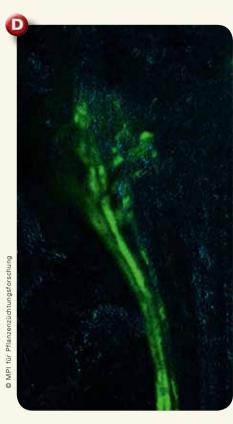
Das **CONSTANS**-Gen wird etwa 12 Stunden nach Tagesanbruch zum ersten Mal abgelesen — bis zum kommenden Morgen. Die Forscher können das anhand der Boten-RNA (mRNA) feststellen: An langen Tagen häuft sich diese bereits spät am Tag an, während das an kurzen Tagen nur in der Nacht geschieht **(Abb. C)**. "Wenn CONSTANS also die Blütenbildung nur unter der Bedingung

auslöst, dass sich seine Expression mit der Einwirkung von Licht überlappt, so würde das erklären, warum Pflanzen an langen, nicht aber an kurzen Tagen zu blühen beginnen", so die Überlegungen von George Coupland. Und tatsächlich konnte der Direktor am Max-Planck-Institut für Pflanzenzüchtungsforschung in Köln zusammen mit seinem Team zeigen, dass die Photorezeptor-Proteine Cryptochrom und Phytochrom A, die blaues beziehungsweise dunkelrotes Licht detektieren, notwendig sind, um CONSTANS zu aktivieren. Sind diese Licht-Rezeptoren am Ende des Tages durch das einwirkende blaue oder dunkelrote Licht immer noch aktiv, so wird verhindert, dass das neu hergestellte CONSTANS-Protein gleich wieder abgebaut wird. Sind sie jedoch wegen der einsetzenden Dunkelheit nicht mehr aktiv, so haftet sich ein kleines Protein namens Ubiquitin an das Protein und führt zu dessen raschem Abbau. Daher ist bei kurzer Tageslänge das CONSTANS-Protein in Pflanzenzellen nicht zu finden, obwohl seine Boten-RNA gebildet wird. "Das CONSTANS-Protein reichert sich also erst dann im Zellkern an, wenn die

Pflanzen den langen Lichtperioden von Frühlingstagen ausgesetzt sind. Dagegen wird das Protein rasch abgebaut, wenn die Tage wie im Winter zu kurz sind. Entsprechend erfolgt die Blütenbildung nur bei größerer Tageslänge, wenn Pflanzen auch 12 Stunden nach Tagesanbruch noch Licht erhalten", fasst George Coupland die Ergebnisse zusammen. Die Kölner Max-Planck-Forscher entdeckten zudem, dass das Photorezeptor-Protein Phytochrom B dafür sorgt, dass CONSTANS bei Tagesanbruch wieder abgebaut wird. Dass CONSTANS am Ende des Tages aktiviert wird, hängt also sowohl vom circadianen Rhythmus ab, der die Bildung der Boten-RNA steuert, als auch vom Antagonismus zwischen verschiedenen Lichtrezeptoren: Während einige der Rezeptoren zum Abbau des CONSTANS-Proteins am Morgen führen, bewirken andere dessen Stabilisierung am Abend.

CONSTANS wird ausschließlich im Phloem ausgereifter Blätter produziert. Es befördert ganz offensichtlich die Blütenbildung, aber da es sich im Zellkern anreichert und





■ Das FT-Protein wurde mit einem grün fluoreszierenden Protein (GFP) markiert und im Gefäßsystem eines jungen Arabidopsis-Keimlings unter dem Mikroskop beobachtet. So konnte experimentell nachgewiesen werden, dass das FT-Protein aus den Blättern bis in die Sprossspitzen der Ackerschmalwand wandert.

somit alle Eigenschaften des Florigens auf. Sollten die Forscher nach mehr als 70 Jahren endlich den "Heiligen Gral der Pflanzenbiologie" entdeckt haben?

Da das FT-Gen in den Blättern aktiv ist, das FT-Protein aber an den weit entfernten Sprossspitzen FD aktivieren muss, schlossen die Forscher, dass das kleine FT-Protein zu den Orten wandern muss, an denen die Blüten entstehen. Offen blieb, ob es von den Blättern direkt zu den Sprossspitzen wandert oder ob das Signal möglicherweise in einer Art Staffellauf über Zwischenstufen weitergeleitet wird. 2005 publizierte ein Team schwedischer und französischer Wissenschaftler im Fachmagazin Science eine Arbeit, nach der die Boten-RNA des FT-Proteins vom Blatt bis in den Wuchskegel transportiert wird. Erst dort sollte das FT-Protein gebildet werden. Das war jedoch ein Irrtum, wie sich zwei Jahre später herausstellte.

Denn 2007 gelang es George Coupland und seinen Mitarbeitern, das grün fluoreszierende Protein (GFP) an das FT-Protein zu koppeln. GFP stammt aus der Qualle Aequorea victoria und ist aus dem Instrumentenkasten der Zellbiologen heute nicht mehr wegzudenken - für seine Entdeckung und Entwicklung gab es 2008 deshalb auch den Nobelpreis für Chemie. Coupland und Co. konnten den Weg des GFP-FT-Komplexes in Arabidopsis aus dem Phloemgewebe zum Wachstumskegel unter dem Mikroskop verfolgen (Abb. D) und damit den Nachweis liefern, dass das Signal zur Blüteninduktion - das FT-Protein - tatsächlich mobil ist. Daraus folgerten sie, dass das FT-Protein in den Blättern gebildet wird und danach durch die gesamte Pflanze bis in den Wuchskegel der Sprossspitzen wandert, wo schließlich die Blütenbildung induziert wird. Und die Wissenschaftler schoben einen weiteren Beweis nach: Sie pfropften Mutanten, die kein FT-Protein bilden konnten, auf ganz normale Arabidopsis-Pflanzen und beobachteten dann, wie das FT-Protein aus der unteren Pflanze durch die aufgepfropfte,

FT-freie Pflanze durchwanderte und schließlich Blüten gebildet wurden. In Tübingen lieferte die Gruppe um Markus Schmid am Max-Planck-Institut für Entwicklungsbiologie weitere Indizien: Die Forscher verhinderten zunächst, dass das FT-Protein das Phloem-Gewebe verlässt – und unterdrückten damit das Blühen. Erst nachdem sie durch einen biochemischen Trick das FT-Protein wieder freigesetzt hatten, wurde die Blütenbildung ausgelöst.



"Das Blühen einzuleiten, ist eine der wichtigsten Entscheidungen, die Pflanzen treffen müssen. Es ist deshalb unerlässlich, dass diese Entscheidung präzise auf die Jahreszeit abgestimmt wird", betont Detlef Weigel. "Pflanzen, die durch Pollen von anderen Mitgliedern ihrer Art bestäubt werden, wie beispielsweise Kirschbäume, müssen sicherstellen, dass sie zur selben Zeit blühen wie ihre Nachbarn. Es ist ein raffinierter Trick der Natur, dass zwei Komponenten zusammen kommen müssen, damit sich Blüten bilden können. Eine bestimmt, zu welcher Jahreszeit die Pflanze blüht, die andere, wo an der Pflanze sich die Blüten bilden."

So komplex sich Florigen neuerdings auch darstellt, so allgemein gültig ist wohl seine Wirkung. Die Schlüsselmoleküle FT und FD kommen nämlich im gesamten Pflanzenreich vor, auch in bedeutenden Nutzpflanzen. Versteht man das Zusammenspiel zwischen Umweltparametern sowie Blüten- und Samenentwicklung besser, ließen sich möglicherweise neue Reis-, Getreide- oder Gemüsesorten züchten, die an Orten gedeihen können, an denen sie dies normalerweise nicht tun würden. Vielleicht kann man irgendwann auch Spinat in den Tropen wachsen lassen.

Schlagwörter: Photoperiodismus, Kurztag-/Langtagpflanzen, Florigen, Phytochrom-System, biologische Uhr, circadiane Rhythmik, Photorezeptor-Proteine, CONSTANS, FLOWERING LOCUS T, grün fluoreszierendes Protein

Leseempfehlung: Richard Stout, How Plants Make Flowers, Kindle eBook, 2011

Link-Tipps: http://www.howplantswork.com/

→ weder Protein noch mRNA sich bei Pfropfungsexperimenten in hinreichender Menge in den Sprossverbindungen nachweisen ließen, kam es nicht als Blühfaktor in Frage. Allerdings schaltet CONSTANS im Zellkern bestimmte andere Gene ein – unter anderem auch das **FLOWERING LOCUS T** (FT)-Gen. Das FT-Gen wird in den Blättern aktiviert und löst im weiteren Verlauf die Blütenbildung aus: "Wir haben das FT-Gen in den späten 1990er Jahren entdeckt, konnten uns aber über etliche Jahre nicht vorstellen, wie dieses kleine Protein die Aktivität der Gene steuert, die für die Bildung von Blüten nötig sind", sagt Detlef Weigel.

Der Tübinger Max-Planck-Forscher und seine Mitarbeiter entdeckten, dass FT an ein weiteres Protein mit dem Kürzel FD bindet (Kasten Seite 3). FD seinerseits steuert direkt die Aktivität von Genen, die dazu führen, dass sich Gruppen von Stammzellen - jene Zellen, deren Entwicklungsprogramm noch nicht festgelegt ist – an den Sprossspitzen zu Blüten entwickeln. Im Gegensatz zu FT wird das FD-Protein jedoch nicht in den Blättern, sondern nur an den Spitzen der Sprosse hergestellt. "Als wir sahen, dass FT das FD-Protein braucht, das an den Sprossspitzen der Pflanze gebildet wird, wurde uns auf einmal alles klar", erklärt Weigel: "Nur wenn FT und FD in derselben Zelle zusammenarbeiten, sind sie aktiv." Das FT-Protein wies

WWW.MAXWISSEN.DE

der Link zur Forschung für Schüler und Lehrer

Hier finden Sie Hintergrundinformationen und didaktisches Material zu den jeweils zweimal im Jahr erscheinenden Ausgaben von BIOMAX, GEOMAX und TECHMAX. Weitere Exemplare können Sie kostenlos bestellen bei:

