

# DIE WUNDERWELT DER **PFLANZEN**



**Plankton**

Motor der Evolution

**Physiologie**

Grüne Wasserwaage

**Wood Wide Web**

Vernetzte Welt

## EDITORIAL



Antje Findeklee  
E-Mail: [findeklee@spektrum.de](mailto:findeklee@spektrum.de)

Folgen Sie uns:



Liebe Leserin, lieber Leser,  
das Grün um uns birgt so manch spannende Erkenntnis:  
sei es als Archiv der Vergangenheit oder Vorbild für  
Hightech-Anwendungen. Pflanzen sind Meister der  
Tarnung und der Täuschung, sie kommunizieren  
untereinander und manipulieren ihre Bestäuber,  
Samenverbreiter und Fressfeinde. Und während manche  
uns dank ihrer Inhaltsstoffe gesünder machen, sollten Sie  
anderen wirklich besser aus dem Weg gehen.

Eine spannende Lektüre wünscht Ihnen

Erscheinungsdatum dieser Ausgabe: 01.04.2019

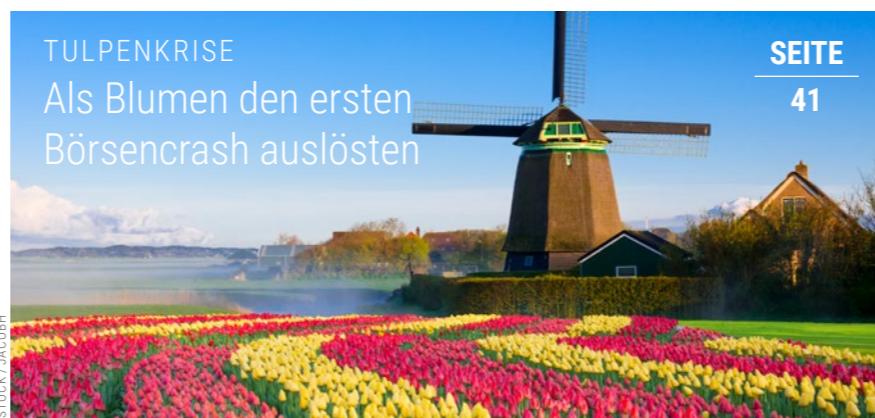
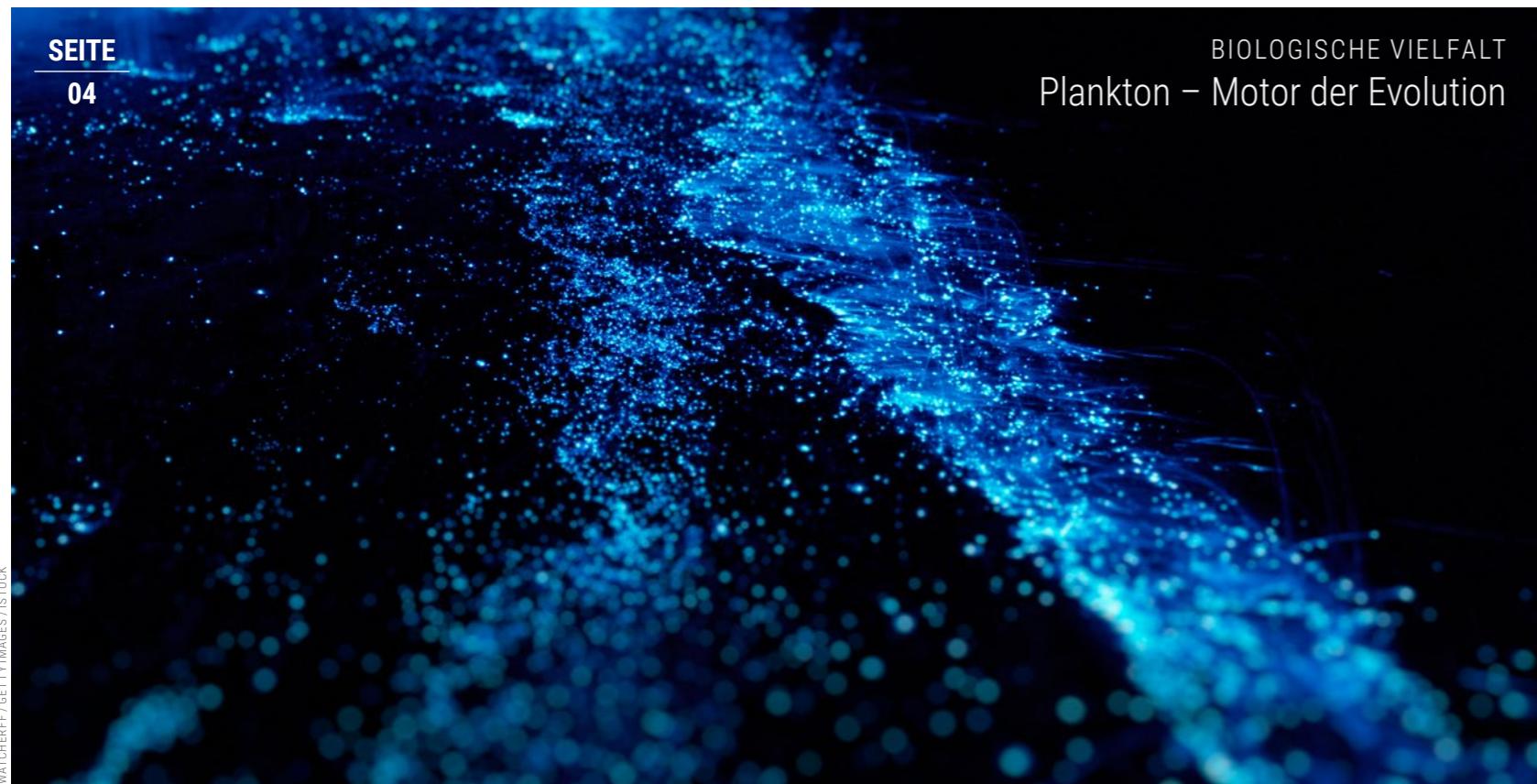
## IMPRESSIONUM

**CHEFREDAKTEURE:** Prof. Dr. Carsten Könneker (v.i.S.d.P.)  
**REDAKTIONSLINTER:** Dr. Daniel Lingenhöhl  
**ART DIRECTOR DIGITAL:** Marc Grove  
**LAYOUT:** Oliver Gabriel, Marina Männle  
**SCHLUSSREDAKTION:** Christina Meyberg (Ltg.), Sigrid Spies, Katharina Werle  
**BILDREDAKTION:** Alice Krüßmann (Ltg.), Anke Lingg, Gabriela Rabe  
**PRODUKTMANAGEMENT DIGITAL:** Antje Findeklee, Dr. Michaela Maya-Mrschtik  
**VERLAG:** Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, Tiergartenstr. 15–17, 69121 Heidelberg, Tel. 06221 9126-600, Fax 06221 9126-751; Amtsgericht Mannheim, HRB 338114, UStd-Id-Nr. DE229038528  
**GESCHÄFTSLEITUNG:** Markus Bossle  
**MARKETING UND VERTRIEB:** Annette Baumbusch (Ltg.), Michaela Knappe (Digital)  
**LESER- UND BESTELLSERVICE:** Helga Emmerich, Sabine Häusser, Ilona Keith, Tel. 06221 9126-743, E-Mail: [service@spektrum.de](mailto:service@spektrum.de)

**BEZUGSPREIS:** Einzelausgabe € 4,99 inkl. Umsatzsteuer  
**ANZEIGEN:** Wenn Sie an Anzeigen in unseren Digitalpublikationen interessiert sind, schreiben Sie bitte eine E-Mail an [service@spektrum.de](mailto:service@spektrum.de).

Sämtliche Nutzungsrechte an dem vorliegenden Werk liegen bei der Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH. Jegliche Nutzung des Werks, insbesondere die Vervielfältigung, Verbreitung, öffentliche Wiedergabe oder öffentliche Zugänglichmachung, ist ohne die vorherige schriftliche Einwilligung des Verlags unzulässig. Jegliche unautorisierte Nutzung des Werks berechtigt den Verlag zum Schadensersatz gegen den oder die jeweiligen Nutzer. Bei jeder autorisierten (oder gesetzlich gestatteten) Nutzung des Werks ist die folgende Quellenangabe an branchenüblicher Stelle vorzunehmen: © 2019 (Autor), Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, Heidelberg. Jegliche Nutzung ohne die Quellenangabe in der vorstehenden Form berechtigt die Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH zum Schadensersatz gegen den oder die jeweiligen Nutzer. Bildnachweise: Wir haben uns bemüht, sämtliche Rechteinhaber von Abbildungen zu ermitteln. Sollte dem Verlag gegenüber der Nachweis der Rechtsinhaberschaft geführt werden, wird das branchenübliche Honorar nachträglich gezahlt. Für unaufgefordert eingesandte Manuskripte und Bücher übernimmt die Redaktion keine Haftung; sie behält sich vor, Leserbriefe zu kürzen.

# INHALT



- 13 EVOLUTION  
Erste Landpflanzen früher als gedacht?
- 16 PFLANZENPHYSIOLOGIE  
Grüne Wasserwaage
- 25 ÖKOLOGIE  
Chemischer Hilferuf der Blüten
- 29 FIESER PFLANZENSCHUTZ  
Wie man Raupen dazu anstiftet, sich selbst zu fressen
- 31 BOTANISCHE SENSOREN  
Fleisch fressende Pflanze arbeitet mit Gasradikalen
- 33 SELBSTORGANISIERENDE SYSTEME  
Die völlig übersehene Schattenstrategie der Sonnenblume
- 35 BOTANISCHE INNOVATIONEN  
Hahnenfuß lockt Bestäuber mit allen Tricks
- 37 SCHLICHTING!  
Vorsicht – explodierende Samenkapseln
- 58 FINGER WEG  
10 Pflanzen, die Sie unbedingt meiden sollten

A microscopic image showing a chain of phytoplankton cells against a dark blue background. The cells are greenish-yellow with distinct internal structures. Some have long, thin appendages extending from their sides.

BIOLOGISCHE VIELFALT

# PLANKTON

## Motor der Evolution

von Ronald Martin und Antonietta Quigg

Nach der Perm katastrophe vor 250 Millionen Jahren explodierte die Vielfalt der Meerestiere plötzlich. Ein wichtiger Grund: ein Entwicklungsschub des Phytoplanktons.

**K**önnten wir die Erde vor 500 Millionen Jahren aufsuchen, erschien sie uns wie ein fremder Planet. Damals, im Erdaltertum oder Paläozoikum, lagen die Kontinente überwiegend in der südlichen Hemisphäre, die Ozeane hatten völlig andere Umrisse und Strömungen, die heutigen Gebirge und Wüsten gab es noch nicht. Auch Landpflanzen waren noch nicht entstanden.

Am befreundlichsten erschien uns aber wohl die damalige Tierwelt. Noch lebten fast alle mehrzelligen Organismen im Meer. Brachiopoden – äußerlich Muscheln ähnelnde Armfüßer – und Trilobiten beherrschten die Szene. Letztere waren urtümliche Gliederfüßer, also Verwandte von Krebsen, Spinnen und Insekten. Wie diese bildeten sie eine harte Hülle als Außenskelett, trugen am Kopf lange Fühler – so genannte Antennen – und besaßen Facettenaugen, die aus vielen kleinen Einzelaugen bestehen.

Während der nächsten 250 Millionen Jahre nahm die Vielfalt der Meerestiere beträchtlich zu – bis zum größten bekannten Massensterben am Übergang vom Perm zur Trias, bei dem über 90 Prozent aller

ozeanischen Arten ausgelöscht wurden. Damit ging vor rund 250 Millionen Jahren das Erdaltertum zu Ende, aber ein neues Zeitalter stand schon in den Startlöchern: das Erdmittelalter oder Mesozoikum mit den Dinosauriern, in dem auch frühe Säugetiere sowie später erste Vögel auftraten. Auch im Meer gestaltete sich das Leben jetzt grundlegend neu. Dort setzten sich viele der Tiergruppen durch, die noch heute die Ozeane beherrschen, zum Beispiel moderne Raubfische, Weichtiere und Krebse, Seeigel und Seegurken.

Den Fossilienfunden zufolge wuchs die Vielfalt der Meerestiere seit damals wesentlich stärker als je zuvor. Diese Entwicklung setzte sich über das Erdmittelalter hinaus in der Erdneuzeit fort. Früher hielten die Forscher diesen Befund für ein Artefakt – dadurch hervorgerufen, dass sich geologisch jüngere Fossilien mehr und besser erhalten haben. Aber inzwischen steht fest: Die beeindruckende Zunahme der Diversität ozeanischer Arten seit dem frühen Erdmittelalter ist Tatsache. Als Ursachen dafür betrachten Wissenschaftler unter anderem Klimaveränderungen, Verschiebungen des Meeresspiegels oder auch weitere Massenaussterben. Weil all solche Ereignis-

## AUF EINEN BLICK

### Große Rolle für die Kleinsten

- 1 Nach der Perm katastrophe, dem größten Massenaussterben aller Zeiten vor 250 Millionen Jahren, entstanden im Meer bald erstaunlich viele neue Lebensformen. Zahlreiche heutige Organismen gehen darauf zurück, etwa moderne Raubfische.
- 2 Bisher erklärten Forscher diese rasante Evolution mit physikalischen Umweltphänomenen, etwa Verschiebungen des Meeresspiegels. Doch die Anzeichen mehren sich, dass Algen des Planktons dabei eine wichtige Rolle spielten.
- 3 Seit damals gewannen andere Planktonalgen als vorher die Oberhand. Sie waren nahrhafter – und ermöglichen deshalb der Tierwelt eine raschere Evolution sowie in manchen Fällen einen intensiveren Stoffwechsel.

se die Evolutionsmöglichkeiten und Überlebenschancen neu verteilen, mögen sie für den beobachteten Anstieg der Organismenvielfalt durchaus einige Bedeutung gehabt haben. Doch sie allein erklären die fossilen Befunde nicht zufriedenstellend.

Denn ein anderer Faktor fand in den bisherigen Szenarien zu wenig Gewicht: das Nahrungsangebot im Meer, genauer gesagt die Basis der Nahrungsketten, das Phytoplankton. Damals, als die marine Artenvielfalt so frappant zuzunehmen begann, erfolgte bei den winzigen Algen des pflanzlichen Planktons offensichtlich ein Umschwung. Ihre Masse und insbesondere ihr Nährstoffgehalt nahmen stark zu. Wie es aussieht, ermöglichten erst diese mikroskopischen, Fotosynthese betreibenden Organismen die Evolution der modernen Meeresfauna.

Die neuen Einsichten verweisen zudem auf die Zukunft unseres Planeten: Auch heute noch basieren wichtige Nahrungspyramiden auf dem Phytoplankton. Das aber droht nun durch Klimawandel und anhaltende Abholzung völlig aus dem Gleichgewicht zu geraten. Warum sind die Planktonalgen so grundlegend wichtig? Wie alle Pflanzen erzeugen sie durch Foto-

synthese mittels Sonnenenergie organische Nahrungsstoffe. Von ihnen ernährt sich zunächst hauptsächlich das so genannte Zooplankton, das selbst keine Fotosynthese betreibt. Dessen winzige Tiere oder Larven und Eier werden wiederum von etwas größeren tierischen Organismen in der Nahrungskette gefressen, und so weiter.

Nährstoffe im Wasser wie Stickstoff, Eisen, Phosphor »düngen« das Phytoplankton. Je mehr davon vorhanden ist, desto besser gedeihen die Mikroalgen – und desto mehr Nahrung steht dem tierischen Plankton zur Verfügung, und somit auch dessen Fressfeinden. Ein Überangebot an solchen Stoffen macht das Phytoplankton zudem nahrhafter. Dann wachsen und vermehren sich die winzigen Tiere auf den unteren Stufen der Nahrungskette noch besser, ihre Populationen breiten sich aus, Teile davon spalten sich ab und bilden neue Populationen. Diese entwickeln sich manchmal eigenständig weiter. So können mit der Zeit immer wieder neue Arten entstehen. Und weil solche Vorteile in der Nahrungskette weitergereicht werden, fördert ein reicheres Plankton letztlich gleichfalls die Evolution größerer Tiere.

In den 1990er Jahren tauchte einer der ersten Hinweise darauf auf, dass die Mikroalgen bei der Explosion der Lebensvielfalt nach dem Paläozoikum eine Rolle gespielt haben dürften. Aus Untersuchungen an marinen Fossilien schlossen damals mehrere Forscher unabhängig voneinander, dass das Nahrungsangebot im Meer seit dem Erdaltertum bis in die Erdneuzeit zugenommen hat. Zu ihnen gehörten der Paläontologe Richard Bambach, heute bei der Smithsonian Institution in Washington D. C., sowie einer von uns (Martin). Uns war aufgefallen, dass der Anteil an räuberischen und anderen Meeresorganismen, die einen höheren Energiebedarf als Zooplankton haben, im Verlauf der Zeit immer weiter gestiegen war. Direkte Anzeichen von gehaltvollerem Phytoplankton entdeckten wir (Martin und Quigg) zusammen mit Viktor Podkopyrov von der russischen Akademie der Wissenschaften erst vor wenigen Jahren an fossilen marinen Algen selbst.

Wie wir erkannten, bestand die pflanzliche Nahrungsbasis im Erdaltertum in der Hauptsache aus winzigen »grünen« Algen, zu denen verschiedene nicht unbedingt näher verwandte Organismen gehören, die ihre Fotosynthese nach dem gleichen Sche-

ma betreiben. Diese »grünen« Algen sind nicht zu verwechseln mit den so genannten Grünalgen, die zwar auf Grund ihrer Art der Fotosynthese auch dazugehören, aber gewöhnlich als eine zusammengehörige systematische Gruppe gelten. Räuberische Arten gab es damals, als »grüne« Mikroalgen vorherrschten, noch vergleichsweise wenige.

Aber nachdem beim permischen Massensterben das meiste Leben im Meer einschließlich der meisten »grünen« Algenlinien ausgelöscht worden war, tauchten neue Phytoplanktonformen auf. Zunächst waren das die Coccolithophoriden, Kalkalgen mit einer als Coccolith bezeichneten Schale. Hinzu kamen bald Dinoflagellaten (Panzergeißler) und Diatomeen (Kieselalgen). Letztere sollten sich später zu den vorherrschenden und vielfältigsten Organismen des marinen Phytoplanktons entwickeln. Diese drei Gruppen zusammen bezeichnen wir als »rote« Algen (wiederum nicht zu verwechseln mit den Rotalgen). Sie verwendeten zur Fotosynthese einen Chlorophylltyp, der vermutlich einst von Rotalgen aufgenommen worden war. Jene »roten« planktonischen Algen ersetzten fortan weit gehend die »grünen« Arten

des Erdaltertums. Und damit boten sie beste Voraussetzungen für die Entstehung zahlreicher neuer Tiere mit hohem Energiebedarf – so unsere These.

### **Warum »rotes« Plankton siegte**

Natürlich fragten wir uns, wieso jene »roten« Algen über noch verbliebene »grüne« Planktonorganismen, die das Massensterben überlebt hatten, dermaßen die Oberhand gewinnen konnten. Anscheinend, so meinen wir inzwischen, spielte eine große Rolle dafür ein verändertes Angebot der im Wasser gelösten Mikronährstoffe, die Pflanzen zu ihrer Fotosynthese benötigen. Als Quigg und ihre Kollegen an der Rutgers University (New Jersey) den Gehalt von solchen, in geringen Konzentrationen verfügbaren Spurenelementen bei heutigen »grünen« und »roten« Planktonalgen verglichen, fanden sie einige klare Unterschiede zwischen den beiden Gruppen. Aus ihren Ergebnissen schlossen sie, dass auch damals die »grünen« Algen – wie die heutigen – mehr Eisen, Zink und Kupfer enthielten als die »roten« und diese hingegen mehr Mangan, Kobalt und Kadmium. Das wiederum bedeutet, dass die drei letztgenannten Stoffe nach der Perm katastrophe

in größerer Menge verfügbar gewesen sein müssen als die ersten drei. Deswegen konnten nun offenbar »rote« Planktonalgen besser gedeihen als »grüne«.

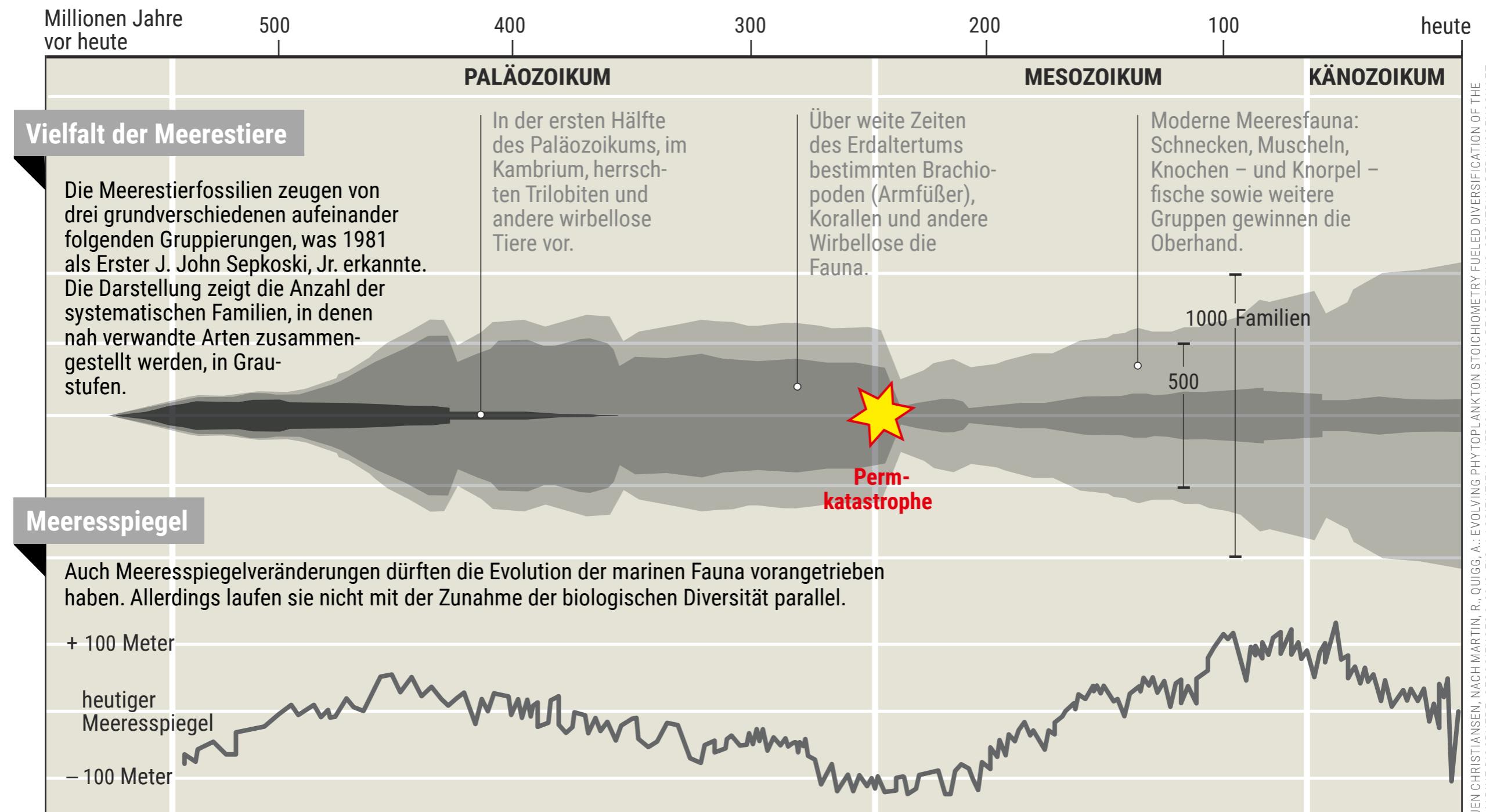
Geologische Befunde stützen diese These. Aus dem Paläozoikum existieren große Vorkommen von Schwarzschiefer, einem kohlenstoffreichen Gestein. Die Ozeane müssen damals sauerstoffarm gewesen sein, sonst hätte sich der Kohlenstoff nicht in der Form erhalten. Eisen und die anderen Spurenelemente, von denen »grünes« Phytoplankton besonders zehrt, lösen sich im Meer bei geringem Sauerstoffgehalt besser als bei einem hohen. Sie waren diesen Algen somit im Erdaltertum zur Fotosynthese recht leicht verfügbar.

Im Erdmittelalter änderten sich die Verhältnisse. Aus dieser Zeit ist Schwarzschiefer nur von einigen kurzen Phasen überliefert, in denen der Sauerstoffgehalt im Meer abfiel. Meist muss dieser nun jedoch beträchtlich höher gewesen sein als vorher – was offensichtlich den »roten« Algen zugutekam. Denn unter diesen Bedingungen enthält Meerwasser reichlich von ihnen bevorzugten Spurenelementen.

Allerdings erklärt das allein den Aufstieg der »roten« Algen noch nicht völlig. Wir ver-

# Die Macht des Phytoplanktons

Gegen Ende des Paläozoikums (Erdaltertums) starben über 90 Prozent der marinen Arten aus. Jedoch erlebte die Tierwelt der Meere im Meso- und Känozoikum (Erdmittelalter und -neuzeit) einen neuen, gewaltigen Aufschwung und schließlich eine viel höhere Biodiversität als je zuvor. Daran hatte das Phytoplankton, die Basis vieler Nahrungsketten, großen Anteil.



Millionen Jahre vor heute 500 400 300 200 100 heute

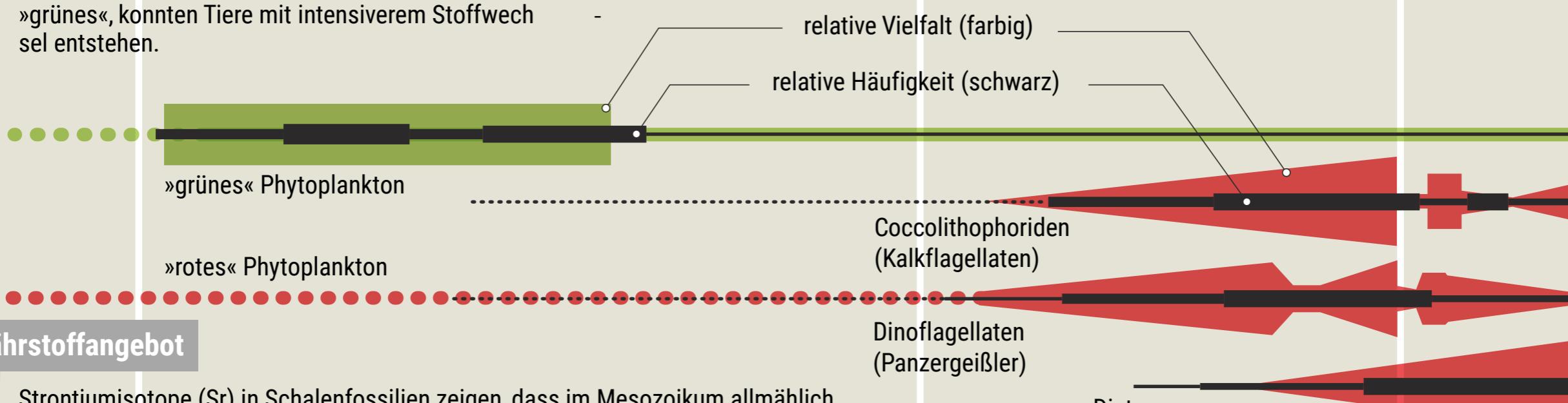
## PALÄOZOIKUM

## MESOZOIKUM

## KÄNOZOIKUM

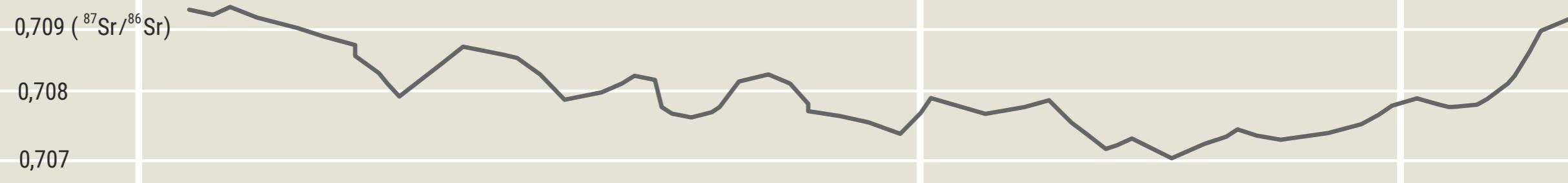
### Diversität des marinen Phytoplanktons

Hingegen passen die Vorkommen »grüner« und »roter« Algenlinien zur erkennbaren Vielfalt tierischen Lebens. Erst mit »rotem« Plankton, das nahrhafter ist als »grünes«, konnten Tiere mit intensivem Stoffwechsel entstehen.



### Nährstoffangebot

Strontiumisotope ( $\text{Sr}$ ) in Schalenfossilien zeigen, dass im Mesozoikum allmählich und weiterhin im Känozoikum vermehrt Nährstoffe durch Erosion vom Land in die Meere gelangten und für die Organismen verfügbar wurden. Auch schon am Anfang des Erdaltertums gab es bedeutende Nährstoffeinträge, die damals, noch unter völlig anderen Voraussetzungen, die Evolution der frühen Tierwelt antrieben.



muten, dass sich damals außerdem die Verfügbarkeit von Makronährstoffen wie etwa Phosphor änderte – Bausteinen, von denen Organismen größere Mengen zur DNA-Synthese und für andere grundlegende biochemische Prozesse benötigen. Augenscheinlich stammten diese Stoffe vom Land. Dort breiteten sich seit dem späten Paläozoikum Wälder aus. Das Klima wurde allmählich feuchter, wodurch auch Verwitterungsprozesse zunahmen. Zudem zersetzen Baumwurzeln den Untergrund physikalisch und chemisch, und aus verrottenden Blättern bildete sich Erdreich. Das alles zusammen trug dazu bei, dass mehr Nährstoffe und Pflanzenreste in flache Gewässer gelangten als vorher – dorthin, wo Plankton besonders gut gedieh. Mit den Blütenpflanzen, die im Erdmittelalter aufkamen, stieg der Eintrag nochmals kräftig, denn ihre Blätter vermöden viel schneller als die von Nadelbäumen oder Palmfarne, aus denen die ersten Wälder bestanden.

Forscher erschließen jene Vorgänge aus dem Verhältnis zweier Strontiumisotope in fossilen ozeanischen Tierschalen. Kontinentales Gestein enthält mehr Strontium-87 als marines. Der Gehalt an Strontium-87 gegenüber Strontium-86 in den Ablagerun-

gen stieg mit der Zeit im Verlauf des Mesozoikums und im Känozoikum. Für einen vermehrten Nährstoffeintrag vom Land in die Meere wegen erhöhter Verwitterung sprechen auch Isotope von Lithium.

Schon 1996 hatte Martin die These aufgestellt, dass die verwitterungsbedingte Ausschwemmung von Nährstoffen die marine Biodiversität des Phytoplanktons und damit der Tierwelt im Meer antreibt. Wenn der wachsende Arten- und Formenreichtum des Planktons – und im Zuge dessen auch der anderer Organismen – in Erdmittelalter und Erdneuzeit tatsächlich wegen dieses steigenden Nährstoffzuflusses zu Stande kam, dann müsste sich der Zusammenhang in entsprechenden Entwicklungsverläufen widerspiegeln. Und wirklich zeichnet sich eine Parallele ab. Neueste Strontiummessungen passen zu einer Kurve der Biodiversität von 2010, die John Alroy von der Macquarie University in Sydney (Australien) erstellte. Eine ähnliche Korrelation ermittelten im selben Jahr Andrés Cárdenas und Peter Harries von der University of South Florida in Tampa.

Allerdings war es wohl nicht nur die Situation im Erdmittelalter – mit einem höheren Sauerstoffgehalt in den Ozeanen,

den Wäldern und Blütenpflanzen –, die dem Plankton neue Bedingungen bereitete. Einige Voraussetzungen für einen höheren Nährstoffeintrag hatten sich bereits vorher angebahnt. Schon vor dem Mesozoikum waren vielerorts Gebirge entstanden, als frühere Kontinente kollidierten und den Superkontinent Pangäa bildeten. Zu jener Zeit sank der Meeresspiegel; Verwitterung und Nährstoffabfluss in Richtung Meer nahmen bereits damals zu. Wegen der kontinentalen Gletscher auf der Südhalbkugel während der meisten Zeit des späten Paläozoikums dürften sich die Wasser der Ozeane immer rascher umgewälzt und zunehmend mit Sauerstoff angereichert haben. Die Auftriebwasser enthielten viel Phosphor von sich zersetzendem organischem Material sowie sauerstoffempfindliche Spurenmetalle. All diese Prozesse schufen bereits günstige Voraussetzungen für »rotes« Plankton: Sie lieferten genau die ihm am besten zuträglichen Mikro- und Makronährstoffe in reichlichen Mengen.

In der ersten Hälfte des Paläozoikums müssen die eher nährstoffarmen »grünen« Mikroalgen die Evolution der Meerestiere stark beschränkt haben – denn augenscheinlich konnten sich Arten mit einem

höheren Stoffwechsel und somit Nährstoffbedarf zu der Zeit noch nicht entwickeln. Als schließlich im Erdmittelalter aber die nahrhafteren »roten« Algen die Oberhand gewannen, erlebte die Tierwelt einen gewaltigen evolutionären Aufschwung. Plötzlich tauchten ganz neue Raubfischgruppen auf, und dazu neuartige Weichtiere, Krebse und Korallen.

## Evolutions- und Zukunftsszenarien

Die Ergebnisse von zwei Feldstudien stützen die postulierten Zusammenhänge. Tron Frede Thingstad und seine Kollegen von der Universität Bergen (Norwegen) leiteten in einem Gebiet im östlichen Mittelmeer Phosphor ins Oberflächenwasser ein. Dort mangelt es generell an Nährstoffen, vor allem aber an Phosphor – Bedingungen, wie Martin sie für die Meere des frühen Erdaltertums annimmt. Das gedüngte Phytoplankton nahm den Phosphor sehr rasch auf, und sogar in wesentlich größeren Mengen, als es zum normalen Wachstum benötigt hätte. Dadurch stieg sein Nährstoffgehalt schon binnen einer guten Woche deutlich an.

In der anderen Studie setzte James Elser von der Arizona State University in

Tempe einem großen Fluss im mexikanischen Bundesstaat Coahuila Phosphor zu. Und zwar düngte er damit so genannte Zyanobakterien (früher Blaualgen genannt). Diese Mikroorganismen betreiben in ähnlicher Weise Fotosynthese wie Pflanzen und ähneln überdies den Zyanobakterien des frühen Paläozoikums. Vor dem Experiment enthielten sie Kohlenstoff und Phosphor im Verhältnis 1100:1; nach der Düngung betrug der Wert 150:1. Die Schnecken, welche die nun wesentlich nahrhafteren Zyanobakterien abgrasten, wuchsen deutlich rascher, bildeten mehr Biomasse und überlebten in größerer Zahl als vorher.

Eine Zunahme der biologischen Vielfalt ließ sich in den vergleichsweise sehr kurzen Zeitspannen beider Studien natürlich nicht feststellen. Jedoch zeigen beide Arbeiten, dass Phytoplankton recht schnell nahrhafter werden kann, wenn ihm mehr Nährstoffe zur Verfügung stehen. Solch ein Vorteil mag damals in der Nahrungskette bald nach oben weitergereicht worden sein. Die Tiere konnten nun mehr Energie in ihre Vermehrung stecken – eine Voraussetzung für evolutionäre Fortentwicklung und steigende Artenvielfalt.

Der Einblick in jene Vorgänge der fernen Vergangenheit erlaubt den Forschern auch, Zukunftsszenarien zu entwerfen. Die heutige Menschheit erzeugt ein Übermaß an Kohlendioxid, welches das Klima wärmer und die Meere saurer macht. In mancher Hinsicht werden in den kommenden Jahrhunderten in den Ozeanen ähnliche Bedingungen herrschen wie im Meso- oder sogar Paläozoikum. Zwar dürften in den Meeres-tiefen dicke, kalkhaltige Schichten von fossilen Coccolithophoriden einen Teil des gelösten Kohlendioxids abfangen und neutralisieren. Doch in den oberen Wasserschichten wird die Versauerung den Kalk bildenden Planktonorganismen das Leben schwer machen, weil ihnen die benötigten Mineralien dann einfach nicht mehr ausreichend zur Verfügung stehen. Mit Umweltveränderungen sind Kalkalgen zwar seit Hunderten von Jahrmillionen fertiggeworden, doch momentan nimmt das Kohlendioxid dermaßen rasant zu, dass zu befürchten steht, diesmal könnten sie sich nicht schnell genug anpassen.

Sollten die Kalkalgen aussterben, würde das die Klimaerwärmung wohl sogar noch verstärken. Blüten von *Emiliania huxleyi*, einer Art der Coccolithophoriden, erstre-

cken sich manchmal über 100 000 Quadratkilometer und mehr. Diese Mikroalgen erzeugen große Mengen Dimethylsulfid, eine Verbindung, aus der Kristallisatonskeime zur Wolkenbildung hervorgehen. Weil Wolken Sonnenstrahlung in den Welt- raum zurückwerfen, kühlen sie die Erde. Somit würde sich das Klima ohne die Coccolithophoriden noch stärker aufheizen.

Kalkalgen von Riffgemeinschaften trüfe der Kohlendioxidanstieg gleich doppelt. Nicht nur würden ihre Kalkskelette unter der Versauerung leiden, es würde für sie auch bald zu warm, denn die Riffarten leben ohnehin meistens nah an der oberen Grenze ihrer Temperaturtoleranz. Überdies schadet dem Phytoplankton heutzutage auch die Bodenerosion, die wegen abgeholtter Wälder und anderer menschlicher Eingriffe stark ansteigt. Wenn die nährstoffreichen Wassermassen in Küsten- ökosysteme gelangen, wachsen die dort ge- deihenden Wasserpflanzen übermäßig und gehen dann massenhaft ein. Oder fremde Arten machen sich breit, verdrän- gen die ansässigen und verwüsten die Riffe. Vor hunderten Millionen von Jahren mag der Nährstoffeintrag in die Ozeane die Lebensvielfalt erweitert haben – aber die

jetzige Anreicherung ist eindeutig zu viel des Guten.

Die wärmeren Meere würden sich außerdem stärker schichten: Warmes Wasser läge dann wie ein Deckel auf kaltem und verhinderte dessen Auftrieb und eine Durchmischung. Unter solchen Bedingungen herrschten an der warmen Oberfläche Dinoflagellaten vor, und mit ihnen nähmen Häufigkeit und Ausmaß giftiger Algenblüten an Küsten zu. Die wiederum würden sich auf Zugvögel, Fischbruten und Schalentiere verheerend auswirken, was auch wir unmittelbar zu spüren bekämen.

Weitere Untersuchungen müssen noch eingehender klären, wie Umweltverände- rungen und Phytoplanktonevolution einst zusammenhingen. Wir möchten vor allem genauer verstehen, inwiefern die Zunahme »roter« Algen die Meerestiervielfalt an- kurbelte. Gern wüssten wir zum Beispiel, wie sich ein niedriger Sauerstoffgehalt wie etwa im Mississippidelta auf die Nährstoff- aufnahme des Phytoplanktons auswirkt und inwiefern dies die Nahrungsketten be- einträchtigt. In Seen haben Forscher be- reits entsprechende Eingriffe vorgenom- men – mit eindrucksvollen Ergebnissen, weil die ökologischen Beziehungen dort

oft leichter überschaubar sind und sich kleine Veränderungen an einer Stelle daher rasch auf das ganze System übertragen.

Mit solchen Studien möchten die For- scher abschätzen, was mit den heutigen Phytoplanktongemeinschaften geschehen wird, wenn sich die äußeren Verhältnisse wandeln, und vor allem auch, wie die da- von abhängige Tierwelt reagieren wird. Das Argument mancher Leugner des Klima- wandels, auch in der Vergangenheit hätten sich die Organismen oft an neue Gegeben- heiten anpassen müssen, greift in der ge- genwärtigen Situation zu kurz. Durch un- ser Verhalten verändern sich die Lebensbe- dingungen in den Meeren in nie da- gewesener Geschwindigkeit. Solch ein Ex- periment hat dieser Planet noch nicht erlebt. Das Ergebnis in all seinen Ausmaßen werden wir leider erst danach kennen. ↗

(Spektrum der Wissenschaft, Januar 2014)

Falkowski, P. G. et al.: The Evolution of Modern Eukaryotic Phytoplankton. In: Science 305, S. 354 – 360, 2004

Martin, R., Quigg, A.: Evolving Phytoplankton Stoichiometry Fueled Diversification of the Marine Biosphere. In: Geo- sciences 2, S. 130 – 146, 2012



EVOLUTION

EVOLUTION

# Erste Landpflanzen früher als gedacht?

von Jan Osterkamp

In den ersten vier Milliarden Jahren war jeder trockene Fleck Boden der Erde wüst und leer. Dann begannen Pflanzen ihn zu besiedeln: früher als gedacht, und mit Konsequenzen.

Das Leben auf der Erde war schon alt, bis es allmählich vielzellige, größere Formen annahm. Noch länger dauerte es dann, bis sich die Nachkommen eines Urahnen aller Pflanzen aus dem Meer heraustrauten und den bis dahin höchstens von Mikroben bewohnten festen Erdboden besiedelten: Vermutlich geschah das vor 420 Millionen Jahren, meinten Forscher bislang. Womit sie allerdings falschlagen, behauptet Philip Donoghue von der University of Bristol: Tatsächlich waren Pflanzen schon deutlich früher an Land – und hatten dann gleich damit begonnen, den Grundstein für die weitere Evolution des Lebens auf der Erde zu legen.

Paläobotaniker tun sich traditionell schwer damit, den Landgang der ersten Pflanze exakt zu datieren – vor allem deswegen, weil die weichen Gewebe der bota-

nischen Pioniere keine fossilen Spuren hinterlassen haben. Sie produzierten zum Beispiel keine festen, ligninhaltigen Teile wie spätere Nachkommen. Die bislang ältesten Überreste von Landpflanzen hatten Forscher vor Jahren in Argentinien entdeckt: Mehr als 470 Millionen Jahre alte so genannte Cryptosporen von mindestens fünf Gattungen von Lebermoos-Urahnen zeigten, dass zu dieser Zeit schon ein vielfältiges Pflanzenleben existiert hatte. Wann aber begann es, sich zu entwickeln?

Donoghues Team nahm sich der Frage mit Computerpower an: Die Wissenschaftler trugen rund 100 Gensequenzen der unterschiedlichsten heute lebenden Algen und Pflanzen zusammen und analysierten durch Quervergleiche exakter als zuvor die Ganggeschwindigkeit der molekularen Uhr des Pflanzenreichs – also die Geschwindigkeit, mit der sich das Erbgut im Lauf der Evolution verändert hat. Mit diesem Wert

rechneten sie dann zurück, wann der älteste gemeinsame Vorfahre aller Landpflanzen gelebt hat. Zudem erlaubte ihnen der Fortschritt der Computerleistungsfähigkeit auch, ihre Analysen mit allen denkbaren Verwandtschaftsbeziehungen der unterschiedlichen Pflanzengroßgruppen durchzuspielen und so das plausibelste Ergebnis zu erhalten.

Am Ende ergab die in »PNAS« veröffentlichte Analyse, dass die ersten Pflanzen wohl schon im Kambrium vor rund 500 Millionen Jahren an Land gegangen waren, also knapp 100 Millionen Jahre früher als zuvor vorsichtig angenommen. Wahrscheinlich handelte es sich bei ihnen wirklich eher um Vorläufer der Lebermoose. Erst danach, im Ordovizium, spalteten sich dann andere Moosvarianten von der gemeinsamen Entwicklungslinie ab, die später einmal auch alle Farne, Bäume und Blumen hervorbringen sollte. Spätestens

mit Beginn des Silurs hatte sich schon die moderne Linie der Gefäßpflanzen differenziert.

Der frühe Landgang der Pflanzen dürfte, wenn er sich bestätigt, Konsequenzen auf andere Forschungszweige neben der Botanik haben. Denn schon die ersten Pflanzen an Land begannen auch die terrestrische Atmosphäre des Planeten zu verwandeln: Sie entzogen ihr Kohlendioxid für ihre Fotosynthese und schwächten den Effekt des Treibhausgases ab, wodurch die Erde kühler wurde. Zudem veränderten die Pflanzen das Grundgestein, auf dem sie wuchsen, was vielfältige biogeophysikalische Effekte nach sich zog. Verwittertes Gestein an Land und ins Meer gespülte Sedimente verringerten die Kohlendioxidkonzentration weiter. Dieser Prozess setzte aber deutlich früher ein als bisher gedacht, wenn die Analysen der evolutionären Uhr von Donoghue und Co stimmen – und er braucht eine längere Anlaufzeit als vermutet, weil der tatsächliche Einbruch der Kohlendioxidkonzentration in der Atmosphäre und die Abkühlung erst später nachweisbar sind. ↗



# ENTSTEHUNG DES LEBENS

## SCHWIERIGE SPURENSUCHE

Heiße Quellen | Erste Einzeller an Land?  
Fossilien | Streit um die ältesten Lebensformen  
Tiefsee | Das Archiv des Meeres

FÜR NUR  
€ 4,99

HIER DOWNLOADEN



PFLANZENPHYSIOLOGIE

# GRÜNE WASSERWAAGE

von Frank Schubert

Dank ihrer Fähigkeit, die Schwerkraft wahrzunehmen, wachsen Pflanzen exakt senkrecht nach oben.  
Aber warum funktioniert das so präzise?

Pflanzen wachsen nach oben, das weiß jedes Kind. Doch woher »wissen« sie, wo oben und unten ist? Das ist nicht so einfach, wie es scheint: Würden neue Triebe zum Beispiel einfach immer im rechten Winkel aus der Erde sprießen, würden sie an Abhängen irgendwann unter ihrem eigenen Gewicht umknicken.

Die Evolution hat einen Mechanismus hervorgebracht, der das verhindert. Die Pflanzen registrieren die Richtung der lokalen Schwerkraft und steuern ihr Wachstum entsprechend, eine Fähigkeit, die man als Gravitropismus bezeichnet. Dadurch sprießen die Pflanzenorgane entweder senkrecht nach unten (»positiv gravitrop«, etwa bei Hauptwurzeln) oder senkrecht nach oben (»negativ gravitrop« wie bei Sprossachsen) oder auch horizontal zur Seite wie bei Seitenwurzeln.

Hierbei helfen der Pflanze spezialisierte Zellen, die in den Spitzen der Wurzeln und Sprossen sowie in den Streckungszonen der Sprossachsen sitzen. Diese Statozyten enthalten einige Dutzend nur wenige Mikrometer (millionstel Meter) kleine Körnchen namens Statolithen, die hauptsächlich aus Stärke bestehen. Auf Grund ihres Gewichts sinken die Statolithen im Zellplasma nach unten und sammeln sich an der tiefsten Stelle. Die Pflanze registriert das über noch unbekannte Rezeptoren und regelt damit die Verteilung von Wachstumsfaktoren im Pflanzengewebe.

Dieser Gleichgewichtssinn ist jedoch viel sensibler, als man es dem simplen Mechanismus zutrauen würde. »Oberirdische Pflanzenorgane reagieren selbst auf die schwächste Verkipfung«, betont Yoël Forterre vom Institut Universitaire des Systèmes Thermiques Industriels in Marseille,

»es gibt keinerlei Schwellenwert des Neigungswinkels.« Seiner Ansicht nach wäre diese hohe Empfindlichkeit kaum erklärbar, wenn sich die Statolithen schlicht wie suspendierte Partikel verhalten würden – etwa wie Sand in Wasser. Denn dann würden die Körnchen aneinanderreiben und sich, wenn sie in der Zelle aufeinanderliegen, gegenseitig festklemmen. Auf diese Weise stabilisiert, könnten sie auf kleine Kippwinkel nicht reagieren. Erst bei großen Neigungswinkeln würden sie hinreichend stark hangabwärts drängen, um ins Rutschen zu kommen und so ihre Position in der Zelle zu verändern.

Um dieses scheinbare Paradox zu lösen, untersuchten Forterre und sein Team die schwerkraftwahrnehmenden Zellen aus den Spitzen von Weizenkeimlingen. Bei ihren in »PNAS« veröffentlichten Experimenten erlebten sie nun eine Überraschung:

Als sie mit einer Bildverarbeitungssoftware die Mikroskopaufnahmen auswerteten, stellten sie fest, dass sich die Oberfläche des Statolithen-Haufens am Boden der Zelle stets waagerecht ausrichtet – eher wie eine Flüssigkeit als ein Haufen Körner.

Stark vergrößernde Videoaufnahmen zeigten, dass die Statolithen nicht einfach passiv in der Zelle herumliegen, sondern immer wieder emporgehoben oder -gestoßen werden. Dadurch bleiben sie in ständiger Bewegung – wie Kiesel in einem Karton, den man unablässig schüttelt. Dieser Mechanismus stelle sicher, dass sich das Statolithen-Ensemble ähnlich wie eine Flüssigkeit verhalte, daher auch auf sehr kleine Neigungswinkel reagiere und der Pflanze somit erlaube, selbst schwach ausgeprägte Schiekhaltungen wahrzunehmen, so die Hypothese der Wissenschaftler.

Um das Verhalten nachzustellen und so die Vermutung zu testen, experimentierten Forterre und sein Team mit wassergefüllten Gefäßen, die in etwa die Größe von Statozyten besaßen. Dort hinein gaben die Forscher Partikel aus Siliziumdioxid mit 2 bis 4,4 Mikrometer Durchmesser als Statolithen-Attrappen. Die Teilchen sind klein genug, um von den Wassermolekülen her-

umgestoßen zu werden, so dass sie stets in einer gewissen Unruhe begriffen sind.

Diese brownsche Bewegung scheint aber nur ein Teil der Erklärung zu sein: Auch die künstlichen Körnchen hätten kollektiv ein flüssigkeitsähnliches Verhalten an den Tag gelegt, berichten die Wissenschaftler. Allerdings zeige der Vergleich zwischen den Siliziumdioxidpartikeln und den Statolithen, dass Letztere in der Pflanzenzelle wesentlich stärkere Bewegungen vollführen, als allein mit der brownschen Bewegung erklärbar ist. Es müsse daher einen intrazellulären Mechanismus geben, der die Statolithen immer wieder nach oben befördere. Vermutlich habe er mit dem Zytoskelett zu tun, genauer mit dem intrazellulären Aktin-Myosin-Netzwerk. Darauf deuteten auch frühere Experimente hin, in denen die Funktion des Aktins gehemmt wurde – woraufhin sich die Statolithen weniger stark bewegten.

Die Wissenschaftler um Forterre wollen jedoch nicht nur die Pflanzenforschung voranbringen, sie sehen in ihren Erkenntnissen auch neue Impulse für die Technik. Mit Partikelsuspensionen, die der brownschen Bewegung unterliegen, könne man neue Neigungsmesser im Miniaturformat



## »Oberirdische Pflanzenorgane reagieren auf die schwächste Verkipfung«

[Yoël Forterre]

entwickeln. Diese Apparate wären nicht durch Grenzflächenspannungseffekte wie bei Wasserwaagen beeinträchtigt und könnten kompakter konstruiert werden als derzeit übliche Geräte mit Pendelkörpern oder Beschleunigungssensoren.

Nicht alle Fachleute teilen die Begeisterung für Forteres Arbeit. Statolithen mit einer Art Flüssigkeit zu vergleichen, sei weit hergeholt, sagt der Gravitationsbiologe Markus Braun, der am Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt Forschung unter Weltraumbedingungen betreibt. Anderes sei bereits länger bekannt: »Es wurde schon mehrfach postuliert, dass die Wechselwirkung des Aktin-Myosin-Netzwerks mit den Statolithen eine leichte Triggerbewegung erzeugt, die die Empfindlichkeit der Schwerkraftwahrnehmung positiv beeinflusst.« Dieser Effekt spielt seiner Einschätzung nach jedoch nur eine untergeordnete Rolle. »Das Netzwerk fungiert als eine Art Dämpfungssystem, damit die Statolithen nicht zu rasch nach unten sinken«, erklärt der Gravitationsbiologe. »So wird verhindert, dass die Pflanze überzogen schnell auf Bewegungen reagiert.« ↗

# TOD VOR DER HAUSTÜR

## Bedrohte Natur in Europa

Insektensterben | Mangelware verlässliche Daten  
Laubbläser und Co | Gärten des Grauens  
Vogelsterben | Es ist etwas faul im ländlichen Raum

HIER DOWNLOADEN

FÜR NUR  
€ 4,99



WOOD WIDE WEB

# Die vernetzte Welt der Pflanzen

von Janosch Deeg

Der Großteil der Landpflanzen ist unterirdisch über hauchdünne Pilzfäden mit benachbarten Pflanzen verknüpft. In diesem Netzwerk findet ein reger Handel mit Nährstoffen statt. Forschungsergebnisse deuten darauf hin, dass Pflanzen mittels des Pilzgeflechts auch kommunizieren – und einzelne Wissenschaftler ziehen bereits Parallelen zu neuronalen Netzwerken.

**H**örst du, wie die Bäume flüstern? Insbesondere der Wald befähigt die Fantasie von Märchenerzählern. Die Realität ist von ihren Geschichten allerdings weit entfernt. Oder doch nicht? Zumindest finden Wissenschaftler immer mehr Beweise dafür, dass Bäume – und Pflanzen im Allgemeinen – in einem ständigen Austausch miteinander stehen. Manche Pflanzen warnen sich etwa gegenseitig mit Duftstoffen vor Schädlingen, andere senden Botenstoffe über die Wurzeln aus, und fast alle tauschen Nährstoffe über ein riesiges, unterirdisches Pilzgeflecht. Speziell im Wald hat sich für dieses Netzwerk, das aus hauchdünnen Pilzfäden besteht, bereits der Name »Wood Wide Web« etabliert. Die Ausmaße sind beeindruckend: Ein einziger Pilz kann sich über eine Fläche von mehreren hundert Quad-

ratmetern ausbreiten und zahlreiche Bäume und andere Pflanzen miteinander verknüpfen. In einem Hektar Waldboden befinden sich bis zu sechs Tonnen Pilzfäden, die es zusammen auf eine unglaubliche Länge von mehr als 100 Milliarden Metern bringen können. Unter einem Quadratzentimeter liegen also Fäden, die aufsummiert mehr als 1000 Meter lang sind. Von diesem gigantischen Pilzgeflecht bekommt ein Spaziergänger im Wald in der Regel jedoch nur die oberirdischen Fruchtkörper zu Gesicht – jene vertrauten Teile, die mitunter auch zum Verzehr geeignet sind.

Die feinen Fäden der Pilze, die Hyphen, weben sich in die Spitzen der Pflanzenwurzeln ein und schließen sich zu einer so genannten Mykorrhiza zusammen. Das Wort ist ebenfalls ein Zusammenschluss, nämlich aus den beiden griechischen Wörtern für Pilz (*mykes*) und Wurzel (*rhíza*). Bei My-

korrhiza handelt es sich in der Regel um einen so genannten Mutualismus – eine spezielle Form zwischenartlicher Kooperation, von der beide Partner profitieren, bei der sie aber doch weitgehend getrennt voneinander leben. Im Fall der Mykorrhiza tauschen die beiden Nährstoffe aus: Die Pilze erhalten leicht verwertbaren Zucker, den die Pflanzen mittels Fotosynthese produzieren. Darauf sind die Pilze angewiesen, weil sie nicht die nötigen Enzyme mitbringen, um komplexe Kohlenhydratspeicher-moleküle abzubauen. Die Pflanzen bekommen im Gegenzug Phosphor und Stickstoff geliefert, die die Pilze effektiv aus dem Boden holen können. Zudem schützt der Pilz die empfindliche Wurzelspitze etwa vor Schädlingen: So wird der Zusammenschluss zur Win-win-Situation. Mykorrhiza ist seit vielen Jahrzehnten bekannt – und weit verbreitet: Forscher schätzen, dass bis

zu 90 Prozent aller Landpflanzen in Symbiose mit solchen Pilzen leben, zumindest aber die Voraussetzungen dafür erfüllen. Das Eingehen dieser Partnerschaft hängt dann letztlich auch von der Situation ab: Pflanzen in ungünstigen Umweltbedingungen streben eher nach Kooperation als solche, die gut versorgt sind.

### Für schlechte Zeiten vorsorgen

Genaueres über den Zusammenhang von Kooperation und Umweltbedingungen hat die Botanikerin Rodica Pena von der Georg-August-Universität Göttingen erforscht: Gemeinsam mit ihren Kollegen konnte sie zeigen, dass Pflanzenwurzeln unter normalen Umständen Stickstoff auch ohne Mykorrhizapilze genauso gut aufnehmen wie in Symbiose. Herrscht jedoch Wassermangel, so helfen die Pilze den Wurzeln, den Stickstoff besonders effizient weiterzuleiten. Und bekommt die Pflanze kaum Licht ab, unterstützen die Pilze sie dabei, die Zuckerversorgung aufrechtzuerhalten. Demnach sichert sich die Pflanze gewissermaßen in guten Zeiten ab, indem sie die Pilze aushält, ohne dafür etwas zu verlangen. In schlechten Zeiten zahlt sich das dann aus.

Die Wissenschaftler konnten zudem demonstrieren, dass in diesem System nicht nur eine einzige Pilzart eine Rolle spielt: »Früher hat man oft alle Pilze in einen Topf geworfen. Wir konnten zeigen, dass unterschiedliche Pilzarten unterschiedliche Beiträge leisten«, erzählt Pena. Dazu kultivierten die Forscher ihre Versuchspflanzen jeweils mit anderen Pilzarten und entdeckten signifikante Unterschiede in der Funktion und Effizienz. Deshalb könnte laut Pena nur eine hohe Pilzdiversität die Nährstoffversorgung auch unter schwankenden Umweltbedingungen sichern. Die Forscherin gibt jedoch zu bedenken, dass man schlichtweg noch nicht genug über die Symbiose wisse. Zum Beispiel spielt in dieser Partnerschaft noch ein dritter Akteur mit: Bakterien. »Offenbar sind bestimmte Bakterienkulturen assoziiert mit bestimmten Pilzarten«, so Pena. Die unterschiedlichen Funktionen der Pilze könnten also direkt mit Bakterien zusammenhängen – zumindest, da ist sich Pena ziemlich sicher, übernehmen sie eine wichtige Rolle.

### Fürsorgliche Bäume

Aber nicht nur Pilze und Pflanzen interagieren intensiv, sondern auch benachbar-

te Pflanzen. Eine Forschergruppe um Suzanne Simard, Professorin für Waldökologie an der University of British Columbia, hat bereits vor der Jahrtausendwende gezeigt, dass große, alte Bäume, so genannte Mutterbäume, die jungen Schösslinge über das Pilznetzwerk mit Kohlenstoff versorgen. Interessanterweise fand dieses Verhalten sogar zwischen unterschiedlichen Baumarten statt. In weiteren Studien konnten Simard und Kollegen zeigen, dass diese Versorgungsstrategie der jungen Bäume für ihre Entwicklung und ihr Überleben elementar ist.

Das Geben und Nehmen beschränkt sich nicht allein auf Kohlenstoff, wie man heute weiß: Viele weitere Nährstoffe sowie Wasser werden von unterschiedlichen Pflanzen geliefert oder eingetauscht. So können etwa Klee und andere Leguminosen Stickstoff an das Mykorrhiza-Netz abgeben, während Sträucher und Bäume Wasser beitragen, an das sie mit ihren langen Wurzeln besser herankommen als kleinere Pflanzen. Wieder andere steuern zum Beispiel Phosphor oder Zuckerbindungen bei. Und in der Regel bekommt jeder für seinen Beitrag etwas zurück – das, was er eben braucht oder an was er nur schwer he-

rankommt. Es herrscht also ein geschäftiges Treiben auf dem Basar der Pflanzen.

Was Forscher dabei auf diesem Marktplatz beobachteten, erinnert sie an ein »soziales Verhalten«. Bäume, die gerade viele Nährstoffe haben, geben diese etwa an kranke Bäume weiter, oder sterbende Bäume spenden Nährstoffe an umliegende Artgenossen. Andere Pflanzen profitieren wiederum von bestimmten Nachbarn, wie der Botanikprofessor Andreas Wiemken von der Universität Basel zusammen mit Kollegen entdeckte: Flachspflanzen etwa geraten mehr als doppelt so groß, wenn sie neben Hirsepflanzen wachsen und mit diesen durch Mykorrhizapilze unterirdisch verbunden sind. Kurz: »Die Hirse füttert den Flachs«, wie Wiemken im Buch »Mozart und die List der Hirse« zitiert wird.

## **Giftanschläge unter Pflanzen**

So betrachtet lässt sich die Welt der Pflanzen leicht als harmonischer Ort idealisieren, in dem Organismen sich stets gegenseitig unterstützen. Der Molekularbiologe und Botaniker František Baluška von der Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn weist jedoch darauf hin, dass unter Pflanzen mitnichten immer alles fried-

lich abläuft: Es wird ausgebeutet, betrogen und sogar getötet; ein Kampf um Ressourcen, vor allem um limitierte. In diesem Kampf kann auch das Mykorrhiza-Netzwerk zur Waffe werden: Baluška nennt als Beispiel giftige Moleküle, die Pflanzen über die Pilzfäden an andere Pflanzen senden, um deren Wachstum zu bremsen. Wenn Stickstoff Mangelware ist, beginnt die Kooperation zwischen Pilzen und Pflanzen rasch zu bröckeln – falls denn beide Seiten vorher überhaupt profitiert haben. Denn tatsächlich beginnen manche Pilze oder Pflanzen eine »Partnerschaft« von vornherein nur, um sie auszunutzen: Die Beziehungen decken von Mutualismus bis hin zu explizitem Parasitismus die ganze Bandbreite der Möglichkeiten ab.

Auch die Biologin Pena betont, das Verhalten der Pflanzen sei nicht »weiß oder schwarz«, es könne beides sein. Und für Baluška zeigt genau diese Vielschichtigkeit, dass Pflanzen in gewisser Weise »soziale Lebewesen« sind. Ihm zufolge habe man schlichtweg lange ihre Fähigkeiten unterschätzt und tue das noch immer. Mittlerweile verdichten sich beispielsweise die Hinweise darauf, dass Pflanzen über das Pilznetzwerk auch Informationen austau-

schen. Bisher dachte man, es gebe lediglich ein eher unspezifisches Senden von Informationen in dem Sinne, dass Pflanzen Duftstoffe in die Luft entlassen oder bestimmte Signalmoleküle in den Boden absondern, die dann andere Pflanze eher durch Zufall detektieren. Mittels der Pilzfäden wäre jedoch die Weitergabe der Informationen zielgerichtet, effizienter und könnte in beide Richtungen geschehen. Und tatsächlich fanden Forscher bereits heraus, dass von Blattläusen befallene Ackerbohnen offenbar ihre Nachbarn über das Pilznetzwerk informieren. Gleicher beobachteten die Wissenschaftler bei schädlichem Pilzbefall der Blätter. Ähnlich wie mit Duftmolekülen werden so umstehende Pflanzen vor einer drohenden Gefahr gewarnt.

Ein vergleichbares Verhalten zeigen Tomaten, die vom Mehltauwurm attackiert werden, wie chinesische Wissenschaftler zeigen konnten. Die Ergebnisse deuteten darauf hin, dass über das Pilznetzwerk eine Kommunikation stattfinde, schreiben sie in ihrer Veröffentlichung. Bewiesen ist das noch nicht: Um das wirklich sicherzustellen, müsse ausgeschlossen werden, dass die warnenden Botenstoffe nicht in die Erde abgegeben werden, um von den Pil-

zen daraus aufgenommen zu werden, gibt die Botanikerin Pena zu bedenken.

### Ein Gehirn in den Wurzeln?

Die Biologin Simard geht hier einige Schritte weiter. Im Buch »Memory and Learning in Plants« schreibt sie: »Diese Verhaltensweisen der Bäume haben kognitive Qualitäten und umfassen Fähigkeiten wie Wahrnehmung, Lernen und Gedächtnis (...)« Sie ist gar der Meinung, dass die Topologie von Mykorrhiza-Netzwerken denen neuronaler Netzwerke ähnelt. Mehr noch: Es gebe bestimmte Muster und Eigenschaften in diesen Strukturen, die auch für Intelligenz wichtig sind. Man erkenne zunehmend an, schreibt die Forscherin sinngemäß, dass Pflanzen Entscheidungen treffen und Handlungen ausführen und so Eigenschaften von Intelligenz aufweisen, wie es normalerweise nur Menschen oder vielleicht Tieren zugeschrieben wird.

Dass eine solche Sichtweise nicht abwegig ist, glaubt auch Baluška. Der Molekularbiologe erforscht die Wurzelspitzen von Pflanzen. Für ihn ist das der essenzielle Teil in diesem gesamten unterirdischen Netzwerk. Bereits Ende des 19. Jahrhunderts hat Charles Darwin vorgeschlagen, dass die

Wurzelspitze wie ein Gehirn eines niederen Lebewesens funktioniere. Und tatsächlich konnte Baluška gemeinsam mit Kollegen zeigen, dass sich in den Wurzeln eine neuronale Zone befindet, die ähnlich wie auch die Nervenzellen im Gehirn Signale verarbeitet und weiterleitet: die Wurzelspitzenzellen kommunizieren – wie ein neuronales Netzwerk von Tier und Mensch – über eine Art Aktionspotenzial miteinander. Manche Neurone oszillieren auf eine Art und Weise, wie man es auch im Gehirn des Menschen beobachtet hat.

Insgesamt sei das Prinzip der Funktionsweise natürlich trotzdem anders, betont Baluška – was unter anderem mit den Anforderungen zusammenhängt, denen die Wurzeln gerecht werden müssen: Ihre »offensichtliche Aufgabe ist es, Wasser und Nährstoffe zu finden«, sagt der Biologe. Zu diesem Zweck messen bestimmte Zellen in der Wurzelspitze ständig mindestens 20 verschiedene Parameter in der Umgebung, darunter Feuchtigkeit, Lichtstärke oder Sauerstoffgehalt. Und diese große Menge an sensorischen Informationen der Wurzelkappe müsse zum einen verarbeitet und gespeichert werden, damit die Pflanze reagieren kann, also zum Beispiel in eine ge-

eignete Richtung wachsen. Daneben deute jedoch vieles darauf hin, so Baluška, dass die Wurzelspitze, insbesondere die neuronale Zone, für die zielführende Invasion der Pilze wichtig ist. Auch für die anschließende Wechselwirkung und Interaktion mit den Pilzen seien vermutlich diese Strukturen ausschlaggebend.

Baluška reichen die Erkenntnisse der letzten 20 Jahren, um mit gutem Grund sagen zu können, dass die Wurzelspitzen eine Struktur beheimaten, die einem Gehirn zumindest in manchen Punkten ähnelt und es den Pflanzen ermöglicht, aktiv zu agieren. Innerhalb der Wissenschaftsgemeinde stoßen solche Gedanken größtenteils noch auf Ablehnung. Baluška bedauert diesen Umstand. Das Wurzel-Pilz-Netzwerk würden die meisten weiterhin in erster Linie bezüglich des Austauschs von Nährstoffen erforschen. An seiner Meinung ändert das nichts: Der Molekularbiologe ist sich sicher, dass die Pflanzen darüber auch Informationen weitergeben. Bäume sprechen vielleicht nicht wie im Märchen – sie kommunizieren aber womöglich tiefgründiger, als wir zu wissen glaubten. ↗

(Spektrum – Die Woche, 45/2018)

ÖKOLOGIE

# CHEMISCHER HILFERUF DER BLÜTEN

von Annette Hille-Rehfeld

Der Feind meines Feindes ist mein Freund. Dreiecksbeziehungen dieser Art sind in der Natur keine Seltenheit. So locken Blüten, die von Raupenfraß bedroht sind, mit ihrem Duft Krabbensspinnen als Kammerjäger an – und nehmen dabei in Kauf, dass diese auch Nützlinge wie Bienen erbeuten oder vertreiben. Dank der Überzahl der Blütenbestäuber überwiegt dennoch der Vorteil.



**M**it ihrem glatten, häufig leuchtend bunt gefärbten Körper entsprechen KrabbenSpinnen kaum dem verbreiteten Klischee vom abstoßenden, düster behaarten Getier. An das Leben auf Blüten bestens angepasst, entgehen sie trotz ihrer Schönheit leicht dem Auge des Betrachters, liegen sie doch meist reglos und farblich gut getarnt auf der Lauer. Sie erbeuten anfliegende Insekten durch blitzschnelle Überraschungsangriffe – KrabbenSpinnen bauen keine Fangnetze, auch wenn sie mit weltweit mehr als 2000 Arten eine der größten Familien der Webspinnen darstellen. An die namensgebenden Krabben erinnert ihr Jagdverhalten ebenso wie ihre ersten beiden, auffällig langen Beinpaare.

Da dem Appetit der Spinnen Blütenbestäuber zum Opfer fallen, galten sie bislang als ungebetene Gäste, die den Fortpflanzungserfolg der Pflanze mindern. Gelegentlich stehen jedoch auch Blätter oder Blüten fressende Insekten auf ihrem Speisezettel, was die Arbeitsgruppe um Florian Schiestl von der Universität Zürich zu einer Kosten-Nutzen-Rechnung veranlasste. Eine auf steinigen Wiesen und Geröllfel-

ANINA C. KNAUER, UNIVERSITÄT ZÜRICH (UZH)



**KRABBENSPINNE  
ATTACKIERT BIENE  
UND RAUPE**  
**KrabbenSpinnen warten in Blütenständen auf Beute. Sie stürzen sich auf bestäubende Insekten wie Bienen (oben), aber auch Fraßschädlinge wie Schmetterlingsraupen fallen ihnen zum Opfer (unten).**

dern der Alpen weit verbreitete Pflanze, das Glattfrüchtige Brillenschötchen (*Biscutella laevigata*), erwies sich dafür als ideales Untersuchungsobjekt, da es nur in tiefen Regionen von der Krabbenspinne *Thomisus onustus* aufgesucht wird. In höheren Lagen, wo die Spinnenart nicht vorkommt, liefert die Natur dem Beobachter eine unbesiedelte Kontrollpopulation.

Angelockt werden Krabbenspinnen wie auch Insekten vom Blütenduft. Als besonders attraktiv erwies sich  $\beta$ -Ocimen, ein bei Pflanzen häufig vorkommender Duftstoff aus der Gruppe der Terpene. Das zeigten Laborexperimente der Schweizer Forscher, in denen die Spinnen ihr Ziel anhand einzelner Substanzen aus dem Blütenduftcocktail auswählten. Dazu passend residierten die Krabbenspinnen im Freiland vor allem auf denjenigen Pflanzen, die sehr viel  $\beta$ -Ocimen produzierten, hier im Schnitt auf jedem dritten Blütenstand. Auch Bienen werden von diesem Duftstoff angezogen, wobei jedoch ihre Vorliebe anderen Blütenduftkomponenten wie Aromaten gilt. Hielt eine Krabbenspinne den Blütenstand besetzt, besuchten die Bestäuber trotz des verlockenden Dufts seine Blüten seltener. Die Tarnung der Krabbenspinnen

erwies sich somit als nicht perfekt. Das Ausbleiben der Bestäuber könnte daher den Samenansatz und damit die Vermehrung der Pflanzen beeinträchtigen, selbst wenn in unberührter Natur die Mannschaft der Bestäuber – Honig- und Wildbienen, Hummeln sowie zahlreiche andere Insekten – durch den Jagdeifer der Krabbenspinnen kaum merklich abnimmt.

Doch die Bilanz wäre unvollständig ohne die florivoren, also Blüten fressenden Schädlinge, die im Bergland auf fast jeder zweiten Pflanze zu finden sind und mit den Blüten auch die Samenanlagen verzehren. Deshalb setzten die Forscher als Dritte im Bund Raupen der Kohlschabe (*Plutella xylostella*) auf die Blütenstände. Die Krabbenspinnen nahmen sie bereitwillig als Futter an; neun von zehn der während des Experiments erbeuteten Tiere waren solche Raupen. Dadurch halbierte sich nicht nur die Raupenzahl auf den Blüten, sondern auch das Ausmaß der Fraßschäden. Somit steigt bei gleichzeitiger Anwesenheit von florivoren Schädlingen der Fortpflanzungserfolg der mit Krabbenspinnen vergesellshafsten Pflanzen – und die Waagschale dieser ambivalenten Wechselwirkung neigt sich zum Nutzen für das Brillenschötchen.

Da sich Pflanzen nicht fortbewegen und Fraßschädlingen nicht ausweichen können, haben sie ihre eigenen Strategien entwickelt, aktiv auf den Schädlingsbefall zu reagieren: Indem *B. laevigata* verstärkt  $\beta$ -Ocimen-haltigen Duft bildet, steigert es seine Attraktivität für die Krabbenspinnen. Wie die Forscher herausfanden, fiel dieser »Hilferuf« bei den Brillenschötchen in niedrigen Lagen etwa doppelt so stark aus wie in den höheren Bergregionen der Schweizer und italienischen Alpen, wo die Krabbenspinne fehlt, also durch  $\beta$ -Ocimen nicht bei Bedarf kurzfristig angelockt werden kann. Diese unterschiedliche Reaktion der beiden Populationen ein und derselben Pflanzenart werten die Wissenschaftler als lokale Anpassung an das Vorkommen der Spinnen – ein Beispiel für Mikroevolution.

## Meister der Tarnung und Täuschung

Der Lockstoff  $\beta$ -Ocimen ist für Botaniker kein unbeschriebenes Blatt. Bei der Mehrzahl der Pflanzenfamilien gehört die Substanz zusammen mit Benzaldehyd, Limonen und Linalool zu den dominierenden Komponenten des Blütendufts. Verletzte Blätter können bei Schädlingsbefall eben-

falls den Stoff aussenden, um räuberische Insekten zu den Pflanzen zu locken. Und manche Schädlinge meiden bei der Eiablage  $\beta$ -Ocimen verströmende Pflanzen. Demnach verfügen solche Arten mit  $\beta$ -Ocimen über einen vielseitig einsetzbaren Signalstoff, der bei Bestäubern, Schädlingen und Räubern jeweils unterschiedliche Reaktionen auslöst.

In diesem Zusammenhang interessieren sich Biologen auch für die Frage, ob und wie Insekten die für das menschliche Auge verblüffend gut getarnten Krabbenspinnen wahrnehmen können. Dabei kommt unter anderem zum Tragen, dass Bienen das für den Menschen nicht sichtbare UV-Licht registrieren. Indem der Körper mancher Krabbenspinnen genau jenen Anteil des Sonnenlichts reflektiert, imitieren sie die so genannten Saftmale der Blüten. Diese kontrastreichen, leuchtend gelb gefärbten oder das UV-Licht reflektierenden Zeichnungen auf der Blüte weisen bestäubenden Insekten den Weg zur Futterquelle. So gelingt es einer australischen Verwandten der alpinen Krabbenspinne, *Thomisus spectabilis*, durch ihr UV-Signal die Attraktivität von Chrysanthemen-Blüten für Insekten zu steigern. Krabbenspin-

nen sind demnach nicht nur Meister der Tarnung, sondern können auch Köder auslegen, die ihre Beute täuschen und in die Falle locken. ↵

(Spektrum der Wissenschaft, Juli 2018)

Farré-Armengol, G. et al.:  $\beta$ -Ocimene, a Key Floral and Foliar Volatile Involved in Multiple Interactions between Plants and Other Organisms. In: Molecules 22, 1148, 2017

Heiling, A. M. et al: Pollinator Attraction: Crab-Spiders Manipulate Flower Signals. In: Nature 421, S. 334, 2003

Knauer, A. C. et al: Crab Spiders Impact Floral-Signal Evolution Indirectly through Removal of Florivores. In: Nature Communications 9, 1367, 2018

# SPEKTRUM KOMPAKT APP



Lesen Sie Spektrum KOMPAKT optimiert für Smartphone und Tablet in unserer neuen App! Die ausgewählten Ausgaben erwerben Sie direkt im App Store oder Play Store.



FIESER PFLANZENSCHUTZ

# Wie man Raupen dazu anstiftet, **SICH SELBST ZU FRESSEN**

von Jan Osterkamp



## Von wegen hilflos ausgeliefert: Harmlose Pflanzen können hungrige Raupen in den Kannibalismus treiben. Am Ende fressen die Schädlinge sich gegenseitig.

Wenn Massen nimmersattter Raupen über ein schutzloses Feld herfallen, ist das für Freunde von Grünpflanzen am Ende kein schöner Anblick: Die Schädlinge sind vollgefressen, und sämtliches Blattwerk ist weg. Gegen dieses Schicksal hat die Botanik allerdings Pfeile im Köcher, so etwa allerlei Gifte, mit denen sie sich selbst ungenießbar macht. Und dies sogar gegen wirklich hungrige Feinde, wie Forscher in »Nature Ecology & Evolution« schildern: Würden Pflanzen ihre Giftwaffe ausreizen, dann würde den verhungerten Insekten ein blutiges kannibalisches Gemetzel drohen. Das demonstrierten die Wissenschaftler in einem auf die Spitze getriebenen Existenzkampf zwischen Tomaten und Eulenfalterraupen.

Tomaten produzieren in ihren Blättern mehr oder weniger hoch konzentrierte Dosen von unterschiedlichen Abwehrstoffen, die sie für Fraßschädlinge unverdaulich

machen. Zudem warnen angeknabberte Tomaten ihre Nachbarpflanzen, indem sie flüchtige Substanzen wie Jasmonsäuremethylester abgeben – ein Signal, das die Tomaten der Umgebung sofort anregt, vermehrt Abwehrstoffe zu produzieren und ihrerseits Warnsignale abzugeben. John Orrock von der University of Wisconsin und Kollegen ließen nun auf vorgewarnte, mit Abwehrstoffen vollgepumpte Tomaten sowie auf arglose und daher ungiftige Gewächse hungrige Raupen des Eulenfalters *Spodoptera exigua* los – und beobachteten zunächst wenig überraschend, dass die Raupen deutlich eher die ungiftigen Pflanzen verspeisten.

Spannend allerdings war, was geschah, als die Raupen nur noch abwehrbereite und giftige Tomaten, gleichzeitig aber viele hungrige Raupenkollegen vorfanden: Sie fraßen zuerst notgedrungen viel weniger Blätter, wurden dabei zusehends hungriger und gingen schließlich dazu über, sich gegenseitig aufzufressen – ein sonst nur

gelegentlich beobachtetes, eher zufälliges Geschehen im Verhaltensrepertoire der gewohnheitsmäßigen Vegetarier. Aus Sicht der Pflanze ist dieses Ergebnis einer Raupenattacke natürlich ein gefundenes Fressen, konstatiert Orrock: Kannibalen-Raupen sind für die Tomate doppelt gut, weil sie die Lust auf Pflanzen verlieren und zugleich unter ihresgleichen aufräumen.

Dieser Ausgang dürfte dem Abwehrprogramm der Pflanzen im Lauf der Evolution einen ordentlichen Schub gegeben haben. Denn er fördert vielleicht die Weitergabe kannibalischen Verhaltens an die nächste Generation von Raupen, weil mehr derjenigen Tiere verhungern, die im Notfall keine Artgenossen verspeisen. Zudem lohnt es sich so wohl auch für die Tomaten, ihre Nachbarn zu warnen: Sie lassen den Tieren am Ende nur einen Ausweg offen, der schließlich eher der Pflanze als dem Schädling nützt. ↗

BOTANISCHE SENSOREN

# Fleisch fressende Pflanze arbeitet mit Gasradikalen

von Jan Osterkamp

Insekten fangen mit Ozon? Wenn es blitzschnell gehen soll, nutzen Fleisch fressende Pflanzen reaktive Gasatome als Signalgeber. Nicht ganz auszuschließen, dass dies die Gewächse einmal zu beliebten Versuchskaninchen von Zellphysiologen werden lässt.



**D**ie Insekten fressende Venusfliegenfalle schnappt sich unvorsichtige Tierchen mit spezialisierten Fangblättern: Sobald ein Opfer eine oder mehrere der sechs Fangborsten auf den Blattseiten touchiert, greifen diese ineinander, schließen sich blitzschnell und verhindern eine Flucht. Als Alarmreiz, so dachten Generationen von Botanikern, sollte dabei eine leichte Berührung der Borstensensoren ausreichend sein. Das ist aber nur die halbe Wahrheit, wie ein Team von Forschern um Vladimir Kolobov von der University of Alabama auf der »Gaseous Electronics Conference« Experten und den Wissenschaftsreportern von »Science« berichtet hat: Ganz offenbar spielen blitzartig freigesetztes Ozon oder reaktive Sauerstoff- oder Stickstoffradikale eine wichtige Rolle dabei, die grüne Sensorik beim Zuschnappen rasch systemweit zu aktivieren.

Aufmerksam wurden die Forscher bei einem zunächst einigermaßen bizarr anmutenden Vorexperiment: Sie hatten im Labor mit einem elektrischen Generator bei Raumtemperatur Jets aus ionisierter Luft, also kaltes Plasma erzeugt und über

Blattoberflächen sowie die Zilien geleitet, die den Venusfliegenfallen als Sensoren dienten. Dies sorgte stets für ein sofortiges Zuschnappen des Fallenmechanismus – und zwar auch dann, wenn das Gas so sanft über die Sensoren strich, dass sie im Normalfall nicht auslösen würden. Ganz offenbar spielen demnach die Ionen des Plasmas eine Rolle, so die Forscher. In Frage kommen dabei reaktive Varianten der Gasatome – etwa Ozon, das im Labor wie in der Natur nach einem Blitz in der Luft gebildet wird –, aber auch reaktive Stickstoffspezies.

Solche im Plasma häufigeren Gasatomvarianten – reaktive Sauerstoff- und Stickstoffspezies oder RONS – kennt man generell in der Biologie von Zellen nicht nur als Radikalschädlinge im Gewebe, sondern auch als nützliche physiologische Signalleber, etwa in Muskeln. Bei den Venusfliegenfallen scheinen sie ebenfalls eine wichtige Sensorsignalfunktion zu übernehmen, so die Forscher um Kolobov: Der Schnappmechanismus löst immer aus, wenn versuchsweise Lösungen mit reaktiven Molekülen wie  $H_2O_2$  auf die Blätter appliziert wurden, nicht aber bei Wasser. Insgesamt könnte die Beobachtung mehr als ein Kurosum sein, hoffen die beteiligten Wissen-

schaftler. Immerhin sei es möglich, direkt an der Pflanze die Wirkung von RONS nachzu vollziehen, während ihre Wirkung in physiologischen Prozessen sonst jeweils aufwändige Studien an Zellkulturen notwendig macht.

Die neurosensorische Verschaltung ist bei Venusfliegenfallen allerdings komplexer, als es zunächst den Anschein hat: Die Pflanze muss zwar blitzschnell auf Signale reagieren, um tatsächlich Insekten fangen zu können; zudem muss sie ihre Reaktionen aber austarieren, um nicht etwa auf jeden Regentropfen oder ein vom Wind herangetragenes Blättchen loszugehen. Verschiedene Sicherheitsvorkehrungen sorgen daher dafür, dass der Alarm sinnvoll gesteuert wird und alle nachfolgenden Prozesse – etwa die Produktion von Verdauungsenzymen in Drüsenzellen – nicht ständig unnötig hochgefahren werden. ↗

(Spektrum.de, 13.11.2018)

# Die völlig übersehene **Schattenstrategie der Sonnenblume**

von Jan Osterkamp

Sonnenblumen drehen ihre Blüten bekanntlich stets in Richtung Sonne – haben aber noch weitere, bislang übersehene Tricks auf Lager, um möglichst nie im Schatten zu stehen. Man muss allerdings genau hinsehen.



**S**onnenblumen meiden Schatten, wo immer es geht – auch und besonders, wenn sie auf einem Feld selbst dicht gedrängt in der Sonne stehen. Dann schlägt ein wohl im Erbgut codiertes Programm zu: Die Pflanzen neigen sich nach rechts und links und optimieren so den Lichteinfall, was im Feld zu einer selbst organisierten symmetrischen Zickzackanordnung führt. Die kann man allerdings nur bei genauem Hinsehen entdecken, berichten Forscher aus Argentinien in »PNAS«.

Denn im Normalfall fällt das wohlgeordnete Muster von abwechselnd links- und rechtsgeneigten Pflanzen im Sonnenblumenfeld gar nicht auf – vor allem, weil das dichte Blattwerk die Neigungswinkel der Stängel verschleiert, berichten Antonio Hall und seine Kollegen. Ihren Beobachtungen kam ein kurzes Zeitfenster zugute, in dem die Pflanzen noch stehen, aber schon viele Blätter eingebüßt haben: Nun erkennt man, wie regelmäßig die Sonnenblumen sich jeweils nach rechts oder links aus dem Schatten der Vorderpflanze neigen.

Experimente der neugierig gewordenen Forscher auf eigens angelegten Versuchs-

flächen zeigten nun, dass die Sonnenblumen tatsächlich sehr regelmäßig ausweichen und so selbstorganisierte Muster bilden – allerdings nur, wenn die Dichte im Feld sehr hoch ist. Der Prozess beginnt in der frühen Wachstumsphase der noch jungen Pflanzen ausgehend von einem ganz vorne zur Sonne platzierten Exemplar. Die direkt dahinterstehende Sonnenblume neigt sich nun um rund zehn Grad in eine Richtung aus dem Schatten. Dies führt dazu, dass die hinter diesem Vorreiter stehende Pflanze ihrerseits in die Gegenrichtung ausweicht. So resultiert am Ende ein wellenartig nach hinten durchgereichtes, symmetrisches Muster – und ein direkter Erfolg beim Sammeln der Sonnenstrahlen: Der Ertrag auf den selbstorganisiert gezickzackten Versuchsfeldern war um 25 bis 50 Prozent höher als auf zum Vergleich untersuchten Feldern, bei denen die Pflanzestängel in einer vertikalen Position festgezurrt wurden.

Kommerzielle Sonnenblumenfelder werden im Normalfall deutlich weniger dicht bepflanzt als in ihrem Experiment, so dass der Effekt in der Kulturlandschaft wohl keine Rolle spielt, merken Hall und Co an. Denn je enger die Pflanzen stehen, des-

to schwieriger wird zum Beispiel die Bekämpfung von Schädlingen, die sich von Pflanze zu Pflanze ausbreiten. Unterschiedliche Sonnenblumenvarianten zeigen übrigens auch unterschiedlich ausgeprägte Neigungswinkel, so die Forscher: Womöglich ist das Verhalten demnach in irgendeiner Form genetisch fixiert. Vielleicht, so spekulieren sie, könnte man dieses genetische Programm einmal auch bei vielen anderen Pflanzen nachweisen, wo es bislang unentdeckt schlummert. Schließlich wäre es seltsam, wenn nur Sonnenblumen das Schattenvermeidungsprogramm erfunden hätten.

(Spektrum.de, 11.07.2017)



BOTANISCHE INNOVATIONEN

# Hahnenfuß lockt Bestäuber mit allen Tricks

von Jan Osterkamp

Die Allerweltsblümchen des Hahnenfußes kennen Kniffe, die keine andere Pflanze im Repertoire hat: Ihre geheizten Blüten locken Bestäuber mit einem ölig schillernden Farb-Leitstrahl.

**D**ie rund 500 Vertreter von *Ranunculus*-Arten, dem Hahnenfuß, verfügen über besonders pfiffig gebaute Blütenblätter, die im gesamten Pflanzenreich sonst nicht vorkommen: Ihre für uns eher schlicht gelben Blüten schillern bei genauer Betrachtung in einem ölichen, spiegelnden Film, dessen physikalische Grundlagen Botaniker seit rund 100 Jahren zu ergründen versuchen. Forscher um Casper van der Kooi von der Université de Lausanne meinen, dass die Blumen eine einzigartige Kombination von Struktur- und Pigmentfarben einsetzen, die von Bestäubern auch aus weiter Entfernung noch gut zu erkennen ist – und sie beim Anflug wie ein Richtstrahl zielsicher ins Zentrum der Blüte leitet.

Die Forscher hatten verschiedene Hahnenfuß-Kronblätter fotografisch und un-

ter dem Elektronenmikroskop untersucht und dabei eine typische Oberflächenstruktur ausgemacht: Die obere, nur aus einer Zellschicht gebildete Epidermis der Blütenblätter ist extrem glatt und enthält Pigmente, die blaues Licht stark absorbieren und gelbe Wellenlängen reflektieren. Unter dieser Schicht finden sich Luftpolster, darunter Stärkekörner – eine Anordnung, die durch Interferenzeffekte den schillernden Spiegeleffekt bewirkt. Zudem werden nicht vom Pigment reflektierte Lichtwellen an der Stärkeschicht gestreut und zurückreflektiert, was blaues Licht erneut filtert und am Ende den Gelbeffekt verstärkt.

Der Trick dürfte dem Hahnenfuß gerade bei stärkerem Sonnenschein Vorteile gegenüber der Konkurrenz um fliegende Bestäuber verschaffen, glauben die Forscher: Der Blütenkelch wird der Sonne nachgeführt und könnte sich zu einer Art Licht-

blitz-Leitstrahl bündeln, mit dessen Hilfe Bienen und Hummeln auch aus größerer Entfernung zur einzelnen Blüte navigieren können.

Hahnenfuß-Blüten nutzen ihren Pigmentspiegel zudem vielleicht noch für einen weiteren Vorteil: Bei bedecktem Himmel schließen sie den Blütenkelch, folgen aber trotzdem der Sonne, soweit sie durch die Wolkenschicht auszumachen ist. Dabei wird das auf die Kelchblätter einfallende Restlicht auf die Staub- und Fruchtblätter im Inneren der Blüte gelenkt, was dort die Temperatur erhöht. Womöglich können so Pollen schneller reifen, spekulieren die Forscher. Und, so vermuten sie: Hungrige Bienen fliegen wahrscheinlich auf heiße Blüten.

(Spektrum.de, 22.02.2017)

SCHLICHTING!

# Vorsicht – explodierende Samenkapseln

von H. Joachim Schlichting

Das Springkraut kann seine Samen meterweit schleudern. Dazu nutzt es die elastische Energie eines ausgeklügelten Systems winziger Federn.



**F**rüher hat der Bauer Getreide gesät, indem er es aus einem Behälter an der Hüfte in weitem Bogen ausgeworfen hat. Dieses naheliegende Prinzip, Saat weit zu verbreiten, hat die Natur lange vor dem Menschen perfektioniert. Das Indische Springkraut (*Impatiens glandulifera*) schlägt seine Samen kraftvoll von sich. Die aus Asien eingeschleppte Art ist mit dieser Technik so erfolgreich, dass sie bereits heimische Konkurrenten verdrängt.

Die Pflanze lässt sich leicht in Aktion erleben. Dazu muss man im Spätsommer oder Herbst lediglich versuchen, einen Strauß mit den schön anzusehenden und wohlriechenden Blüten zu pflücken. Sobald man Hand anlegt, antwortet das Kraut mit einem Bombardement kleiner Körner aus den bereits gebildeten Samenkapseln.

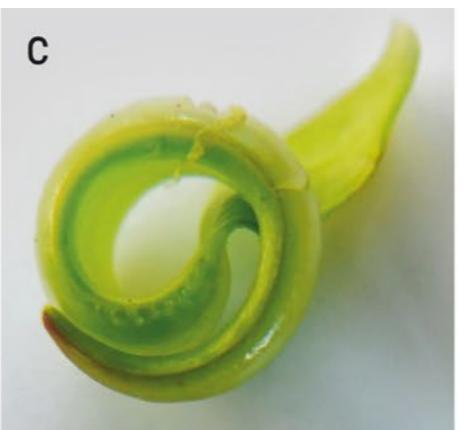
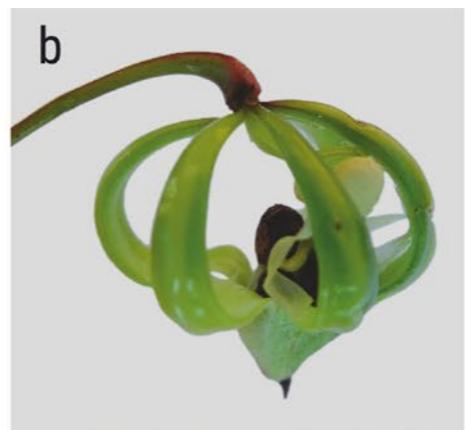
Wer dieses Phänomen verstehen möchte, sollte eine reife Kapsel vorsichtig zwischen Daumen und Zeigefinger zusammendrücken. Oft erfolgt bereits bei der ersten Berührung schlagartig ein Gegendruck. Die Hülle explodiert geradezu zwischen den Fingern und gibt die dunklen Samenkörper frei.

Die fünf länglichen Seitenteile des anfangs obeliskenförmigen Gehäuses ringeln sich dabei uhrfederartig auf (Fotos a bis d). Nicht nur die Form rechtfertigt diesen Vergleich – die gespeicherte Energie pro Masse ist sogar etwas größer als bei Federstahl. Versucht man, die Spiralen anschließend wieder gerade zu biegen, leisten sie erstaunlich großen Widerstand. Entsprechend standen die Seitenteile der Kapsel vor der Explosion unter enormer Spannung.

Um diese bis zum Moment der Kapselsprengung aufrechtzuerhalten, sind die Streifen symmetrisch aneinandergefügt, was die Kräfte gleichmäßig verteilt. Nähte halten die Ränder zusammen. Sie sind anfangs fest, entwickeln sich mit zunehmender Reife jedoch zu Sollbruchstellen. Dann genügt ein kurzer Riss in einer der fünf Fugen, um die übrigen vier nahezu simul-

## INDISCHES SPRINGKRAUT

**An der unversehrten Kapsel des Indischen Springkrauts sind zwei von fünf durch Nähte getrennte Streifen zu sehen (a). Wenn sie zerbirst, schleudert sie schwarze Samenkörper (b) umher. Dabei rollt sich jedes Segment ein (c) und lässt sich nur unter Kraftaufwand wieder gerademachen (d, unter einer Glasscheibe fixiert).**



tan – innerhalb von etwa 250 Mikrosekunden – ebenfalls reißen zu lassen. Eine solche konzertierte Aktion ist nötig, um die Samen maximal zu beschleunigen.

Entscheidend für diese Koordination ist eine Verbindung der gespannten Streifen durch flexible Membranen im unteren Teil. Wenn eine der Fugen bricht und sich die beiden daran angrenzenden Teile bewegen, drücken sie die Membranen auseinander. Das wiederum zieht an den übrigen Verbindungsstellen und löst auch sie.

### **Ungeheure Spannung entlädt sich und katapultiert die Körner meterweit**

Nun schnurren alle fünf Gewebestränge wie winzige Uhrfedern zusammen und schleudern dabei den gemeinsamen Boden mitsamt den Samenkörnern hoch. Jede Kapsel enthält fünf bis zehn von ihnen mit einer Masse von je etwa 20 Milligramm. Sie hängen locker an einem dünnen, zentralen Strang, der aus dem Kapselboden herauswächst. Während die Streifen aufgeringelt zur Ruhe kommen, fliegen die Samen wegen ihrer Trägheit weiter.

Um die Reichweite der Körner abschätzen zu können, habe ich eine rund 1,5 Meter hohe Springkrautpflanze frei gelegt

und die Umgebung im Umkreis von mehr als zwei Metern mit einer Folie ausgelegt. Anschließend löste ich den Wurfmechanismus durch leichtes Anschlagen mit dem Finger aus, wodurch die Samen bis zu 1,8 Meter vom Stamm entfernt zu liegen kamen. Dabei nutzten einige sogar die weit ausladenden Blättern als Sprungbretter. In wissenschaftlichen Veröffentlichungen ist von einer noch größeren Wurfweite von bis zu fünf Metern die Rede. Dabei dürfte aber noch Wind im Spiel gewesen sein.

Geht man der Einfachheit halber von einem waagerechten Wurf aus zwei Meter Höhe aus, so entspricht der von mir ermittelten Reichweite von 1,8 Metern bei Vernachlässigung des Luftwiderstands eine Startgeschwindigkeit von zirka 2,8 Meter pro Sekunde. Der Physiker Robert D. Deegan von der University of Michigan hat maximal vier Meter pro Sekunde gemessen. Der höhere Wert ist vermutlich hauptsächlich auf die zu überwindende Luftreibung zurückzuführen, die beim realen Flug dazukommt.

Deegan hat auch die mittlere elastische Energie bestimmt, die in den fünf gespannten Streifen gespeichert ist, und kam auf 0,9 Millijoule. Bei durchschnittlich sieben

»... wie das Spannen einer Feder, die, je mehr man sie dehnt, an Kraft und Widerstand zunimmt, bis sie jenen Zustand erreicht, wo sie zurückschlägen muß.«

[Hartmut Lange]

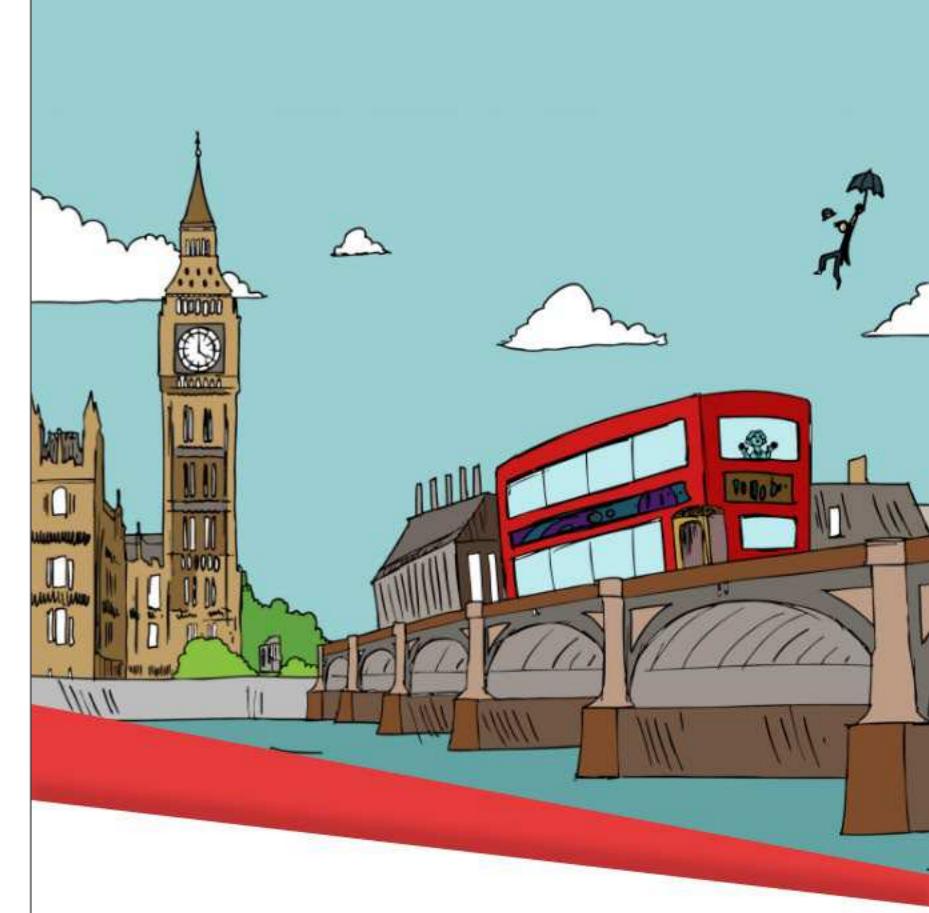
Samenkörnern pro Kapsel, die mit einer Geschwindigkeit von drei Metern pro Sekunde abgeschossen werden, benötigt dieser Vorgang bereits 0,63 Millijoule an kinetischer Energie. Bedenkt man, dass außerdem noch Arbeit in das Auftrennen der restlichen Nähte, die Beschleunigung der Streifen und das Überwinden von Reibungsvorgängen fließt, so offenbart sich hier ein äußerst effektiver Mechanismus und ein verblüffend hoher Wirkungsgrad, mit dem die elastische Energie in Wurfergie umgewandelt wird.

Wegen der kurzen Auslösezeit von 250 Mikrosekunden kommen physiologische Prozesse für den Vorgang nicht in Frage – enzymatische Reaktionen benötigen viermal länger. Vielmehr baut sich die mechanische Spannung im Verlauf des Kapselwachstums auf und erreicht ihr Maximum zur Zeit der Reife. Dabei dürfte die Druckverteilung des Zellsafts in den Streifen eine wesentliche Rolle spielen. Als ein von mir zur Untersuchung gepflückter Springkrautstrauß zu welken begann, konnte ich keine Explosio- nen mehr auslösen. Nachdem ich ihn dann aber gleich in eine Vase mit Wasser stellte, regenerierte sich die Spannkraft und die Samen wurden wieder ausgestoßen.

Wie Federspannung grundsätzlich in pflanzlichem Gewebe entsteht, lässt sich mit einem einfachen Experiment zeigen: Feuchtet man den Streifen eines Löwenzahnstängels an, ringelt er sich auf. Die inneren liegenden Zellen absorbieren im Gegensatz zur Außenhaut durch Osmose Wasser und quellen auf. Wenn man die Spirale entrollt, spürt man einen deutlichen Widerstand. ↪

(Spektrum der Wissenschaft, September 2016)

Deegan, R.D.: Finessing the Fracture Energy Barrier in Ballistic Seed Dispersal. In: Proceedings of the National Academy of Sciences USA 109, S. 5166 – 5169, 2012



**gymglish**  
**& Spektrum.de**

**Verbessern Sie Ihr  
Englisch online**

- ✓ Kostenloser Einstufungstest
- ✓ Bereits mehr als 3 Mio. Nutzer
- ✓ Individuell angepasste Kursinhalte

1 Monat kostenlos

# TULPENKRISE

Als Blumen den ersten Börsencrash auslösten

von Mareike Knoke



Im Jahr 1637 brach eine massive Wirtschafts- und Börsenkrise über die Niederlande herein. Händler hatten sich mit Tulpen verspekuliert: Die Blumen hielten nicht, was sie versprachen.

**I**m niederländischen Keukenhof herrscht zwischen Ende März und Ende Mai der Ausnahmezustand: Millionen von Tulpen blühen jedes Jahr in dem 32 Hektar großen Landschaftspark. 800 verschiedene Sorten gibt es dort insgesamt, die aus rund 150 Arten der Gattung *Tulipa* gezüchtet werden. Sie gedeihen in allen nur denkbaren Farben und Blütenformen und machen den Park zum Wallfahrtsort für Tulpenliebhaber aus aller Welt: Papageientulpen mit ihren typischen fedrigen Blatträndern, zarte, schlanke Lilientulpen, kompakte gefüllte Tulpen, Darwintulpen mit besonders leuchtenden Farben, Regenboogentulpen, die genauso gemustert sind, wie der Name schon sagt. Und natürlich die schlichten Tulpen, die im Frühjahr, neben den exotischeren Tulpensorten, zum festen Repertoire eines jeden Blumenhändlers gehören. 80 Prozent der Tulpen, die wir heute kaufen, stammen von Tul-

penfarmen aus den Niederlanden, die damit unangefochtener Marktführer sind. Blumenliebhaber bezahlen im Laden vier oder fünf Euro für ein Sträußchen der bunten Schnittblumen und nicht sehr viel mehr für ein Säckchen mit Tulpenzwiebeln zum Selbstaussäen. Kaum jemand kann sich heute wahrscheinlich vorstellen, dass Tulpenbegeisterte für eine Hand voll Zwiebeln einst den Gegenwert eines schmucken Grachtenhauses in der Amsterdamer Innenstadt bezahlten und dass Tulpen einen der ersten Börsencrashes der Geschichte auslösten. So geschehen in den Niederlanden während des so genannten Tulpenfebers in der ersten Hälfte des 17. Jahrhunderts, als Tulpen Statussymbole der Wohlhabenden und unverzichtbares Accessoire waren – und Spekulationsobjekt. Diese Tulpenmanie erreichte 1637 ihren Höhepunkt und führte schließlich zum Crash. Und ebenso wie die geplatzte Immobilienblase vor gut zehn Jahren in den USA hinterließ

auch der Zusammenbruch des Tulpenmarktes viele ruinierte Opfer unter adeligen wie bürgerlichen Sammlern.

Diese Wirtschaftskrise ist eng verbunden mit der Kultivierungsgeschichte von *Tulipa*. Sie gehört zu den Liliengewächsen, und ihre Arten sind von Nordafrika über Europa bis nach Zentralasien verbreitet. Der Name ist türkischer (»tūlbend«) beziehungsweise persischer (»dulband«) Herkunft und bezeichnet eigentlich einen Turban. Tatsächlich ähnelten die Turbantücher reicher Osmanen in Gestalt und Farbe ein wenig Tulpen.

### Vom Orient nach Holland

Die ursprüngliche Heimat unserer Tulpen ist der Nahe und Mittlere Osten. Schon Perser und Türken kultivierten sie: Die ersten Texte, die Tulpen erwähnen, entstammen altpersischer Literatur aus dem 9. Jahrhundert. Die Pflanzen waren auch beliebte Motive auf Keramik und Kleidung. Experten



**EIN MEER AUS  
ROSA TULPEN**

**Tulpen gehören zu  
den beliebtesten  
Schnitt- und Garten-  
blumen – kein Wun-  
der: Nach dem grauen  
Winter sehnen wir  
uns nach prächtigen  
Farben.**

ISTOCK / MAMMUTH

gehen heute davon aus, dass Tulpen etwa seit dem 16. Jahrhundert als Gartenpflanzen weit verbreitet sind. Um diese Zeit etwa kam die lange, schlanke Blume als Mitbringsel von Kaufleuten, die Samen und Zwiebeln mit sich führten, aus der Türkei nach Mittel- und Westeuropa.

Die erste Tulpe brachte vermutlich ein Habsburger Diplomat von Konstantinopel nach Wien. Auch in Deutschland und den Niederlanden löste die Gartenpflanze Begeisterung aus. Bereits 1559 pflegte ein Augsburger Kaufmann in seinem Garten Tulpen. Der Schweizer Naturforscher Conrad Gesner (1516–1565) sah sie dort; er gilt als einer der Ersten, der Tulpen ausführlich in den Forscherblick nahm und beschrieb. Auf ihn berief sich wiederum Carl von Linné (1707–1778) in seiner Artenbeschreibung »Species Plantarum« 1753.

Eine besondere Rolle bei der weiteren Verbreitung des Gewächses spielte der niederländische Botaniker Carolus Clusius (1526–1609), Präfekt des Botanischen Gartens in Leiden und Professor an der dortigen Universität. Er setzte die erste Tulpenzwiebel 1593 – und kultivierte später Hunderte von Sorten. Dank des regen Tauschhandels, den Clusius mit anderen

Botanikern in ganz Europa unterhielt, entwickelte sich Holland bald zum Zentrum der Tulpenzucht und des Handels mit den begehrten Blumen. Erste ausführlichere wissenschaftliche Arbeiten über die Tulpen stammen von ihm – er beschreibt darin etwa seine Erkenntnisse über die Aufzuchtbedingungen von Tulpen. Clusius' Überlegungen, die Tulpe als Heilpflanze zu nutzen, zerschlugen sich bald: Zwiebel und Spross enthalten das giftige Tulipanin. Die Vergiftungssymptome können heftig ausfallen, wenn man eine Tulpenzwiebel mit einer Gemüsezwiebel verwechselt: Erbrechen, Magen- und Darmbeschwerden, in besonders schweren Fällen sogar Atemstillstand.

### Vom Liehaberpflänzchen zum Spekulationsobjekt

Die Blumen pflanzte man zunächst nur in privaten Gärten an und tauschte sie – diskret, bei Sammlerzusammenkünften unter Ausschluss der Öffentlichkeit. Die älteste heute noch erhaltene Sorte stammt aus dem Jahr 1620 und heißt »Lac van Rijn«. Sie blüht burgunderrot mit einem breiten elfenbeinfarbenen Saum. Dass Tulpen seinerzeit wie wertvolle Edelsteine gehütet

wurden, erklärt sich auch damit, dass ihre Zucht eine langwierige Angelegenheit war – und es auch im 21. Jahrhundert noch ist: 20 Jahre kann es dauern, bis eine neue Sorte reif für den Handel ist.

Es beginnt – damals wie heute – mit dem gezielten Kreuzen von zwei Tulpen. Die Pflanzen werden heute allerdings im Gewächshaus kultiviert, um Fremdbestäubung zu verhindern und keine ungewollten Überraschungen zu erleben. Der Pollen der Vaterpflanze wird auf die im Blütenkelch befindliche Narbe des Blütenstempels der Mutterpflanze übertragen. Nach der Befruchtung bilden sich die Tulpenfrüchte mit den Samen. Im Herbst sind die Früchte reif und geben ein paar hundert Samen frei.

Diese werden dann Mitte Oktober bis Ende November im Gewächshaus ausgesät. Im nächsten Frühjahr hat man Jungpflanzen mit einem schmalen Blatt und einer kleinen Zwiebel. Erst im dritten Jahr werden die Zwiebeln vom Gewächshaus ins Freiland umgesetzt. Zur ersten Blüte kommen die jungen Tulpen im fünften oder sechsten Lebensjahr. Erst dann ist für den Züchter erkennbar, welches Ergebnis seine Kreuzung hervorgebracht hat. Ist er

## HOCH SPEZIALISIERTE LANDWIRTSCHAFT

Mit speziellen Nutzfahrzeugen werden die Zuchttulpen geköpft, damit sie alle Energie in die Zwiebeln stecken und keine Samen bilden.



mit dem Ergebnis zufrieden, wird die neue Sorte klassifiziert und registriert.

Neue Zwiebeln werden im Herbst als kleine Tochterzwiebeln von der Mutterzwiebel geerntet. Die Tochterzwiebel liegt im Winter im Boden. Dort bildet sich die erste Blattanlage. Und so weiter. Tulpen benötigen die Kälte des Winters und die wieder steigenden Temperaturen im Frühjahr für den Austrieb.

## Anfällig für Viren

Durch die intensive Zucht der Tulpen schon zu Clusius' Zeiten wurden sie anfällig für Viren – insbesondere für das Tulip Breaking oder Breeding Virus oder auch Tulip Mosaic Virus ([lesen Sie dazu auch das Interview mit Karin Mölling, die den Zusammenhang entdeckt hat](#)). Es war mitschuldig am Hype und Zusammenbruch des Tulpenmarktes. Es vernichtete die Tulpenernten nicht, sondern – im Gegenteil – führte zunächst zu ungewöhnlich schönen Blütenfarben und Mustern, nach denen Tulpensammler verrückt waren. Und das war ein trügerisches Geschäft, wie sich bald herausstellen sollte. Denn die ungewöhnlichen Blütenmuster, die eine einzelne Zwiebel so wertvoll machten, sorgten dafür,

dass Sammler sie wie Kleinode hüteten. Tulpendiebe brachen in die Gärten reicher Bürger und in den Botanischen Garten ein und stahlen Pflanzen und Zwiebeln.

Gedacht waren sie nicht für den sofortigen Verkauf, sondern um im Verborgenen selbst zu züchten und die Frucht des Diebesguts später unter der Hand für horrende Preise an Tulpenliebhaber zu verkaufen. Auf Auktionen erzielten einzelne Zwiebeln – nach heutigem Wert – 25 000 Euro oder mehr. Rembrandt erlöste damals mit einem Gemälde weniger, obwohl er gut im Geschäft war. Alle Rekorde brach schließlich auf dem Höhepunkt der Tulpenmanie die »Semper Augustus« – eine weiß-rot gestreifte Tulpe, für deren Zwiebel man heute umgerechnet eine Million Euro bezahlt hätte.

Der Haken an der Sache war: Die kranken, virusbefallenen Tulpen waren im Grunde wertlos. Die Blütenpracht wiederholte sich, wenn überhaupt, höchstens einmal, danach starben die Pflanzen. Die Sammler investierten also in etwas, was es nicht gab – sie gaben ihr Geld nur wegen eines Versprechens auf eine prächtige Tulpe. Das führte für viele geradewegs in den finanziellen Ruin. Sie investierten, weil sie es nicht besser wussten – und weil alle inves-

tierten und man sich von anderen nicht ausstechen lassen wollte beim Kampf um die schönste Tulpe.

### Vom Luxusprodukt zum Allerwertsgut

Nach dem Zusammenbruch des überhitzten Tulpenmarktes normalisierten sich die Preise wieder. Das läutete zugleich die Ära der Tulpe als für alle Schichten erschwingliche Zierpflanze ein. Ende des 19. Jahrhunderts entwickelte sich in den Niederlanden die gezielte Züchtung von neuen Sorten. In Deutschland werden übrigens nur vereinzelt Tulpen gezüchtet, die Züchter konzentrieren sich auf die Region Niederrhein um Neuss herum. Die über Jahrhunderte kultivierte Expertise war und ist in den Niederlanden, wo auf insgesamt 9500 Hektar Tulpen angebaut werden. Das flache Land ist perfekt für den Anbau auf riesigen Flächen geeignet. Denn wer die Blumen züchtet, braucht vor allem Platz: Neben den Feldern mit für den Großhandelsverkauf bestimmten Schnittblumen – jenen Tulpen also, die in den Blumenläden landen – nehmen die Felder für die Produktion neuer Zwiebeln viel Platz ein. Dort werden Mutterpflanzenbestände aufgebaut, von denen sich jährlich mehrere tausend Zwiebeln für den Ver-

kauf ernten lassen. Sie werden jedes Jahr geerntet, sortiert und neu aufgepflanzt. Unmittelbar nach dem Aufblühen werden auf diesen Feldern alle Pflanzen kontrolliert und jene aussortiert, die der gewünschten Qualität in Bezug auf Farbe, Form, Blütengröße oder Stielänge nicht entsprechen – damit sie sich nicht weiter vermehren und die Sorte rein bleibt. Danach werden die Tulpen mit einer speziell dafür entwickelten Maschine geköpft. Der Sinn dahinter: Die Pflanze soll ihre Kraft nicht unnötig in die Bildung von Samen verschwenden, sondern die ganze Energie in die Bildung von kräftigen Zwiebeln stecken.

Etwa 4200 verschiedene Sorten soll es heute weltweit geben. Um den Überblick nicht zu verlieren, wurde vor 100 Jahren ein System zur Klassifizierung der Tulpen eingeführt. Heute werden Neuzüchtungen nach ihrer Blütezeit, ihrer Abstammung und ihrer Blütenform in eine von 15 Klassen eingeordnet und mit Namen wie »Angélique«, »Blue Parrot« oder »Orange Princess« versehen – was auch 380 Jahre nach der Krise immer noch schön klingt. ↗

(Spektrum – Die Woche, 14/2017)



BIOCHEMIE

# Wie giftige Pflanzenstoffe uns **gesünder machen**

von Mark P. Mattson

Niedrig dosiertes Gift macht Gemüse so gesund, sagen Forscher. Denn es versetzt den Körper in einen Stressmodus und härtet ihn ab gegen eine Vielzahl von Krankheiten.

**W**arum gilt es als gesund, viel Obst und Gemüse zu essen? Viele nehmen an, dafür seien Antioxidanzien verantwortlich, die in diesen Lebensmitteln enthalten sind. Zunächst klingt das einleuchtend, denn Antioxidanzien neutralisieren reaktionsfreudige Atome und Moleküle wie die berüchtigten reaktiven Sauerstoffspezies (ROS), die Körperzellen schädigen können und bei Krebs, Herz-Kreislauf-Erkrankungen und Diabetes eine wichtige Rolle spielen.

Auch für meine Arbeit als Neurowissenschaftler spielt das Thema eine Rolle. Schon seit Langem ist meinen Kollegen und mir bekannt, dass ROS in der Lage sind, Nervenzellen in ihrer Funktion zu beeinträchtigen und sogar abzutöten. Zudem wissen wir: Menschen, die regelmäßig antioxidantienreiche pflanzliche Nahrung zu sich nehmen, leiden seltener an neurodegenerati-

ven Erkrankungen. Daraus könnte man den Schluss ziehen, das eine habe direkt mit dem anderen zu tun. Doch ganz so einfach ist es nicht.

Tatsächlich haben streng kontrollierte Studien mit Tieren wie Menschen keinen eindeutigen Nachweis für die Annahme geliefert, das Einnehmen von Antioxidanzien wie den Vitaminen C, E und A helfe, solchen Krankheiten vorzubeugen. Einige Arbeiten haben sogar gesundheitlich bedenkliche Effekte belegt – so geht laut einer Studie aus dem Jahr 2011 die langjährige Einnahme von Vitamin-E-Präparaten mit einem signifikant erhöhten Prostatakrebsrisiko einher. Worauf könnte dann aber die gesundheitsfördernde Wirkung von Obst und Gemüse beruhen?

Die Antwort hat viel damit zu tun, wie Pflanzen sich seit Jahrmillionen vor Schädlingen schützen. Sie produzieren bitter schmeckende, giftige Stoffe, die als natürliche Pflanzenschutzmittel (Pestizide) wirken. Wenn wir pflanzliche Nahrung zu uns nehmen, konsumieren wir in geringen Dosen auch diese Toxine. Und setzen die Zellen in unserem Körper damit unter leichten Stress, ähnlich wie es bei sportlicher Betätigung oder längerem Fasten ge-

---

**Mark P. Mattson** ist leitender Neurowissenschaftler am National Institute on Aging (Bethesda, Maryland, USA) sowie an der Johns Hopkins University (Baltimore, USA). Er forscht über neuronale Veränderungen während des Alterns.

#### AUF EINEN BLICK

## Gesundes Gift

- 1 Pflanzen können ihren Fressfeinden nicht entfliehen. Daher haben sie chemische Abwehrmechanismen entwickelt, um Insekten und andere Tiere auf Distanz zu halten.
- 2 Toxische Stoffe, die Pflanzen zur Selbstverteidigung einsetzen, nehmen wir in geringen Mengen zu uns, wenn wir Obst und Gemüse essen. Sie verursachen leichte Stressreaktionen, welche die Zellen unseres Körpers widerstandsfähiger machen.
- 3 Die Anpassung an solch moderaten Stress nennt man Hormesis. Man kann sie nutzen, um Hirnerkrankungen und anderen Störungen vorzubeugen – etwa durch Verzehr von Brokkoli oder Heidelbeeren.

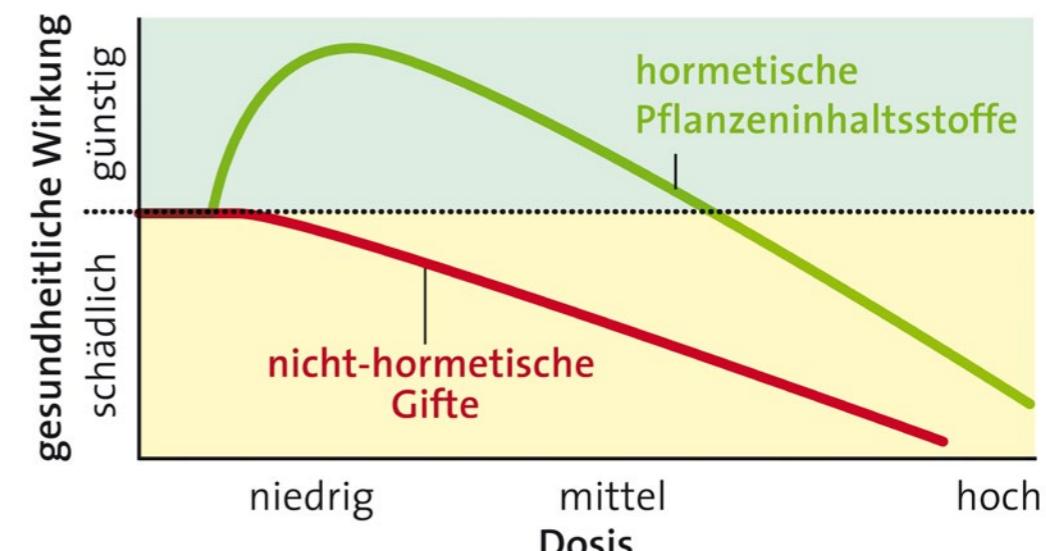
schieht. Die Zellen sterben nicht daran; vielmehr gehen sie gestärkt daraus hervor, weil ihre Stressreaktion sie dazu befähigt, mit künftigen Belastungen besser fertigzuwerden. Diese Steigerung der zellulären Widerstandskraft nennt man »Hormesis« (griechisch für »Anregung, Anstoß«). Ganz allgemein bezeichnet der Begriff eine positive biologische Reaktion, die durch niedrig dosierte schädliche Einwirkungen zu Stande kommt. Wie wissenschaftliche Arbeiten zunehmend nahelegen, zeichnet Hormesis möglicherweise hauptverantwortlich für die günstigen Wirkungen des Obst- und Gemüseverzehrs. Hormesis-Effekte besser zu verstehen, könnte neue Wege aufzeigen, um gefürchtete Hirnerkrankungen wie Alzheimer, Parkinson und Hirnschlag zu verhindern beziehungsweise zu behandeln.

## Nützlicher Stress

Meine Mitarbeiter und ich kamen über einige Umwege zu diesem Forschungsthema. Anfang der 1990er Jahre, damals noch am Sanders-Brown Center für Alternsforschung der University of Kentucky, interessierten wir uns dafür, ob sich mit Antioxidanzien die Alzheimerkrankheit be-

## Erst gut, dann schlecht

Obst und Gemüse enthalten häufig geringe Mengen toxischer Stoffe, die bei moderaten Verzehrmengen die Gesundheit fördern, doch bei steigender Dosis zunehmend schädlich werden. Diesen Effekt nennt man Hormesis. Er ist durch eine zweiphasige »Ansprechkurve« gekennzeichnet, die sich deutlich von jener nichthormetischer Gifte wie Quecksilber unterscheidet. Bei nichthormetischen Giften gibt es keine günstig wirkende Dosis.



handeln lässt. Wir vermuteten das, weil Beta-Amyloide (jene Peptide, die sich übermäßig stark im Gehirn von Alzheimerpatienten ablagern) kultivierte Hirnzellen schädigen und an diesem Zerstörungsprozess reaktive Sauerstoffspezies beteiligt sind.

Leider erbrachte eine groß angelegte klinische Studie unter Leitung von Douglas R. Galasko und Paul Aisen (beide an der University of California, San Diego) keinen Be-

leg dafür, dass Alzheimerpatienten von hoch dosierter Antioxidanziengabe profitieren. In der Hirn-Rückenmarks-Flüssigkeit der Betroffenen änderte sich die Konzentration von Beta-Amyloiden und anderen Alzheimermarkern selbst nach viermonatiger Antioxidanztientherapie nicht wesentlich. Wir überdachten daraufhin unseren wissenschaftlichen Ansatz, was uns auf verschlungenen Wegen zu einer neuen Hypothese darüber führte, worauf der gesundheitsför-

dernde Effekt obst- und gemüsereicher Ernährung wirklich beruhen könnte. Uns und anderen Wissenschaftlern fiel auf, dass Menschen, die regelmäßig Sport treiben, geistig aktiv sind und sich eher kalorienarm ernähren, relativ selten unter Beeinträchtigungen ihrer Hirnfunktionen leiden. Sie erkranken nicht so oft an Alzheimer, Parkinson oder Hirnschlag.

Wir fragten uns, ob Ernährung, sportliche Betätigung und geistige Aktivität über die gleichen molekularen Prozesse sowohl die Hirnfunktionen als auch die Anfälligkeit gegenüber neurodegenerativen Erkrankungen beeinflussen. Erste Erkenntnisse hierzu lieferte uns eine Studie aus dem Jahr 1999. Meine damalige Mitarbeiterin Annadora Bruce-Keller, die heute am Pennington Biomedical Research Center (Louisiana, USA) arbeitet, stellte bei Untersuchungen an Ratten fest: Hirnneurone von Tieren, die jeden zweiten Tag fasten mussten, waren weniger anfällig gegenüber Neurotoxinen, die epilepsieähnliche Symptome auslösen. Hirnzellen von normal ernährten Ratten zeigten diese Widerstandsfähigkeit nicht. Wenig später kam ich ans National Institute on Aging (Bethesda, Maryland, USA), wo meine Mitar-

beiter und ich diesen interessanten Befunden weiter nachgingen. Wir erkannten an entsprechenden Tiermodellen, dass häufiges Fasten auch vor Alzheimer, Parkinson und Hirnschlag schützt.

Im Zuge unserer Arbeiten zeichnete sich immer deutlicher ab: Nervenzellen reagieren auf Nahrungsentzug, indem sie molekulare Abwehrmechanismen aktivieren, die sich gegen reaktive Sauerstoffspezies sowie gegen die Ablagerung von Beta-Amyloidien richten. Unter anderem produzieren sie vermehrt spezielle Proteine, so genannte neurotrophe Faktoren, die das Überleben der Zelle begünstigen. Dazu gehört BDNF (brain-derived neurotrophic Factor). Darüber hinaus erzeugen mangelhaft versorgte Neurone auch Proteine, welche die Stoffwechseleffizienz verbessern und der Anreicherung schadhafter Moleküle entgegenwirken. Aus evolutionärer Perspektive ist das nicht allzu überraschend. Bei knappem Nahrungsangebot hat das Aufrechterhalten der Hirnfunktion Priorität, denn die kognitive Leistungsfähigkeit ist von entscheidender Bedeutung für das Überleben, etwa bei der Suche nach Essbarem. Es ist deshalb sinnvoll, wenn der Organismus in Fastenzeiten besondere

Maßnahmen ergreift, um das Funktionieren seiner Hirnneurone sicherzustellen.

Unser Interesse daran, warum sich Stress vorteilhaft auf Nervenzellen auswirken kann, führte uns schließlich zu den neurologischen Auswirkungen pflanzlicher Ernährung. Neugierig gemacht hatten uns Zeitschriftenartikel aus den 1970er Jahren, wonach Algen ein Neurotoxin namens Kainsäure produzieren, das an Rezeptoren auf Hirnzellen bindet und sie sehr stark aktiviert. Diese Rezeptoren fungieren normalerweise als Andockstellen für den erregenden Neurotransmitter Glutamat.

Wir und andere Wissenschaftler hatten bereits die paradoxen Wirkungen des Glutamats bei Fastenzuständen und sportlicher Aktivität belegt. Eine zu starke Aktivierung der Glutamatrezeptoren kann Nervenzellen schädigen oder gar zerstören. Eine maßvolle Stimulation hingegen schaltet in den Neuronen einen Signalweg an, der entscheidend an Lernvorgängen und Gedächtnisbildung mitwirkt und zudem für den Schutz der Zelle wichtig ist. Daraus erwuchs die Frage, ob der geringe Gehalt an Neurotoxinen in Obst und Gemüse in Hirnzellen eine ähnlich milde Stressreaktion provoziert.

## Wer nicht fliehen kann, muss sich verteidigen

Die gesundheitlichen Wirkungen pflanzlicher Ernährung resultieren zum Teil als unbeabsichtigte Nebenwirkung eines evolutionären Wettstreits zwischen Pflanzen und ihren Fressfeinden. Gewächse können nicht weglauen; um zu überleben, müssen sie also andere Strategien gegen Schädlinge entwickeln.

Im Lauf von hunderten Millionen Jahren erwarben sie die Fähigkeit, Stoffe zu produzieren, die ihren Fressfeinden – vor allem Insekten – schaden. Diese chemischen Verbindungen sind für Insekten im Allgemeinen nicht tödlich, denn es ist für die reproduktive Fitness der Pflanze nicht von Bedeutung, ob die Tiere verenden oder weiterleben. Die Pflanzenstoffe halten Schädlinge lediglich fern. Oft geschieht das über eine Beeinflussung des Nervensystems. Hierzu stellen die Gewächse Substanzen her, die auf Sensillen einwirken, haarähnliche Sinnesorgane an den Mundwerkzeugen der Insekten. Die Sensillen ähneln den Geschmacksknospen der menschlichen Zunge. Sie leiten Signale ans Insektenhirn weiter und können das Tier dazu bringen, von der Pflanze abzulassen.

## Ein bittersüßer Trend



UNSPASH / ALIONA GUMENIUK

Bei bitter schmeckenden pflanzlichen Substanzen, die hormetisch wirken, handelt es sich vorwiegend um sekundäre Pflanzenstoffe. Da Pflanzen diese nicht unbedingt für Wachstum und Entwicklung benötigen, können sie sie in unterschiedlichen Mengen enthalten. Sogar innerhalb einer Art kann sich der Gehalt sekundärer Pflanzenstoffe je nach Sorte unterscheiden. So weisen konventionelle, weiße Grapefruits bis zu 50 Prozent mehr Flavonoide auf als rote Sorten. Das macht sich im Geschmack bemerkbar: Während die weiße Version recht bitter schmeckt, ist die rote milder und süßer. Erstere verschwindet daher zunehmend aus den Supermarktregralen. Laut »New Scientist« wurden beispielsweise vor 30 Jahren noch 27 Millionen Boxen mit weißen und 23 Millionen Boxen mit roten Grapefruits von Florida aus vertrieben. Heute hingegen kommen doppelt so viele rote Grapefruits in den Verkauf wie weiße.

Auch bei anderen Obst- und Gemüsearten ziehen Verbraucher oft süßere oder mildere Varianten vor. Wenn Pflanzenzüchter solche Sorten kreieren, züchten sie gesundheitsfördernde Inhaltsstoffe vielfach heraus. Die milde Brokkolivariante Packman etwa hat einen Gehalt an Beta-carotinen, der gerade einmal einem Drittel desjenigen der Sorte Atlantic entspricht.

Miriam Plappert

Nicht nur vor Kerbtieren müssen sich Pflanzen schützen. Auch Vögel und Wirbeltiere einschließlich Primaten verzehren Wurzeln, Blätter und Früchte. Manche Pflanzen entziehen sich dem sehr wirkungsvoll, indem sie Stoffe bilden, die Übelkeit, Erbrechen oder sogar den Tod hervorrufen. Als Reaktion darauf haben Tiere ausgefeilte Alarmsysteme entwickelt, die vor solchen Toxinen warnen. Dazu gehört die Wahrnehmung eines bitteren Geschmacks, der uns davon abhält, bestimmte Pflanzenteile zu essen. Dass Kinder beispielsweise Brokkoli meist nicht mögen, scheint tatsächlich angeboren zu sein.

Traditionelle Medizinherrn lernten durch Versuch und (mitunter tödlichen) Irrtum, dass bitter schmeckende Gewächse manchmal als wirkungsvolle Heilmittel dienen können. Heute zeichnet sich für Pharmakologen, Toxikologen und Biochemiker immer deutlicher ab: Viele pflanzliche Stoffe, die in großen Mengen giftig sind, können bei niedriger Dosierung die Gesundheit fördern. Die Wirkung solcher hormetischen Substanzen lässt sich als zweiphasige Kurve darstellen, indem man den physiologischen Effekt gegen die Dosis aufträgt (siehe »Erst gut, dann schlecht«).

Die entstehende Linie verläuft zunächst im Bereich »günstig« und zeigt damit, dass der Verzehr einer kleinen oder mittleren Menge des jeweiligen Pflanzenstoffs gesundheitsfördernd wirkt. Mit zunehmender Dosis geht sie jedoch in den Bereich »schädlich« über, was die steigende Toxizität widerspiegelt. Paranüsse etwa enthalten das Spurenelement Selen. In geringen Mengen verzehrt, kann es das Risiko für Herz- und Krebserkrankungen senken, indem es die Aktivität eines Enzyms fördert, das solchen Erkrankungen entgegenwirkt. In großen Mengen eingenommen, wirkt Selen jedoch stark toxisch und vergiftet Leber und Lunge. Dieses Beispiel zeigt, wie Hormesis funktioniert – und was sie von Homöopathie unterscheidet, deren Vertreter ohne belastbaren Beweis und ohne plausiblen Mechanismus behaupten, kleinste Mengen von etwas Krankmachendem könnten heilen.

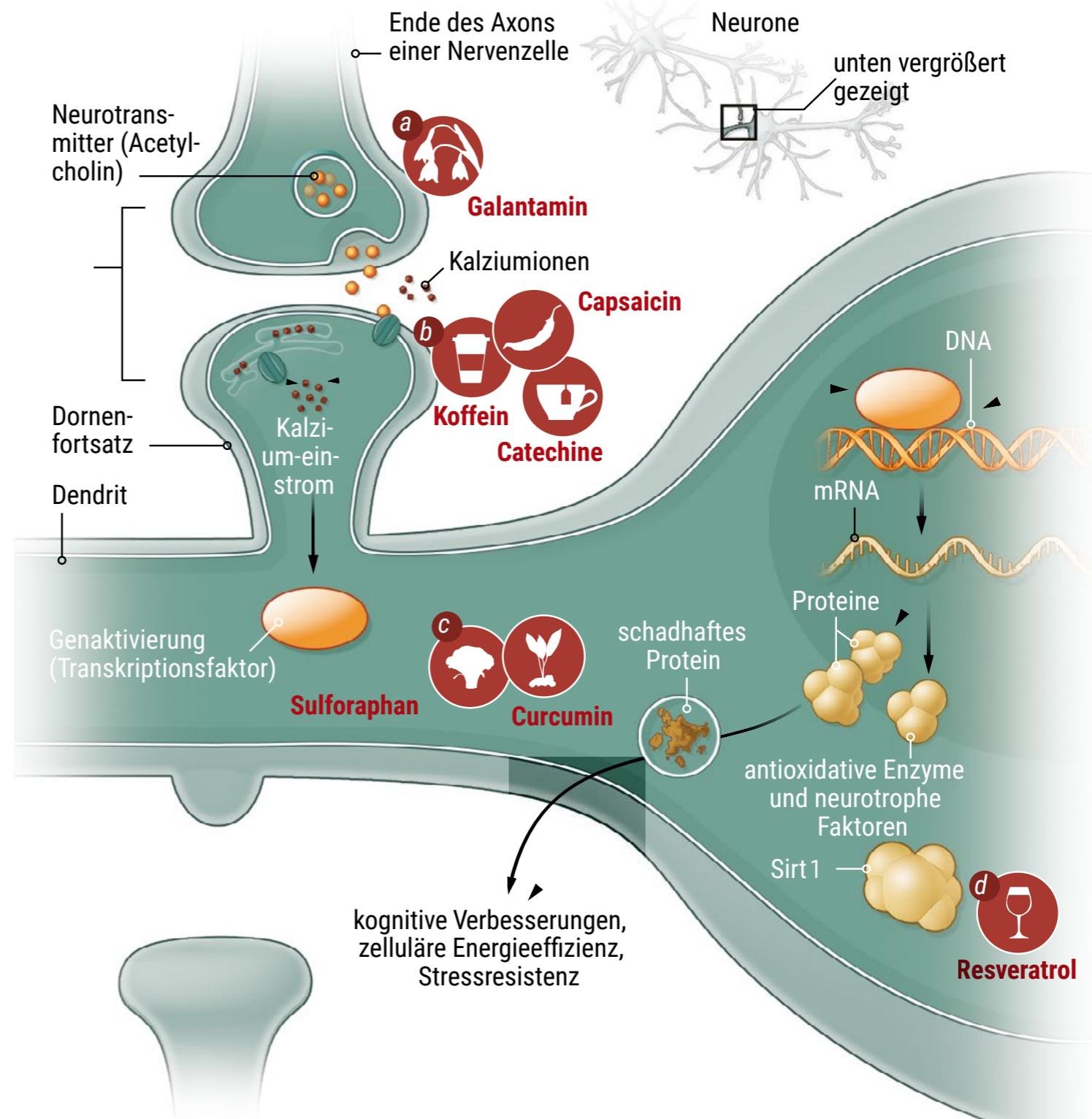
Hormetisch wirkende Substanzen kommen offenbar überall im Pflanzenreich vor. Edward J. Calabrese, Toxikologe an der University of Massachusetts in Amherst, hat mehr als 10 000 wissenschaftliche Publikationen aus den Bereichen Biologie, Toxikologie und Medizin analysiert und daraus

eine Liste solcher Stoffe erstellt. Darin finden sich unter anderem Koffein, Opioide und andere Verbindungen, die Hirnfunktionen beeinflussen. Calabrese gründete einen wissenschaftlichen Verein und eine Zeitschrift, die sich mit Hormesis-Forschung befassen. Uns beide verbindet das Interesse daran, welche evolutionären Anpassungen Zellen und Organismen entwickelt haben, um auf Stresseinwirkungen zu reagieren, und inwiefern das für die menschliche Gesundheit bedeutsam ist.

Frühere Studien, die vermuten ließen, Obst- und Gemüseverzehr sei wegen der dabei aufgenommenen Antioxidanzien empfehlenswert, stehen nun erneut auf dem Prüfstand. Viele Wissenschaftler postulieren, dass es oft Hormesis-Effekte sind, was man früher für die Wirkung von »Radikalfängern« hielt. Immer deutlicher schält sich heraus: Durch pflanzliche Stoffe erzeugter zellulärer Stress ergänzt oder überdeckt sogar die Wirkungen der Antioxidanzien. Das heißt freilich nicht, die Neutralisierung reaktiver Sauerstoffspezies habe überhaupt keine Bedeutung. Vielmehr scheint hormetischer Stress biochemische Prozesse in Gang zu setzen, die ihrerseits darüber bestimmen, wann

# Die Widerstandskraft des Gehirns stärken

Wissenschaftler haben den Wirkmechanismus verschiedener hormetischer Pflanzenstoffe untersucht, die Neuronenfunktionen unterstützen oder verbessern. Galantamin, eine von Schneeglöckchen gebildete Substanz, erhöht den Acetylcholinspiegel (a), der im Gehirn von Alzheimerpatienten herabgesetzt ist. Wird Acetylcholin an der Synapse einer Nervenzelle freigesetzt, erregt es die Nervenzelle gegenüber, indem es an Rezeptoren auf deren Dornenfortsatz bindet. Koffein, Capsaicin aus scharfem Pfeffer und Catechine aus Tee (b) wirken auf Kanäle in der Nervenzellmembran ein, was den Einstrom von Kalziumionen in die Zelle zur Folge hat. Diese Ionen aktivieren bestimmte Gene und bringen die Zelle dazu, die entsprechenden Proteine herzustellen. Auch Sulforaphan aus Brokkoli, Curcumin aus Currypulver (c) und Resveratrol aus Weintrauben (d) haben diesen Effekt und beeinflussen zudem regulatorische Proteine wie Sirt 1. Infolgedessen entstehen antioxidative Enzyme und neurotrophe Faktoren, welche die Stressresistenz der Zelle erhöhen und eine kognitive Leistungssteigerung bewirken. Zudem wird der Abbau schadhafter Proteine forciert sowie der zelluläre Energiestoffwechsel reguliert.



Antioxidanzien für Hirnzellen verfügbar werden.

## Aus den Sprossen der Kurkumapflanze

Veranschaulichen lässt sich das an Befunden von Gregory Cole, Neurowissenschaftler an der University of California in Los Angeles. In den frühen 2000er Jahren experimentierte er mit Curcumin, das sich im Rhizom von Kurkumapflanzen findet und Bestandteil von Currysüppenpulver ist. Er hoffte, eine neue Methode zur Behandlung der Alzheimerkrankheit zu finden. Cole verabreichte genetisch veränderten Mäusen, die Alzheimersymptome aufwiesen, den Curryinhaltsstoff. Die Gehirne der so behandelten Tiere erwiesen sich als weniger stark von reaktiven Sauerstoffspezies (ROS) geschädigt und enthielten zudem weniger Beta-Amyloid-Ablagerungen.

Zunächst nahm Cole an, das Curcumin habe die ROS neutralisiert. Spätere Experimente meiner Gruppe und von anderen Wissenschaftlern zeigten jedoch, dass das Curcumin in den Hirnzellen vielmehr eine milde Stressreaktion provoziert. Dies löst die Produktion von antioxidativen Enzymen aus, welche sowohl ROS inaktivieren als auch der Ablagerung schadhafter Prote-

inbestandteile entgegenwirken. Die Wirkung von Curcumin auf das Gehirn ist demnach breit gefächert. Anderen Tierversuchen zufolge kann der Stoff zudem die schädlichen Effekte von Hirnschlägen ein-dämmen und sogar Depressionen und Angstzustände mildern helfen.

Auch in anderen Gewürzen kommen Inhaltsstoffe vor, die sich günstig auf das Gehirn auswirken. Knoblauch und scharfer Pfeffer enthalten Substanzen, die in Nervenzellmembranen bestimmte Kanäle öffnen und Kalzium einströmen lassen. Infolgedessen erhöht sich die elektrische Aktivität der Neurone, was laut Tierversuchen die Folgen eines Hirnschlags mildert. In Ländern mit ausgeprägtem Verzehr von Knoblauch und scharfem Pfeffer treten altersbedingte Hirnfunktionsstörungen auf-fallend selten auf. Es ist allerdings nicht klar, ob dafür tatsächlich die Gewürzbe standteile verantwortlich sind oder andere Aspekte der Ernährung beziehungsweise des Lebensstils.

All diese Studien scheinen Hormesis-Effekte zu belegen – und die alten, allzu einfachen Vorstellungen davon zu revidieren, wie reaktive Sauerstoffspezies und Antioxidanzien zusammenwirken. Curcumin wirkt

nicht direkt als Antioxidans. Es ruft vielmehr Enzyme auf den Plan, die diese Funktion ausüben. Ein solcher indirekter Mechanismus erfordert eine gute Feinabstimmung, was der Grund dafür sein könnte, dass antioxidative Nahrungsergänzungsmittel häufig unwirksam oder sogar schädlich sind.

## Vitaminpills durchkreuzen

### Trainingseffekte

Den Körper mit »Radikalfängern« zu überschwemmen, könnte beispielsweise seine natürlichen Stressreaktionen hemmen. In einer Studie aus dem Jahr 2009 zeigten Wissenschaftler der Friedrich-Schiller-Universität in Jena: Bei Männern, die einen Monat lang körperlich trainierten und außerdem antioxidative Nahrungszusätze erhielten, verbesserten sich weder die Blutzuckerregulation noch andere Gesundheitsindikatoren. Teilnehmer hingegen, die zwar trainiert, aber keine Antioxidanzien bekommen hatten, zeigten solche Verbesserungen. Nahrungsergänzungsmittel, die sich gegen oxidativen Stress richten, scheinen somit die gesundheitsfördernde Wirkung des Sports zunichtezumachen – möglicherweise, indem sie Hormesis-Effekte unterbinden.

Wir wissen immer besser, über welche biochemischen Reaktionsketten Pflanzeninhaltsstoffe wirken. Beispielsweise kennen wir zwei Proteine, Nrf2 und Keap1, die im Zytoplasma normalerweise aneinander gebunden sind. In Anwesenheit von Pflanzenstoffen wie Curcumin oder Sulforaphan, das in Brokkoli vorkommt, gibt Keap1 Nrf2 frei, das daraufhin in den Zellkern wandert. Dort aktiviert es Gene, die für antioxidative Enzyme kodieren. Indem Sulforaphan diese »Nrf2-Bahn« stimuliert, wirkt es also oxidativem Stress in der Zelle entgegen. In-vitro-Versuche haben gezeigt: Die Substanz schützt Zellen des Auges vor Schäden durch UV-Licht.

Der Zusammenhang zwischen pflanzlichen Substanzen und der Nrf2-Bahn hat auch meine eigenen Forschungen inspiriert. Im Jahr 2008 stieß ich zufällig auf das Buch eines indischen Wissenschaftlers, der über natürliche Pestizide pflanzlicher Herkunft forscht. Er listet darin mehr als 800 Verbindungen auf, die aus Pflanzen isoliert wurden und nachweislich Insekten davon abhalten, die jeweiligen Gewächse zu fressen. Meine Mitarbeiter und ich untersuchten etwa 50 dieser Stoffe darauf, inwieweit sie Signalwege der Stress-

reaktion zu aktivieren vermögen. Mehrere Verbindungen schalteten die Nrf2-Bahn an und zeigten in ihrer physiologischen Wirkung die zweiphasige Kurve, die für Hormesis typisch ist. Als besonders bemerkenswert erwies sich eine Verbindung namens Plumbagin, die in bestimmten tropischen Blütenpflanzen sowie in den Früchten der Schwarznuss (*Juglans nigra*) vorkommt. Wie wir an Mäusen feststellten, mindert Plumbagin sehr effektiv Hirnschäden und verbessert deutlich die Prognose im Fall eines Hirnschlags.

Als nächsten Schritt ziehen wir und andere Wissenschaftler in Betracht, die neuroprotektive Wirkung von Sulforaphan, Plumbagin und ähnlichen Stoffen an menschlichen Patienten zu untersuchen. Eine wichtige Rolle für die Zellintegrität spielen auch Sirtuine, eine Familie von Enzymen, die verschiedene Funktionen ausüben. Wie der Biologe Leonard Guarente vom Massachusetts Institute of Technology festgestellt hat, kann ein Sirtuin namens Sirt1 die Lebensdauer von Hefezellen verlängern.

Die Substanz Resveratrol, die etwa in roten Trauben sowie in Rotwein vorkommt, scheint Sirt1 zu aktivieren. Das Enzym

schaltet daraufhin mehrere Stoffwechselwege ein, die hormetische Wirkungen vermitteln. In Tierversuchen schützt Resveratrol vor Schäden in Gehirn und Rückenmark, die bei Durchblutungsstörungen etwa infolge eines Hirnschlags auftreten.

Doch nicht alle einschlägigen Forschungsergebnisse belegen positive Effekte der Substanz. Möglicherweise beschleunigt eine der Bahnen, die von Resveratrol aktiviert werden, das Absterben von Neuronen. All diese Untersuchungen werden ergänzt durch weitere Studien, laut denen der Zeitpunkt einer Stressreaktion darüber entscheidet, ob die Zelle von der Reaktion profitiert oder nicht. Genauso wie intensive körperliche Aktivität mit Erholungsphasen einhergehen muss, damit der Organismus sich wieder regenerieren kann, ist dies auch beim Verzehr pflanzlicher Stoffe nötig. Bei Obst- und Gemüsezufuhr tritt der Körper in einen so genannten Stress-Resistenz-Modus ein, in dem er nur eingeschränkt neue Proteine synthetisiert, den Abbau schadhafter Moleküle intensiviert und zelluläre Überlebensmechanismen in Gang setzt. Körperzellen können in diesem Zustand nur so lange verharren, bis sie wie-

der neue Proteine für andere Zwecke herstellen müssen. Sonst setzt ihnen die Stressreaktion derart zu, dass sie Schaden zu nehmen beginnen. Nach Ende des Stresses laufen Proteinsynthese und Zellwachstum wieder an.

In solchen Erholungsphasen bilden Neurone unter anderem neue Verbindungen untereinander aus. Forschungsergebnissen zufolge kann der Verzehr pflanzlicher Nahrung oder ein körperliches Training, gefolgt von einer Ruheperiode, die Bildung neuer Nervenzellen stimulieren. Diese gehen aus Stammzellen hervor, die im Hippocampus lokalisiert sind, einer Struktur tief im Gehirn. Die frisch ausdifferenzierten Neurone wachsen, bilden Verbindungen mit bereits existierenden Nervenzellen und verbessern so Lern- und Gedächtnisleistungen. Der normale nächtliche Schlaf könnte somit sicherstellen, dass sich Körperzellen von der täglichen physischen Aktivität beziehungsweise Einwirkung pflanzlicher Stoffe erholen.

## Medizin mit Uwhangchungsimwon

Mit dem Wissen um Hormesis können wir möglicherweise neue Arzneistoffe finden oder entwickeln – und im Nachhinein die

Wirkungsweise manchen Stoffs erklären, der sich in der Praxis als tauglich erwiesen hat. Die Blüten von Märzenbecher (*Leucotium vernum*) und Schneeglöckchen (*Galanthus*) beispielsweise enthalten Galantamin, das die Gedächtnisleistung steigert, indem es den Azetylcholinspiegel erhöht (Azetylcholin dient als Botenstoff zwischen Nervenzellen). Galantamin setzt Neurone unter milden Stress, was diese offenbar vor Degeneration schützt und ihre Fähigkeit verbessert, mit anderen Neuronen zu kommunizieren. Mittlerweile wird die Substanz zur Behandlung der Alzheimerkrankheit eingesetzt, da sie deren Symptome zu lindern vermag.

Neue Hinweise auf hormetisch wirkende Arzneistoffe könnte ein systematisches Durchforsten der Heilkräuterkunde liefern. Eine Substanz namens Uwhangchungsimwon wird in der traditionellen koreanischen Medizin eingesetzt, um Hirnschlagopfer zu behandeln. Vermutlich fördert sie das Überleben von Hirnneuronen, indem sie eine Stressreaktion auslöst und die Produktion von Proteinen wie Bcl-xL ankurbelt, die das Absterben der Zellen verhindern. Auch die Inhaltsstoffe von halluzinogenen Pflanzen lohnen einen genau-

eren Blick. Unter kontrollierten klinischen Bedingungen in mittlerer Dosierung verabreicht, können sie möglicherweise Angstzustände, Depressionen und Drogensüchte behandeln helfen.

Das Konzept der Hormesis ist allerdings nicht unumstritten. Einige Wissenschaftler fragen sich, ob man überhaupt unterscheiden kann, wann ein nützlicher Effekt endet und ein schädlicher beginnt. Wann genau eine Reaktion toxisch wird, könnte von individuellen Gegebenheiten abhängen und somit von Mensch zu Mensch differieren – was es schwierig machen würde, hormetische Arzneimitteltherapien zu entwickeln. Skepsis kommt vor allem angesichts der Idee auf, ionisierende Strahlen hormetisch anzuwenden – niedrig dosierte Röntgenstrahlung hat sich in Tierversuchen als gesundheitlich günstig erwiesen. Doch mehrere wissenschaftliche Gremien sind der Ansicht, bei ionisierender Bestrahlung gebe es keine unbedenkliche Dosis.

Um die fachliche Bedeutung von Hormesis-Effekten beurteilen zu können, braucht es sorgfältig durchgeführte, randomisierte klinische Studien. Denn viele Heilkräuter werden ohne substanziellem Nachweis ihrer Wirksamkeit vertrieben.

Pflanzenstoffe, die über zellulären Stress wirken, könnten Vorteile gegenüber herkömmlichen Pharmaka besitzen, die normale Zellfunktionen stören und daher teils schwere Nebenwirkungen haben. Diazepam beispielsweise, der Wirkstoff von Valium, lindert zwar Angstzustände, macht zugleich aber auch benommen. Die Arznei lässt verstärkt Chloridionen in Nervenzellen einströmen, was diese hyperpolarisiert und somit weniger erregbar macht. Der Effekt hält so lange an, wie die Substanz am Wirkort verbleibt, bis sie beispielsweise verstoffwechselt ist. Von hormetisch wirkenden Medikamenten erhoffen wir uns, dass sie keine solche »Holzhammerwirkung« entfalten und weniger Nebeneffekte zeitigen.

Versuche an genetisch veränderten Tieren, die Symptome neurodegenerativer Erkrankungen entwickeln, lassen baldige Fortschritte in diesem Bereich erwarten. Möglicherweise liefern einmal Apfelschalen, Walnüsse und Currysünder die Inhaltsstoffe, aus denen völlig neue Methoden für die Therapie von Hirnerkrankungen erwachsen. ↵

# GESUND ESSEN

Ein medizinischer Blick auf den Teller

Herzkrankheiten | Helfen Vitaminpills und Co?

Clean Eating | Ernährungstipps mit Fragezeichen

Orthorexie | Am Rand zur Essstörung

HIER DOWNLOADEN

FÜR NUR  
€ 4,99



FINGER WEG

# 10 Pflanzen, die Sie unbedingt **meiden sollten**

von Daniel Lingenhöhl

Manchmal reicht es schon, bei Regen unter einem Baum zu stehen, um unerträgliche Schmerzen zu erleiden. Bei anderen Pflanzen kann bereits eine zerbißene Frucht töten. Und andere verärgern die Haut noch Tage später. Wir stellen zehn besonders gefährliche Pflanzenarten vor.

Bei Fragen und Notfällen können Sie sich unter 0228 19240 an die Informationszentrale gegen Vergiftungen wenden.

(Spektrum – Die Woche, 52/2018)



01



## Wunderbaum – Rizinus taugt auch als Terrorwaffe

Vielen Menschen dürfte der Begriff »Rizinusöl« geläufig sein – eine durchsichtige bis gelbliche Flüssigkeit, die unter anderem als Abführmittel genommen wird. Weniger bekannt war dagegen wohl lange, dass die Samen des Wunderbaums oder Rizinus (*Ricinus communis*) eine tödliche Gefahr darstellen und sogar als Biowaffe verwendet werden können. In Köln wurde im Juni 2018 ein Terrorverdächtiger verhaftet, der womöglich genau dies vorhatte. Der Wirkstoff namens Rizin, ein Protein, ist fettunlöslich und geht deshalb ins harmlose Rizinusöl nicht über. Schon der Verzehr weniger Samen kann dagegen den Tod durch Kreislaufversagen binnen weniger Stunden auslösen – und leider ist kein Gegengift bekannt. *Ricinus communis* wird oft als Ziergewächs in Gärten gepflanzt, überlebt aber hier zu Lande den Winter meist nicht. Und wer Kinder hat, sollte ohnehin darauf verzichten.

02



## Diptam – gefährlich in Verbindung mit Sonnenstrahlung

Brennender Busch: Diesen Namen trägt der Diptam (*Dictamnus albus*) völlig zu Recht. Denn die sehr attraktive Pflanze aus der Familie der Rautengewächse produziert ätherische Öle, welche die extrem flüchtige und hochentzündliche Flüssigkeit Isopren enthalten: Die Dämpfe sind schwerer als Luft und sammeln sich unterhalb der Blütenrispe. An heißen Tagen kann es durch Brennglaswirkung an den Tröpfchen sogar zur Selbstentzündung kommen, woraufhin eine blaue Flamme rasch an den Blüten emporzüngelt – allerdings ohne sie zu beschädigen. Für Menschen sind vor allem die Eurocumarine heikel, die sich bei Berührung der Borstenhaare auf die Haut ergießen. Scheint die Sonne auf diese Stellen, können noch Tage später schwere und lang anhaltende Verbrennungen entstehen, weil die Haut hier besonders lichtempfindlich wurde. Die Art ist in Mitteleuropa selten und wächst bevorzugt an Waldrändern, an die sich sonnige Trockenrasen anschließen.



## 03 Riesenbärenklau – kann an heißen Tagen Atemnot auslösen

Der Riesenbärenklau (*Heracleum mantegazzianum*) gehört wahrscheinlich zu den bekanntesten Giftpflanzen, denn er erfreut sich großer medialer Aufmerksamkeit. Ursprünglich stammt er aus dem Kaukasus, doch wegen seiner stattlichen Größe wurde er regelmäßig als Zierpflanze nach Europa eingeführt. Imkern empfahl man die Pflanze als Bienenweide, Förster sollten sie als Unterwuchs im Wald aussäen. Zu den Schattenseiten des Riesenbärenklaus zählt dagegen nicht nur seine mittlerweile unkontrollierte Ausbreitung, sondern vor allem, dass er gesundheitliche Risiken birgt. Wie der Diptam enthält er Eurocumarine und kann daher bei Berührung die Haut verätzen. An heißen Tagen gasen diese flüchtigen Inhaltsstoffe auch aus und reichern sich um die Pflanze an: Wer längere Zeit hier steht, kann Atemnot entwickeln, die in einer wochenlangen Bronchitis enden kann. Häufig bekämpfen Behörden daher die Pflanzen an Standorten, an denen viele Menschen vorbeikommen.



## Zerberusbaum – mörderische Samen

Wohl keine Pflanze hat mehr Menschenleben durch Mord und Suizid beendet als der Zerberusbaum (*Cerbera odollam*). Er heißt nicht umsonst umgangssprachlich auch Selbstmordbaum. Allein im indischen Teil seines Verbreitungsgebiets sollen jedes Jahr mehrere Dutzend bis hunderte Morde auf das Konto dieses Hundsgiftgewächses zurückgehen. Auch in Deutschland gab es schon entsprechende Versuche. Besonders giftig sind die Samen des Baums. Sie enthalten Glykoside, welche die Schlagkraft des Herzens steigern und die Herzfrequenz senken. Unbehandelt führen die Stoffe innerhalb von sechs Stunden zum Herzstillstand; zuvor treten Symptome wie Würgereiz, Magen-Darm-Beschwerden und heftiger Durchfall auf. Das verantwortliche Cerberin-Gift kann nur durch Chromatografie und Massenspektrometrie nachgewiesen werden, weshalb die Dunkelziffer der damit verübten Morde hoch sein dürfte. Es gibt Gegenmaßnahmen, sie müssen aber schnell eingeleitet werden.



## Schierling – der Schierlingsbecher tötet wirklich

Vom »Schierlingsbecher« haben zumindest geschichtlich bewanderte Menschen sicherlich schon gehört. In diesem Gefäß befand sich in der Antike ein Getränk aus dem Saft des Gefleckten Schierlings (*Conium maculatum*), den zum Tode Verurteilte trinken mussten oder Menschen mit suizidaler Absicht zu sich nahmen. Sokrates wurde damit beispielsweise hingerichtet. Der Gefleckte Schierling gehört zu den häufigsten und potentesten Giftpflanzen Mitteleuropas; oft siedelt er sich auf typischen Ruderalfächen wie Brachen, Straßenrändern oder Schuttplätzen an. Landwirte bekämpfen ihn allerdings, da er über Grünfutter auch das Vieh töten kann. Die Pflanze produziert das Pseudoalkaloid Coniin, das ähnlich wie Nikotin oder Curare wirkt und das motorische Rückenmarkszentrum lähmt. Der Tod tritt durch Atemstillstand bei vollem Bewusstsein ein. Der Doldenblütler kann theoretisch mit Wiesenkerbel oder Petersilie verwechselt werden, er stinkt aber intensiv nach Mäusen und brennt im Mund.



## Schwarze Tollkirsche – schön durch Leiden?

»Dosis facit venenum« – oder: Die Dosis macht das Gift. Das gilt bei manchen Giftpflanzen wie der Schwarzen Tollkirsche (*Atropa belladonna*) sehr wohl. Das in den schwarzen Früchten enthaltene Alkaloid Atropin wird seit Längerem in der Medizin eingesetzt, unter anderem als Gegenmittel gegen das berühmt-betrügtige E 605. Außerdem dient es als Medikament bei kolikartigen Schmerzen des Verdauungstrakts oder der Gallenwege. Und in der Augenheilkunde setzt man es ein, um die Pupillen für Untersuchungszwecke zu vergrößern. Dieser Effekt führte womöglich zum lateinischen Artnamen *belladonna*: Angeblich haben Frauen früher die Tollkirschen gegessen, um ihre Pupillen zu weiten, was sie schöner machen sollte. Die Früchte schmecken leicht süßlich, deshalb sind sie für Kinder gefährlich. Vergiftungen durch *Atropa belladonna* nehmen hier zu Lande eine führende Position ein. Schon drei bis vier Beeren können bei Kindern tödlich wirken. In den ersten Stunden nach Verzehr helfen Magenspülungen und Aktivkohle, Ärzte können ein Gegengift verabreichen. Bei Verdacht auf Tollkirschenverzehr sollte stets ein Arzt aufgesucht werden!

07



## Australische Brennnessel – wochenlange Schmerzen durch Nesseln

Unsere heimische Brennnessel (*Urtica dioica*) brennt, wenn man mit ihren Nesselaaren in Berührung kommt. Meist lässt der Schmerz aber schnell nach, und die freigesetzte Flüssigkeit hinterlässt nur rote Quaddeln auf der Haut. Die Australische Brennnessel oder Gympie (*Dendrocnide moroides*) ist da schon von anderem Kaliber: Sie enthält Moroidin, ein Peptid, das im schlimmsten Fall über Monate heftig brennende Schmerzen beim Menschen auslösen kann. Eine Biologin drückte die Begegnung mit der Pflanze drastisch aus: »Das ist der schlimmste Schmerz, den man sich vorstellen kann. Es fühlt sich an wie heiße Säure auf der Haut und gleichzeitige Elektroschocks.« Schon der bloße Aufenthalt in der Nähe der Brennnessel reicht nach gewisser Zeit aus, um Atembeschwerden auslösen, weil ständig Brennhaare abbrechen und durch die Luft treiben. Sie sind so hart, dass sie sogar normale Kleidung durchdringen können. Als Gegenmaßnahme werden Enthaarungsstreifen empfohlen, welche die Brennhaare aus der Haut ziehen – sonst entlassen sie kontinuierlich über längere Zeit ihr Gift.

08



## Paternostererbse – Schmuckstück mit tödlicher Wirkung

Die leuchtend rot-schwarzen Samen des Paternosterbaums (*Abrus precatorius*) werden gerne zu schmückenden Hals- oder Gebetsketten verarbeitet. Doch darauf herumkauen sollte man nicht: Bereits eine Erbse der zu den Hülsenfrüchten zählenden Pflanze kann wegen des darin enthaltenen Toxins Abrin tödlich wirken. Es zählt zu den potentesten Giften der Pflanzenwelt und wirkt ähnlich wie das Rizin des Wunderbaums. Schon 0,01 Mikrogramm pro Kilogramm Körpergewicht reichen aus, um einen Erwachsenen zu töten. Mit einem Gramm Abrin könnte man 1,5 Millionen Menschen umbringen. Es handelt sich um ein sehr starkes Stoffwechselgift, das die Proteinbiosynthese in den Zellen zerstört – und damit einen grundlegenden Prozess im Körper. Werden reife und intakte Erbsen verschluckt, stellt dies allerdings erst einmal keine Gefahr dar, denn sie passieren den Magen-Darm-Trakt wegen ihrer sehr harten Schale unverdaut. Für die Ketten werden die Samen jedoch durchbohrt, was die Vergiftungsgefahr erhöht.



## Eisenhut – eine der giftigsten Pflanzen Europas

Der Blaue Eisenhut (*Aconitum napellus*) ist so attraktiv wie giftig. Eltern sollten es tunlichst vermeiden, die Stauden im eigenen Garten anzupflanzen. Denn die in allen Pflanzenteilen vorhandenen Diterpen- und Esteralkaloide können sogar über unverletzte Haut und Schleimhäute aufgenommen werden – etwa wenn Kinder mit den großen Blüten spielen. Das Toxin beschleunigt den Herzrhythmus; der Tod tritt meistens durch Ersticken ein, weil das Gift die obere Atemmuskulatur lähmt. Der Eisenhut gilt seit der Antike als beliebtes Mordwerkzeug, zumal es bis heute kein geeignetes spezifisches Gegenmittel gibt. Erste Vergiftungsercheinungen zeigen sich durch Brennen und spätere Taubheit der Haut, bei Verschlucken kommt es zu Kälteempfindlichkeit, extremer Übelkeit, Darmkoliken, nervöser Erregung, Ohrensausen, Schwindel, Herzrhythmusstörungen und Krämpfen. Ihren Zweitnamen »Wolfswurz« erhielt die Pflanze womöglich, weil früher Jäger damit vergiftete Pfeilspitzen genutzt haben sollen, um Jagd auf Wölfe zu machen.

10



## Manchineelbaum – Äpfelchen des Todes

»Manzanilla de la muerte« – Äpfelchen des Todes: So lautet der spanische Name des Manchineelbaums (*Hippomane mancinella*), einer der giftigsten Pflanzen der Erde. Fast alles an diesem Wolfsmilchgewächs ist toxisch. Stellt man sich bei Regen unter, verätzt man sich die Haut und erblindet unter Umständen, weil Milchsaft aus den Blättern austritt. Wird das Holz verbrannt, tritt durch den Rauch ebenfalls Erblindung ein (wobei diese meist nur zeitweilig ist). Und wer die Früchte isst – die tatsächlich an kleine Äpfel erinnern –, kann daran sterben. Erzählungen aus der Zeit der frühen Kolonialisierung Lateinamerikas berichten davon, dass Gefangene an die Bäume gefesselt wurden, um sie dadurch langsam zu Tode zu foltern. In ihrer ursprünglichen Heimat, an den Küsten Zentralamerikas, in der Karibik, im nördlichen Südamerika und in Florida, sind viele Manchineelbäume daher mit Warnschildern oder einem roten X gekennzeichnet, um auf die Gefahr aufmerksam zu machen. Trotz ihrer Toxizität sind diese Wolfsmilchgewächse durchaus beliebt: Sie stabilisieren Dünens und verhindern damit die Erosion von Stränden.

- > Bienengigant nach 38 Jahren wiederentdeckt
- > Neurone, die uns nicht schlafen lassen
- > Wie die Phönizier dem Silber nachjagten

TITELTHEMA: KOSMISCHE KOLLISIONEN

## Was gibt es Neues über Meteoriteinschläge?

Halben Meteoriten einst beim Beginn des Lebens – und tötete wirklich einer von ihnen die Dinosaurier? 5 überraschende Einsichten und Hypothesen rund um Volltreffer aus dem All.



### PATIENTENVERSORGUNG

Manipulationsverdacht bei deutschlandweiter Psychiatrie-Studie



### NIKAB UND BURKA

Verhüllung in der Forschung



### VIRUNGA-NATIONALPARK

Afrikas Kronjuwel in Gefahr

Im Abo nur  
**0,92 €**  
pro Ausgabe

Jetzt bestellen!

**Das wöchentliche  
Wissenschaftsmagazin**  
als Kombipaket im Abo:  
Als App und PDF

**HIER ABONNIEREN!**