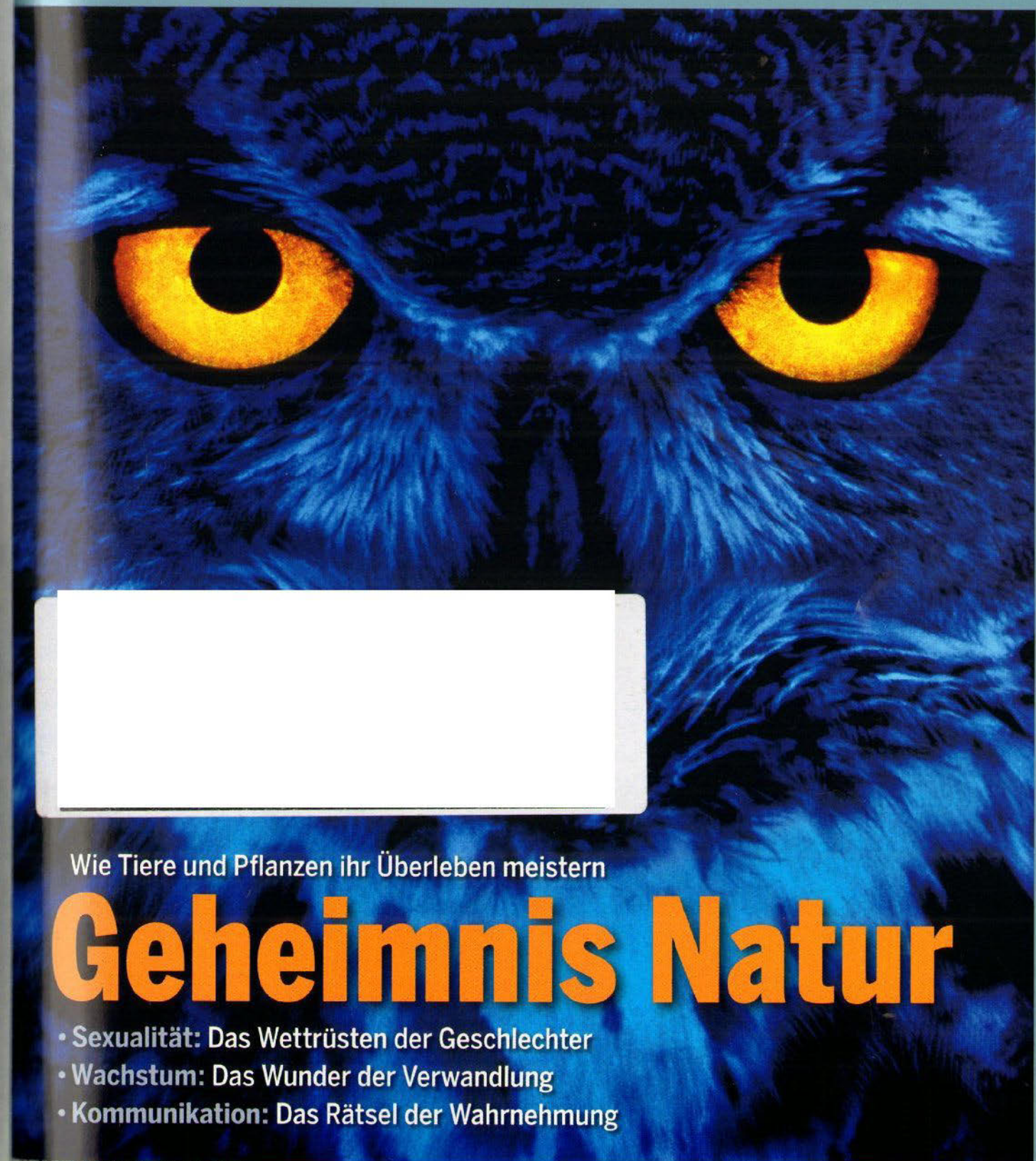


GEO kompakt

Nr. 5

Die Grundlagen des Wissens



Wie Tiere und Pflanzen ihr Überleben meistern

Geheimnis Natur

- Sexualität: Das Wettrüsten der Geschlechter
- Wachstum: Das Wunder der Verwandlung
- Kommunikation: Das Rätsel der Wahrnehmung



19647 2308006 50005

www.GEOkompakt.de

Gerd-R. Lang, Uhrmachermeister und Gründer von Chronoswiss. Nationalpark Berchtesgaden. 30. August 2005, 7.58 Uhr.

semper ante me fecit.



Die Zeit ist immer im Fluss. Wer keine hat, kann sich auch keine nehmen. An einem Ort, der zum Verweilen einlädt, finden wir Zeit, den Augenblick zu genießen. Und spüren, was wirklicher Luxus ist: über Stunden und Minuten so zu verfügen, wie es uns gefällt.


CHRONOSWISS
Faszination der Mechanik

Erleben Sie die Faszination mechanischer Uhren. Fordern Sie das „Buch mit dem Tick“ an bei Chronoswiss, Elly-Staegmeyer-Str. 12, 80999 München, Tel. +49(0) 89 89 26 07-0, Fax +49(0) 89 812 12 35, www.chronoswiss.de.

Gruener + Jahr AG & Co KG, Druck- und Verlagshaus,
Am Baumwall 11, 20459 Hamburg, Postanschrift
für Verlag und Redaktion: 20444 Hamburg.
Telefon 040 / 37 03-0, Telefax 040 / 37 03 56 47, Telex 21 95 20.
Internet: www.GEOkompakt.de



Liebe Leserin, lieber Leser,

mein Lieblingsorganismus in diesem Heft ist der Kleine Leberegel: ein knapp ein Zentimeter langer Wurm, der in den Gallengängen etwa von Schafen lebt. Nicht gerade ein Kuscheltier, das stimmt, aber was dieser Parasit alles anstellt, um zu bestehen und sich fortzupflanzen, ist so komplex, dass man versucht ist, von „Raffinesse“ zu sprechen, um die Überlebensstrategie dieses Winzlings angemessen zu würdigen (auch wenn Biologen bei so vermenschelnden Attributen sofort zusammenzucken).

Denn der Kleine Leberegel, ein Wesen mit einfachem Hirn und ohne höher ausgeprägte Sinnesorgane, verbringt sein Leben nicht in einem Wirtstier allein, sondern befällt im Verlauf eines Zyklus von rund acht Monaten nach und nach auch noch Schnecken und Ameisen. Dabei verwandelt er sich insgesamt sechsmal – unter anderem in eine Larve, die mit ihrem Schwanz rudern kann, und einen „Hirnwurm“, der seinen Wirt dazu bringt, gewissermaßen „Selbstmord“ zu begehen – und manipuliert seine Versorger so geschickt, dass deren unwillkürliche Reaktionen seinem Fortkommen und seiner Vermehrung in idealer Weise dienen.

Ich staune über die ungeheure Vielfalt und Komplexität der Natur, wenn ich von solchen Wesen lese – und ich habe während der Produktion an diesem Heft häufig gestaunt. Etwa über Pflanzen, die bei Raupenbefall am Speichel der jeweiligen Schädlinge erkennen, wer da an ihnen knabbert, und dann Duftstoffe freisetzen, mit denen sie die Feinde dieser Raupen alarmieren, damit die sie niedermachen.

Oder über die Männchen der Roten Spottdrossel, die in ihrem Gesang mehr als 2000 Strophen anzustimmen vermögen, mit deren Hilfe sie Weibchen anlocken und Konkurrenten verschrecken. Oder über die Ameisen der australischen Art *Camponotus inflatus*, bei denen bestimmte Tiere von Artgenossen mit Nektar und Honigtau derart gemästet werden, dass ihre Hinterleiber gigantisch anschwellen: lebende Speisekammern, die ihren Vorrat in Notzeiten wieder hervorwürgen. Oder über die insgesamt 10 000 Kilometer langen Wurzeln, die eine Roggenpflanze innerhalb von vier Monaten entwickelt, um Wasser und Mineralsalze aus dem Boden saugen zu können.

Verblüffenden Strategien wie diesen ist das vorliegende Heft gewidmet. Es erzählt von Anpassung und Konkurrenzkampf, von bewundernswerten Tricks und oft noch raffinierten Gegenmaßnahmen. Es erzählt, wie Tiere und Pflanzen täuschen, betrügen und überlisten, wie sie wachsen und kommunizieren, sich versorgen und vermehren.

Denn das ist das Prinzip der belebten Natur: als Individuum länger zu existieren als der Konkurrent und sich erfolgreicher fortzupflanzen. Ein Prinzip, das sich in den vergangenen 3,5 Milliarden Jahren entwickelt hat. Und das einen jeden Tag von Neuem in Staunen zu versetzen vermag. Wenn man nur genau genug hinschaut.

Ihr

Michael Schaper

HERAUSGEBER

Peter-Matthias Gaebe

CHEFREDAKTEUR

Michael Schaper

GESCHÄFTSFÜHRENDE REDAKTEURE

Martin Meister, Claus Peter Simon

CHEFS VOM DIENST

Hans Heinrich Ziemann,
Rainer Droste (Technik)

TEXTREDAKTION

Jörn Auf dem Kampe,
Jürgen Bischoff, Dr. Henning Engels

ART DIRECTOR

Torsten Laaker

BILDREDAKTION

Roman Rahmacher,
Freie Mitarbeit: Tatjana Stapelfeldt

VERIFIKATION

Susanne Gilges, Bettina Süßemilch, Dr. Arno Nehlsen;
Freie Mitarbeit: Dr. Eva Danulat, Friederike Eggers

WISSENSCHAFTLICHE BERATUNG

Götz Froeschke, Rainer Harf

TEXT-MITARBEIT

Dr. Jürgen Broschart, Uta Henschel, Jens Schröder;
Freie Mitarbeit: Philipp Crone, Ute Eberle, Bleike General,
Dr. Matthias Glaubrecht, Till Hein, Katharina Kramer,
Dr. Erwin Lausch, Harald Martensen, Martin Paetsch,
Dr. Catarina Pietschmann, Monika Rößiger,
Dr. Stefanie Rudolph, Klaus Wilhelm

ILLUSTRATION

Freie Mitarbeit: Andreas Bock, Jochen Stuhmann,
Eric Tscherne, Tim Wehrmann, Hark Weidling

KARTOGRAPHIE

Stefanie Peters

SCHLUSSREDAKTION

Ralf Schulte;
Assistenz: Hannelore Koch

REDAKTIONSASSISTENZ: Ursula Arens

HONORARE: Angelika Györfy

BILDARCHIV: Bettina Behrens, Gunda Lerche,

Gudrun Lüdemann, Peter Müller

REDAKTIONSBÜRO NEW YORK: Brigitte Barkley;

Maria Masri (Leitung), Wilma Simon, Katherine D. Clad (Sekretariat);

Lexington Avenue, New York, NY 10017-55 14, Tel. 001-212-499-81 00,

Fax 001-212-499-81 05, E-Mail: geo@geo-ny.com

Verantwortlich für den redaktionellen Inhalt:

Michael Schaper

VERLAGSLEITUNG: Dr. Gerd Brüne, Ove Saffé

ANZEIGENLEITUNG: Anke Wiegand

VERTRIEBSLEITUNG: Ulrike Klemmer

MARKETINGLEITER: Jan-Piet Stempels

HERSTELLER: Peter Grimm

ANZEIGENABTEILUNG: Anzeigenverkauf: Ute Wangermann,

Tel. 040 / 37 03 29 32, Fax: 040 / 37 03 57 73; Anzeigendisposition:

Carola Kitschmann, Tel. 040 / 37 03 23 93, Fax: 040 / 37 03 56 04

ANZEIGENREPRÄSENTANT DES QUARTALS: Fred Feuerstein

Es gilt die Anzeigenpreisliste Nr. 1/2005

Der Export der Zeitschrift GEO kompakt und deren Vertrieb im Ausland

ist nur mit Genehmigung des Verlages statthaft. GEO kompakt darf nur

mit Genehmigung des Verlages in Leserkreisen geführt werden.

Bankverbindung: Deutsche Bank AG Hamburg,

Konto 0122800, BLZ 200 700 00

Heft-Preis: 8,00 Euro • ISSN-Nr. 3-570-19572-4

© 2005 Gruener + Jahr Hamburg

ISSN 1614-6913

Litho: 4ma Media, Hamburg

Druck: Mohndruck Media, Gütersloh

Printed in Germany

GEO-LESERSERVICE

WENIGEN AN DIE REDAKTION

Telefon: 040 / 37 03 20 73, Telefax: 040 / 37 03 56 48

E-Mail: briefe@geo.de

ABONNEMENT- UND EINZELHEFTBESTELLUNG

ABONNEMENT DEUTSCHLAND

Jahres-Abonnement: 29 €

BESTELLUNGEN:

Gruener + Jahr AG & Co KG

Postfach 10 000 Hamburg

Telefon: 01805 / 861 80 03*

(12 Cent / Min.)

Web-Shop: www.MeinAbo.de/service

ABONNEMENT ÖSTERREICH

Postfach 5, 5960 Wolfurt

Telefon: 0820 / 00 10 85

Telefax: 0820 / 00 10 86

E-Mail: geo@aboservice.at

ABONNEMENT SCHWEIZ

Postfach, 6002 Luzern

Telefon: 041 / 329 22 20

Telefax: 041 / 329 22 04

E-Mail: geo@leserservice.ch

ABONNEMENT ÜBRIGES AUSLAND

Postfach, CH-6002 Luzern;

Telefon: 041 / 329 22 20, Telefax: 041 / 329 22 04

E-Mail: geo@leserservice.ch

BESTELLADRESSE FÜR GEO-BÜCHER, GEO-KALENDER, SCHUBER ETC.

DEUTSCHLAND

Postfach-Service

Postfach Haas-Strasse 5

Postfach Neckarsulm

Telefon: 01805 / 06 20 00

(12 Cent / Min.)

Telefax: 01805 / 08 20 00

(12 Cent / Min.)

E-Mail: service@guj.com

BESTELLUNGEN PER TELEFON UND FAX FÜR ALLE LÄNDER

Telefon: 0049-1805 / 06 20 00, Telefax: 0049-1805 / 08 20 00

E-Mail: service@guj.com

SCHWEIZ

GEO-Versand-Service 50/001

Postfach 1002,

CH-1240 Genthof 42

ÖSTERREICH

GEO-Versand-Service 50/001

Postfach 5000,

A-1150 Wien



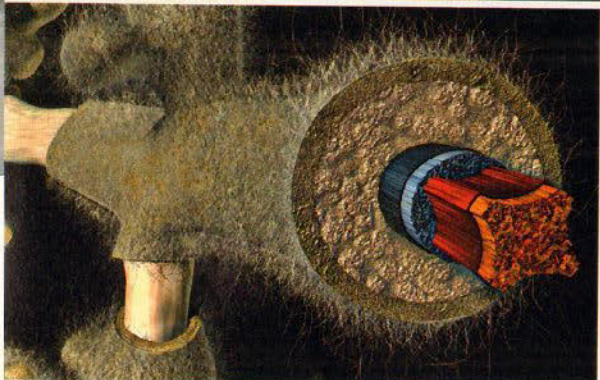
Kunst des Überlebens

Seine ungewöhnliche Färbung macht den Tukan im bunten Regenwald fast unsichtbar. Tarnung gehört zu einem wichtigen Naturprinzip – der Fähigkeit, sich unter Konkurrenten und Feinden zu behaupten. **Seite 6**



Die Helfer der Pflanze

Weil Blumen sesshaft sind, können weder sie noch ihre Samen sich aktiv ausbreiten. Sie sind daher auf Unterstützung angewiesen. **Seite 32**



Lange Leitung Bäume holen mit den Wurzeln Wasser und Mineralsalze aus dem Boden und befördern sie bis zu 130 Meter hoch. Das geht nur mithilfe einer speziellen Pumpe. **Seite 66**



Streit der Geschlechter Sex in der Natur ist nicht romantisch, sondern gefährlich, oft bizarr und nicht selten brutal. Weshalb vermehren sich die meisten Tiere und Pflanzen dennoch auf diese Weise? **Seite 22**



Zwei Körper Warum machen viele Tiere eine komplette Verwandlung durch, leben erst als Larve, dann als erwachsenes Individuum? **Seite 84**

Prinzip Natur Die Kunst des Überlebens

Das Rätsel des Lebens Wie gelingt es der Natur, aus wenigen Elementen komplexe Wesen zu schaffen?

6

Bäume Wie Stoffe von der Wurzel zum Blatt befördert werden – und wieder zurück

66

August Kekulé Die Suche nach der Strukturformel

72

fortpflanzung >>>

Sex Um Partner zu finden, nehmen Tiere jede denkbare Anstrengung auf sich – obwohl es auch ohne funktioniert **22**

Gesang Wenn Vögel morgens zwitschern, geht es nicht etwa um reine Lebensfreude, sondern um Sex und Macht **28**

Pflanzenverbreitung An Fallschirmen oder im Darm von Tieren: Samen nehmen oft ungewöhnliche Wege **32**

Carl Linnaeus Einer, der Ordnung ins Leben brachte **42**

versorgung >>>

Der Fluss der Energien Weshalb das Leben ohne Sonnenlicht und die Kälte des Alls nicht möglich wäre **48**

Jagd Der Tod, der das Leben bringt **58**

wachstum >>>

Entfaltung Wie aus dem Samen ein Kürbis wird **78**

Metamorphose Warum sich eine Raupe in einen Schmetterling verwandelt **84**

Martensteins Welt (1) Über täuschende Pflanzen, Marilyn Monroe und ratlose Bernhardiner **90**

bewegung >>>

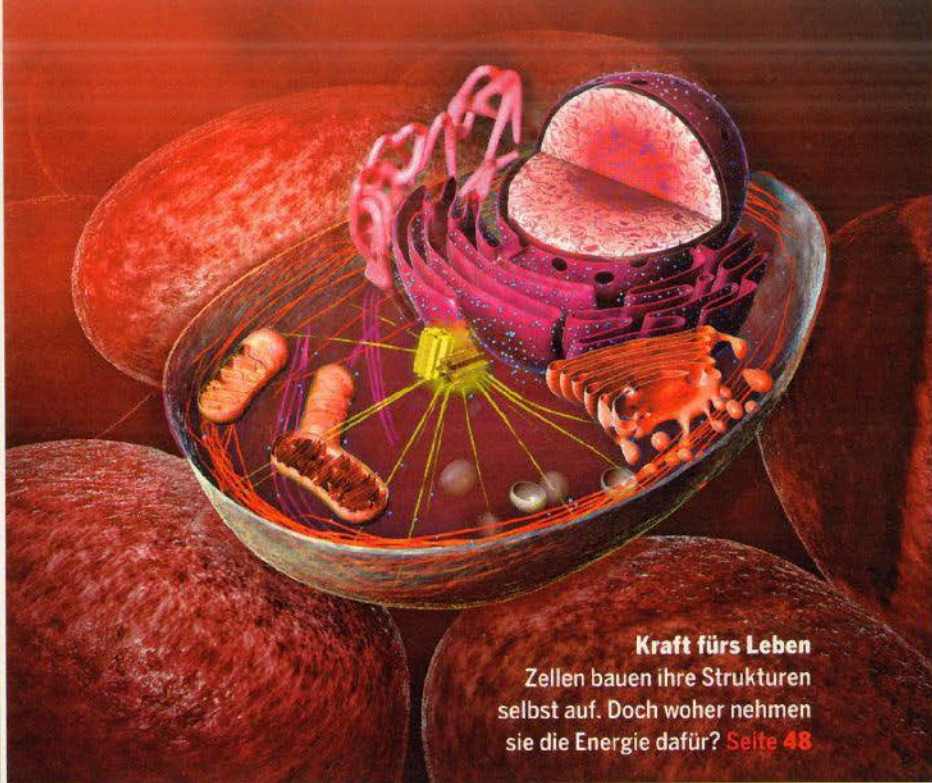
Körperbau Flug bei Dunkelheit, Sprints mit 100 km/h: die erstaunlichen Bewegungsapparate der Tiere **92**

Flora mobil Auch Pflanzen können sich regen – und das ohne Muskeln **100**

Henri Dutrochet Die rätselhafte Kraft der Osmose **104**



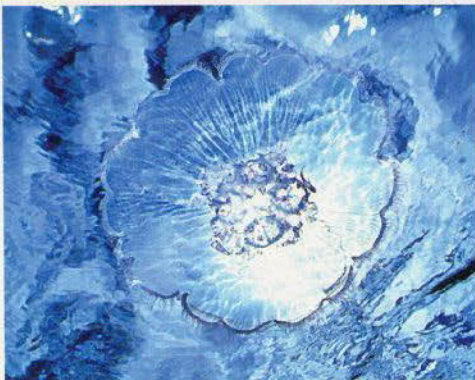
Bild der Welt Tintenfische besitzen Linsenaugen ähnlich wie Menschen. Und doch hat die Natur beide Sehorgane unabhängig voneinander erfunden. **Seite 116**



Kraft fürs Leben
Zellen bauen ihre Strukturen selbst auf. Doch woher nehmen sie die Energie dafür? **Seite 48**



Regenwald Je Hektar existieren hier bis zu 600 Baumarten. 50 bis 75 Prozent aller Spezies leben in diesem Ökosystem. Was bewirkte den Artenreichtum? **Seite 144**



Ozeane Kein Lebensraum hat unterschiedlichere Körperformen hervorgebracht – etwa Quallen, deren Mund gleichzeitig After ist, schwebende Kleinstpflanzen, riffbauende Korallen. **Seite 128**



Tempo Das Zusammenspiel von Knochen, Gelenken und Muskeln bestimmt bei Tieren deren Geschwindigkeit – und entscheidet häufig über Leben und Tod. **Seite 58**

information + kommunikation >>>

Die Sprache der Pflanzen Wie Gewächse Feinde abschrecken und Nachbarn warnen

Innere Uhr Der Taktgeber in Tieren und Pflanzen

Sehsinn Weshalb die Natur das Auge mehr als 50 Mal erfunden hat

Intelligenz Können Tiere denken?

106

112

116

124

Glossar/Register Fachbegriffe auf einen Blick

Stammbaum Die Systematik des Lebens

Baustoffe Wie die Natur sich selbst erbaut

Impressum

Vorschau

Bildnachweis

162

165

168

3

170

170

zusammenleben >>>

Lebensraum Meer Vielfalt unter Normalnull

Alexander von Humboldt Der erste Ökologe

Laubwald Das perfekt verknüpfte Nahrungsnetz

Ökosysteme Wälder, Grasland, Wüste, Seen, Flüsse und Meer – Lebensräume im Überblick

Parasiten Die Schmarotzer in uns

Martensteins Welt (2) Über fliegende Penisse und Teamwork bei Makrelen

128

136

138

144

156

160

Über dieses Heft:

Die wichtigsten Fachbegriffe werden im Glossar ab Seite 162 kurz erklärt. Wo diese Begriffe in den Beiträgen erstmals erwähnt werden (oder wo sie zum Verständnis einer Textpassage besonders wichtig sind), sind sie **blau** hervorgehoben. Zum Glossar gehört ein Register, das wiedergibt, auf welchen Seiten die Begriffe vorkommen. Vom Glossar und Register ausgenommen sind die Bildunterschriften und Kolumnen.

Das Prinzip Natur

Leben vollbringt etwas, das mit den Gesetzen der Chemie und Physik allein nicht zu erklären ist: Aus nur wenigen chemischen Elementen entsteht eine immense Vielfalt komplex gebauter Moleküle, die sich zu Zellen organisieren und Millionen unterschiedlicher Arten von Pflanzen und Tieren formen. All diese Organismen werden Teil vernetzter ökologischer Systeme, in denen sie Nischen finden, sich behaupten und fortpflanzen müssen. Sie haben eine erstaunliche Fülle von Strategien entwickelt, um den Überlebenskampf zu meistern – viele der auffälligsten sind bei Tieren zu beobachten



Die Giftige und der Krebs

Ein sicheres Zuhause bietet die Seeanemone dieser Garnele. Seine mit Nesselzellen besetzten Tentakel nutzt das Blumentier, um Futter zu fangen. Das Gift der Nesselzellen schreckt zudem Fressfeinde ab. Der gegen das Gift resistente Krebs profitiert von diesem Schutz und säubert dafür die Anemone. Solche Gemeinschaften zum gegenseitigen Nutzen sind in der Natur weit verbreitet.

fortpflanzung



Die Mühsal der Begattung

Fest im Nacken gepackt halten diese Libellenmännchen ihre Weibchen, bis die ihre Eier abgelegt haben. Bei der Paarung zuvor haben sie mit ihrem speziell geformten Begattungsorgan die Spermien eines Vorgängers entfernt – und bewachen nun das Weibchen, damit ihren Samenzellen nicht das gleiche Schicksal droht. Partnersuche und Sexualität sind in der Tierwelt aufwendig und gefährlich. Gottesanbeterinnen zum Beispiel verspeisen gelegentlich den Kopf ihres Partners noch während der Begattung, manche Erpel vergewaltigen Enten, und männliche Löwen töten nicht selten die Jungen ihrer Vorgänger, wenn sie ein Rudel übernehmen



versorgung





Lebende Vorratskammern

Bis zur Größe kleiner Weintrauben angeschwollen sind die Hinterleiber dieser Ameisen – spezialisierter Arbeiterinnen der australischen Art *Camponotus inflatus*, die von Artgenossen mit Nektar und Honigtau zu lebenden Vorratsbehältern aufgefüllt worden sind. In Notzeiten würgen die Ameisen diese Nahrung wieder hervor. Alle Lebewesen benötigen energiereiche Moleküle für ihren Stoffwechsel. Pflanzen speichern sie beispielsweise als Stärke in Blättern, Stängeln oder Knollen, Tiere unter anderem als Glykogen in der Leber oder als Fett

wachstum





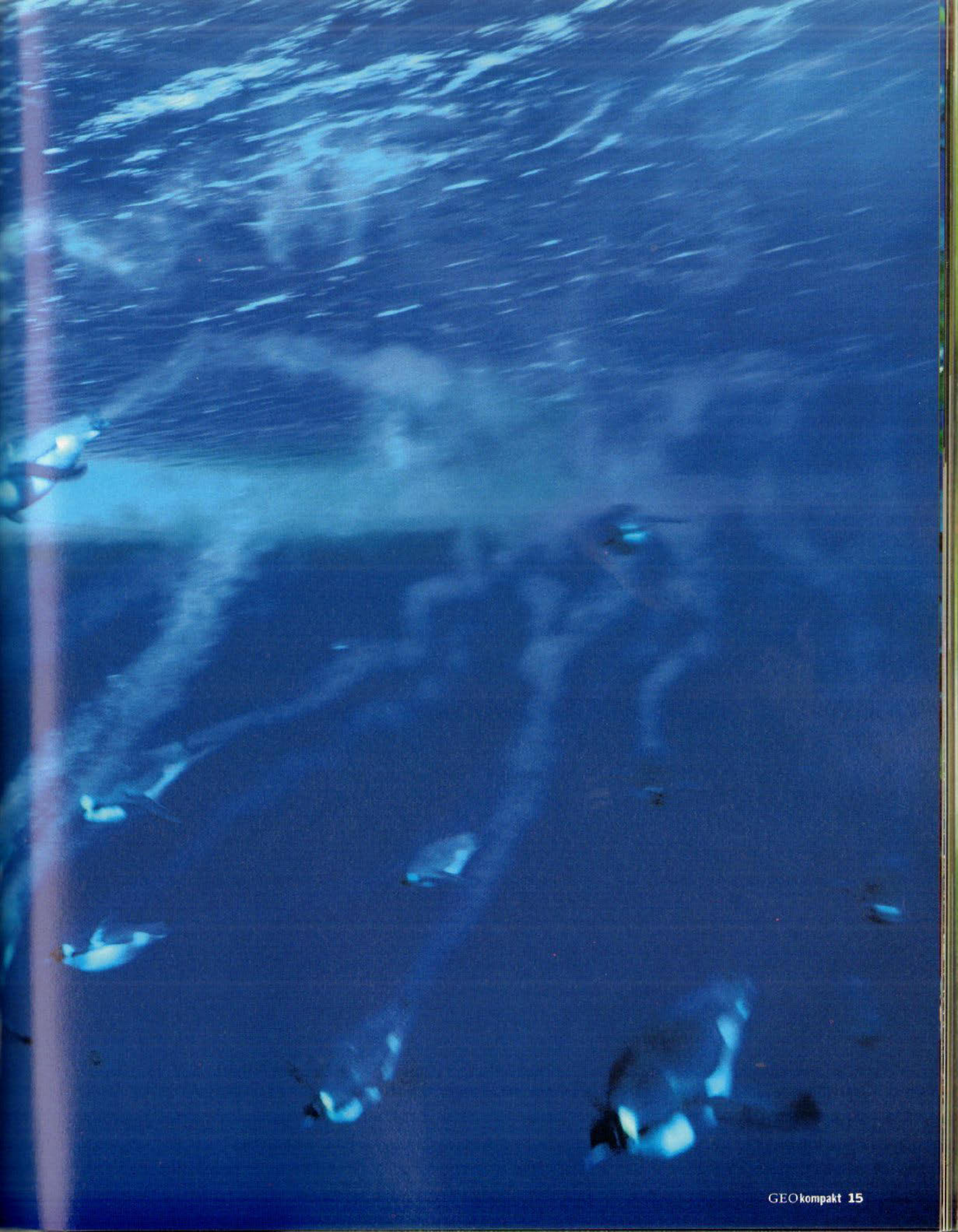
Die zweite Haut

Ist ihr die alte Hülle zu eng geworden, streift die Steppennatter sie einfach ab – denn die schützende Haut aus mehreren Schichten abgestorbener, verhornter Zellen kann nicht mitwachsen. Auf ähnliche Weise häuten sich auch Amphibien. Insekten wechseln ihre Hülle mit den jeweiligen Larvenstadien, die sie durchlaufen. Säugetiere und Vögel dagegen bilden Hautzellen in kleinen Gruppen neu und schilfern die abgestorbenen als Schuppen ab. Allem Wachstum, ob bei Tieren oder Pflanzen, liegt die Teilung oder die Volumenzunahme von Zellen zugrunde. Pflanzen werden schnell größer, indem sie ihre Zellen strecken, Weichtiere wie Schnecken wachsen kontinuierlich, wie die Zuwachsstreifen an ihrem Gehäuse erkennen lassen, Wirbeltiere dagegen verlängern ihre Knochen meist schubweise in speziellen Wachstumszonen

bewegung

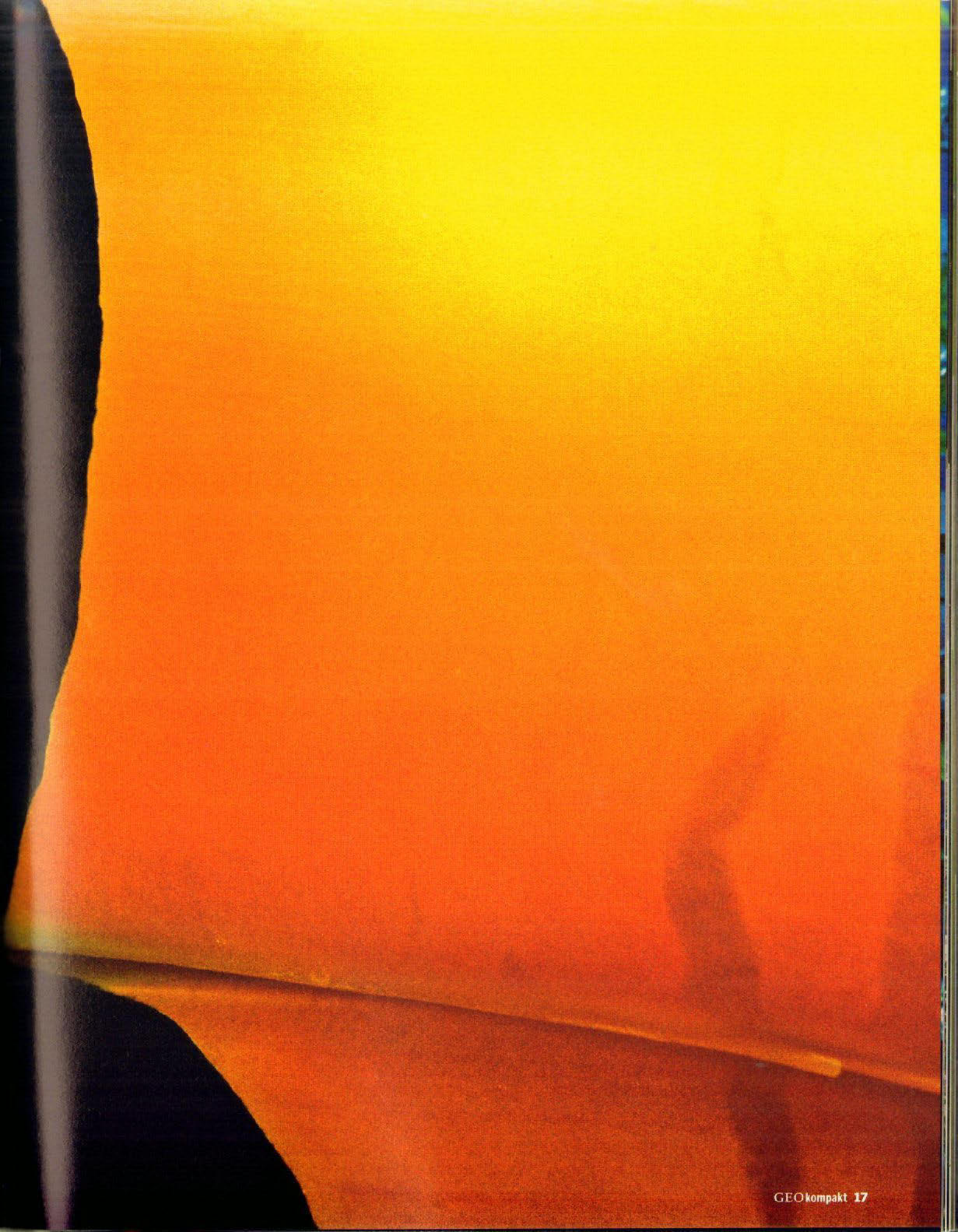
Flug durch den Ozean

Ihre Vorfahren glitten einst durch die Lüfte. Die Kaiserpinguine haben sich indessen so gut an das Meer angepasst, dass sie auch im Wasser zu fliegen scheinen. Die Grundlage einer jeden Fortbewegung bei Tieren bilden die Muskeln, in denen spezielle Eiweiße wie winzige Motoren arbeiten. Damit sie wirken können, benötigen die Muskeln eine Ansatzfläche: bei Wirbeltieren die Knochen, bei Insekten den Panzer. Für komplexe Bewegungen sind zudem eine koordinierte Steuerung der Muskeln durch schnell leitende Nervenfasern, hoch entwickelte Sinnesorgane sowie ein leistungsfähiges Gehirn nötig

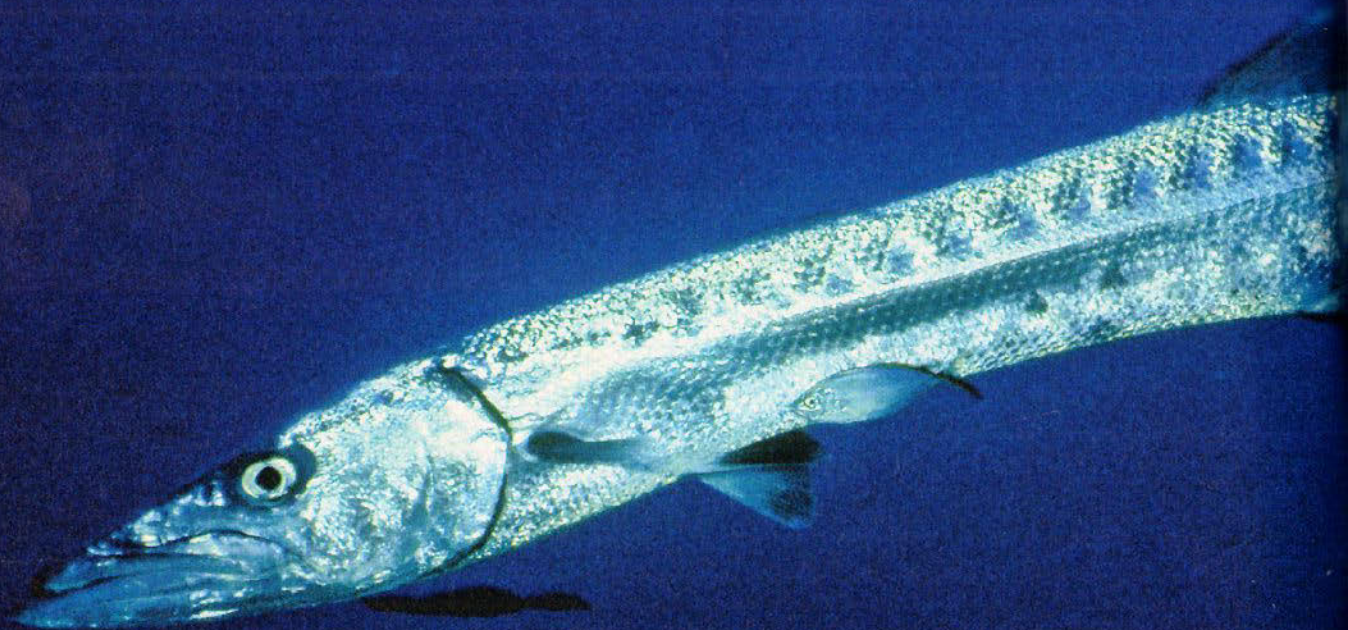


Sehen, aber nicht gesehen werden

Der prachtvoll gefärbte Riesentukan lebt in den tropischen Regenwäldern Südamerikas. Bei der Suche nach Nahrung leitet ihn sein hoch entwickelter Sehsinn. Weil Licht für viele Tiere wichtige Informationen über die Umwelt liefert, haben sich Augentypen wohl mehr als 50 Mal unabhängig voneinander entwickelt. Die meisten Wirbeltiere – so auch mögliche Feinde des Tukans – besitzen sowohl hell-dunkel-empfindliche als auch farbsensitive Lichtsinneszellen. Daher dienen die auffälligen Federfarben des Tukans wahrscheinlich dazu, den Vogel zwischen den bunten Früchten und Blüten zu verbergen – ein Spiel des Schens und Tarnens, das überlebenswichtig ist



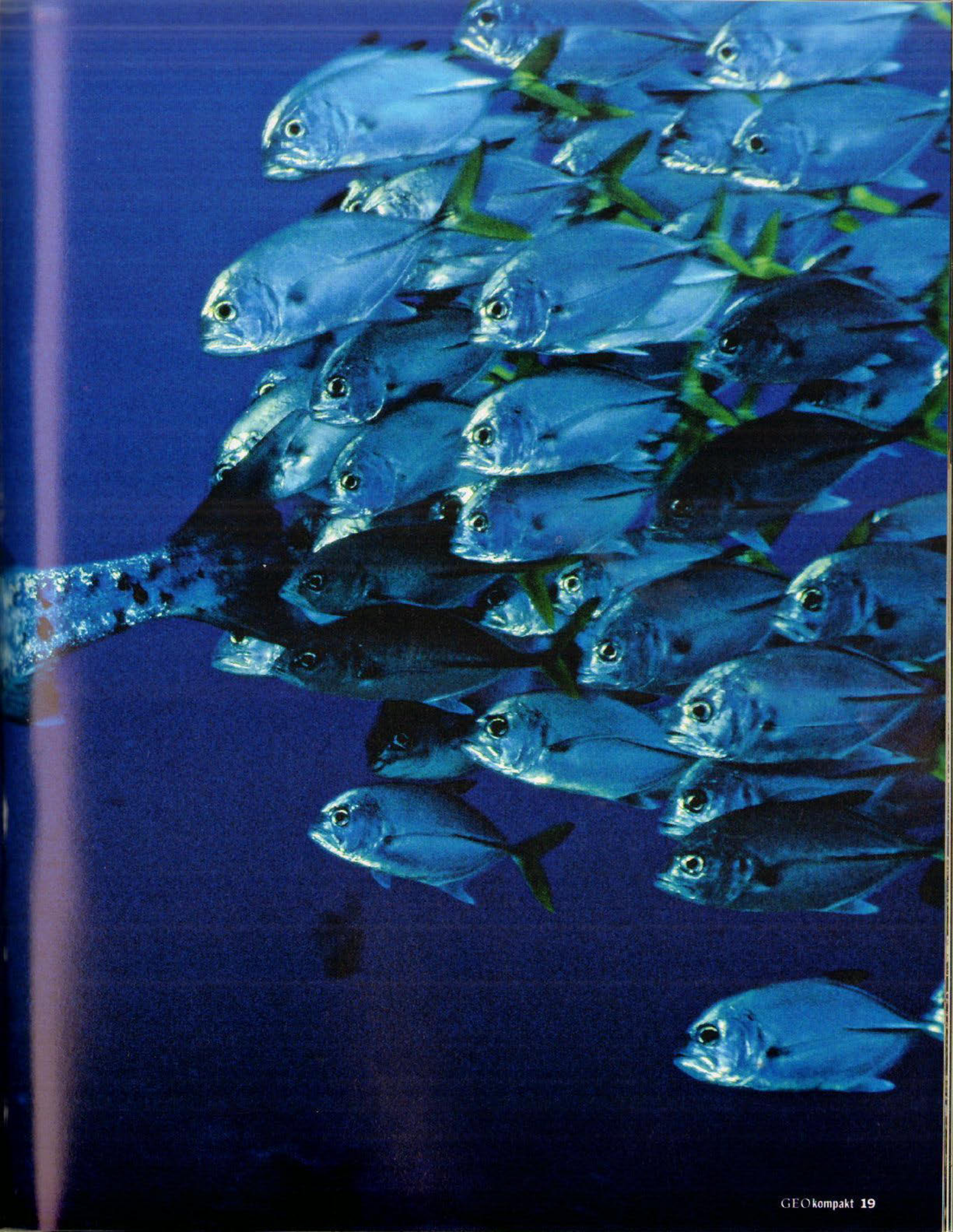
zusammenleben



Die Macht der Menge

Durch gemeinsame Abwehr gelingt es diesem Schwarm junger Stachelmakrelen, den Barrakuda nach einem Angriff in die Flucht zu schlagen. Eine Gemeinschaft bietet für viele Arten Vorteile. Schwertwale, Hyänen oder Wölfe etwa überwältigen als Gruppe größere Beutetiere, Bienen informieren ihre Stockgenossinnen über gute Futterplätze, Tauben im Schwarm erkennen einen jagenden Habicht früh genug, um rechtzeitig zu fliehen. Und Kaiserpinguine in der Antarktis überleben die extreme Kälte, indem sie eng zusammenrücken





Das Rätsel des Lebens

Aus erstaunlich wenigen chemischen Elementen baut die Natur einen schier unglaublichen Reichtum zusammen: Millionen Arten von Tieren und Pflanzen, die das Antlitz unseres Planeten prägen. Was ist das Geheimnis dieser Vielfalt?

Text: Henning Engeln

Ohne das Leben würde die Erde einem Vorhof der Hölle gleichen. Sie wäre zu zwei Dritteln bedeckt von Ozeanen, die aus nichts als Wasser und Salzen bestünden und aus denen sich nackte Kontinente mit Felsenlandschaften, Sandwüsten und toten Gebirgen erheben. Wegen des Mangels an freiem Sauerstoff würde ein Mensch ohne Atemgerät ersticken, und er wäre wohl auch einer qualvollen Hitze ausgesetzt – weil der hohe natürliche CO_2 -Gehalt die Atmosphäre in einem unbarmherzigen Treibhauseffekt aufheizen würde.

Es existierten keine Wälder, Savannen, Wiesen, Sümpfe oder Kältesteppen. Nirgendwo würde Vogelgesang erklingen, es gäbe weder bunte Blüten noch saftige Früchte, weder schwirrende Insekten noch röhrende Hirsche. Unser Planet wäre ein Ort deprimierender Eintönigkeit.

Vor mehr als 3,5 Milliarden Jahren aber ist etwas geschehen, das diese Entwicklung verhindert hat: Aus einfachen chemischen Verbindungen entstanden komplexere Moleküle und schließlich erste Zellen: das Leben. Doch was ist das überhaupt: Leben? Und wieso konnte es einen ganzen Planeten verändern?

Selbst die einfachsten einzelligen Lebewesen – **Bakterien** und **Archaeobakterien** – haben Eigenschaften, die für alle Organismen typisch sind: Ihre Zellen bilden von der Außenwelt abgegrenzte Einheiten, in denen eine hochgradige molekulare Ordnung herrscht. Sie nehmen Energie auf und wandeln sie in andere Energieformen um, um damit ihren Stoffwechsel zu betreiben, neue Moleküle herzustellen und zu wachsen. Obwohl Zellen ständig Stoffe und Energie von außen aufnehmen und andere Substanzen sowie Wärme an die Umgebung abgeben, bleibt ihr inneres Milieu annähernd konstant („Homöostase“). Und: Selbst einfachste Einzeller reagieren schon auf Reize aus der Umwelt.

Abgrenzung, Ordnung, Stoffwechsel, Homöostase, Reizbarkeit: All das sind Eigenschaften, die Leben kennzeichnen. Doch es kommt noch mehr hinzu: Lebewesen vermehren sich – im einfachsten Fall durch eine Zellteilung. Dazu benötigen sie ein Informationssystem: also eine Erbsubstanz, welche die Stoffwechselvorgänge steuert, und die bei der Vermehrung kopiert und an die Tochterzellen weitergegeben wird. Weil bei deren Verdopplung gelegentlich Fehler (Mutationen) unterlaufen, kann sich die Erbinformation ändern. Dies wiederum

ist eine Voraussetzung dafür, dass unterschiedliche Individuen innerhalb einer Art existieren. Und weil die natürliche Auslese nur die am besten an ihre Umwelt angepassten Organismen überleben lässt, kommt es zu einer Evolution.

Auch diese Fähigkeit zur Veränderung ist ein – extrem wichtiges – Kriterium von Leben. Denn ohne sie hätte es keine Weiterentwicklung von einfachen zu komplexeren Organismen gegeben – auch wenn dies nicht bedeutet, dass primitive Lebensformen bis heute weniger erfolgreich im Kampf ums Überleben sind. So besiedeln einfach gebaute Einzeller nach wie vor die extremsten Lebensräume auf der Erde. Manche Archaeobakterien etwa – sie ähneln wahrscheinlich den ersten Lebewesen auf Erden – gedeihen bei bis zu 113 Grad Celsius Hitze, leben in Schwefelquellen und Salzlaken, trotzen tonnenschwerem Druck, existieren in kilometertiefen Gesteinsschichten.

Von der Individuenzahl her sind Mikroorganismen ohne Zellkern – also Bakterien und Archaeobakterien – ohnehin die wahren Herrscher der Erde: Ihre Zahl wird auf unvorstellbare $5 \cdot 10^{30}$ (eine Zehn mit 30 Nullen) geschätzt. Allein jeder Mensch trägt viele Billionen von ihnen in seinem Darm, doch die meisten siedeln wahrscheinlich in Sedimenten. Ihre globale Masse wird von manchen Forschern auf rund 50 Prozent der gesamten Biomasse auf unserem Planeten geschätzt.

DENNOCH PRÄGEN NICHT die Winzlinge das heutige Aussehen unseres Planeten, sondern die höheren Lebewesen. Diese besitzen sehr viel größere Zellen – zudem mit Zellkern –, welche sich zusammenschließen und komplexe Körper formen können.

Zu diesen Lebewesen gehören unter anderem praktisch sämtliche Individuen, die das unbewaffnete menschliche Auge erblicken kann: Bäume, Kräuter und Gräser, Moose und Farne, Fische, Vögel und Säugetiere; alle Insekten, Spinnen und Krebse, alle Quallen und Schnecken.

Dank ihrer komplexen, häufig aus vielen Zellen konstruierten Körper haben die höher entwickelten Lebewesen

*** Protocisten:** Sammelbezeichnung für verschiedene Gruppen von Eukaryoten (pflanzliche und tierische Einzeller sowie Algen), die nicht zu den echten Tieren, höheren Pflanzen oder Pilzen gehören.
Pilze: ein- oder vielzellige Eukaryoten mit Zellwänden. Sie ernähren sich von organischem Material und gelten neben den Bakterien als die größte Gruppe der Destruenten (Zersetzer).
 Beide Gruppen werden in diesem Heft aber nicht weiter behandelt.

völlig neue Möglichkeiten des Lebens und Überlebens. Dabei haben sie sich in vier Reiche aufgeteilt: in die der Pflanzen und Tiere sowie der Pilze und **Protoctisten***.

Diese wissenschaftliche Trennung geht darauf zurück, wie sich die einzelnen Organismengruppen mit Energie und Nahrung versorgen – was ungeheure Folgen für Lebensweise, Formen und Funktionen der verschiedenen Lebewesen hat.

• **Pflanzen:** Die grünen Gewächse nutzen die Energie des Sonnenlichts, um aus Kohlendioxid und Wasser energiereiche Zuckermoleküle herzustellen. Mithilfe dieser chemischen Energie sowie Wasser und Mineralsalzen können sie alles herstellen, was sie zum Aufbau ihrer Körper benötigen.

Als die Flora vor mehr als 400 Millionen Jahren das Land eroberte, prägte sich der typische Bauplan der höheren Pflanzen als Anpassung an die neue Umwelt aus: Weil die Gewächse nun darauf angewiesen waren, Mineralsalze und Wasser aus dem Boden zu gewinnen, entwickelten sie Wurzeln. Die darin gelösten Stoffe transportieren sie seither mittels spezieller Röhren in die Sprossachse (Stängel oder Stamm und Äste) und weiter in die Blätter. Der Stängel dient als Halteorgan für die Blätter, welche die Energie des Lichts einfangen, aus der Luft etwa Kohlendioxid aufnehmen und Wasser sowie Sauerstoff abgeben.

Die Wurzeln haben noch eine zweite Aufgabe: Sie verankern die Pflanze fest im Boden. Da Sonnenlicht und Kohlendioxid praktisch überall auf der Erdoberfläche vorhanden sind, kann sich die Pflanze diese sesshafte Lebensweise erlauben – und spart dadurch viel Energie, die andere Organismen in die Fortbewegung investieren müssen.

• **Tiere:** Sie müssen viel Kraft für die Fortbewegung aufwenden, denn sie beschaffen sich chemische Energie und Baustoffe, indem sie andere Organismen fressen. So entwickelten sie ein System aus Muskeln und einem Skelett, das einen schnellen, gezielten Ortswechsel erlaubt.

Sexualität und Vielzelligkeit ließen komplexe Körperformen entstehen

Zusätzlich benötigen sie Sinnesorgane, die ihnen Informationen liefern und schnelle Orientierung erlauben, sowie ein leistungsfähiges Nervensystem, das diese Informationen verarbeitet und wieder in präzise koordinierte Bewegungen der Muskeln umsetzt. Zudem besitzen höhere Tiere ein Verdauungssystem, das die Nahrung aufnimmt, in für den Körper konsumierbare chemische Einzelteile zerlegt und unbrauchbare Reste ausscheidet.

Gleichermaßen typisch für Tiere und Pflanzen ist: In den allermeisten Fällen können sie sich sexuell vermehren. Weibliche und männliche Individuen kombinieren dabei ihr Erbgut zu neuen Varianten. Das erhöht die genetische Vielfalt und beschleunigte wahrscheinlich die jeweilige Anpassung an neue Umweltbedingungen.

Diese Kombination aus Sexualität und Vielzelligkeit, die wohl höheren Lebewesen diese verblüffende Fülle an komplexen Körperformen und neuen Fähigkeiten gestattet, könnte somit auch die enorme Artenvielfalt der höheren Lebewesen erklären. Zwar bevölkern mehrere Zehntausend Arten von Einzellern ohne Zellkern (**Prokaryoten**, also Bakterien und Archaeobakterien) die Erde, doch stehen ihnen mehrere Millionen Arten von Lebewesen mit Zellkern (**Eukaryoten**) gegenüber – darunter rund 250 000 Arten von Samenpflanzen, fast 50 000 Arten von Wirbeltieren sowie mehr als 750 000 Arten von Insekten.

Allerdings liefern diese Bezifferungen bekannter Arten nur ein ungenaues Bild, denn zahllose Tiere, Pflanzen und Einzeller sind noch gar nicht entdeckt – etwa in den tropischen Regenwäldern oder der Tiefsee. Aus diesem Grund schwanken die Schätzungen, wie viele Arten es überhaupt gibt, zwischen fünf und mehr als 30 Millionen.

WIE ABER KONNTE solch eine überwältigende biologische Vielfalt aus den nur wenigen chemischen Elementen entstehen, welche die Grundlage aller organischen Moleküle bilden? Des Rätsels Lösung hängt vermutlich mit der einzigartigen, hierarchischen Struktur des Lebens zusammen.

Proteinmoleküle zum Beispiel sind in der Regel aus mehr als 1000 Atomen zusammengesetzt und haben Eigenschaften, die keines ihrer jeweiligen Atome zeigt: Das Ganze ist also mehr als die Summe seiner Teile. Und so geht es weiter in der Hierarchie des Lebens: Auf jeder höheren Organisationsebene kommen neue Eigenschaften zum Vorschein, welche die Einzelteile nicht besitzen.

Die großen Moleküle fügen sich zu **Organellen** (zum Beispiel Zellkern, Zell-Kraftwerk) und Membranen zusammen, die gemeinsam eine Zelle bilden. Einander ähnliche Zellen formen Gewebe, Gewebe formen Organe und Organe letztlich einen Körper – also ein Individuum. Alle Individuen einer Art in einem umgrenzten Gebiet ergeben so genannte Populationen, und viele solcher Gruppen bilden schließlich Lebensgemeinschaften: Ökosysteme. Auf jeder Strukturebene kommen neue Eigenschaften hinzu, erhöht sich die Vielfalt.

Dahinter steckt die unerschöpfliche Kraft des Lebens, immer komplexere Strukturen zu schaffen, die wiederum neue Fähigkeiten eröffnen. So beeindruckend ist die Anpassungs- und Gestaltungsfähigkeit der Organismen, dass manche Wissenschaftler sogar davon träumen, den lebensfeindlichen Mars mithilfe irdischer Biologie in blühende Landschaften zu verwandeln.

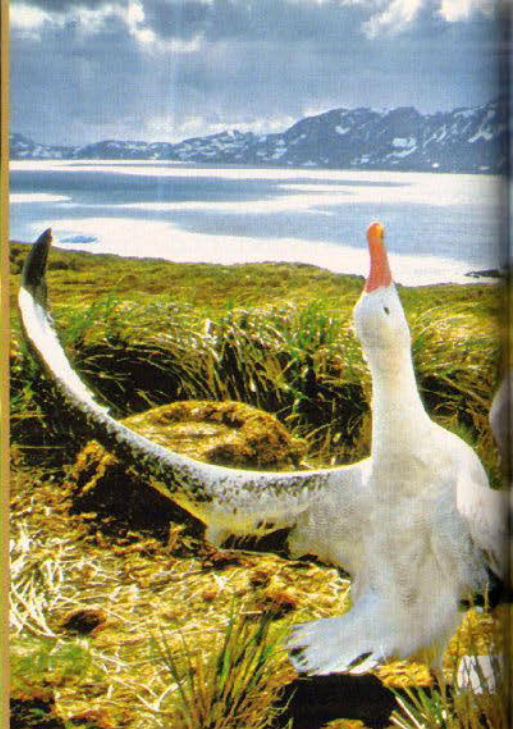
Spezielle Bakterien, so eine der Utopien, könnten aus Marsgestein Kohlendioxid freisetzen und die unterkühlte Atmosphäre per Treibhauseffekt anheizen. Daraufhin würde aus der südlichen Polkappe Kohlendioxid verdunsten und die Atmosphäre weiter erwärmen. Schließlich könnten widerstandsfähige höhere Lebewesen, etwa Schaben, angesiedelt werden sowie grüne Pflanzen, die über die Photosynthese Sauerstoff erzeugen.

Bis der Rote Planet schließlich sogar für Menschen bewohnbar wäre. □

Dr. Henning Engeln, 51, ist GEOkompakt-Redakteur und hat an der Freien Universität Berlin Biologie studiert.



Bei diesen Rüsselkäfern ist das männliche das kleinere Geschlecht



Seepferdchen bleiben dem Partner meist treu, das männliche Tier brütet die Eier aus



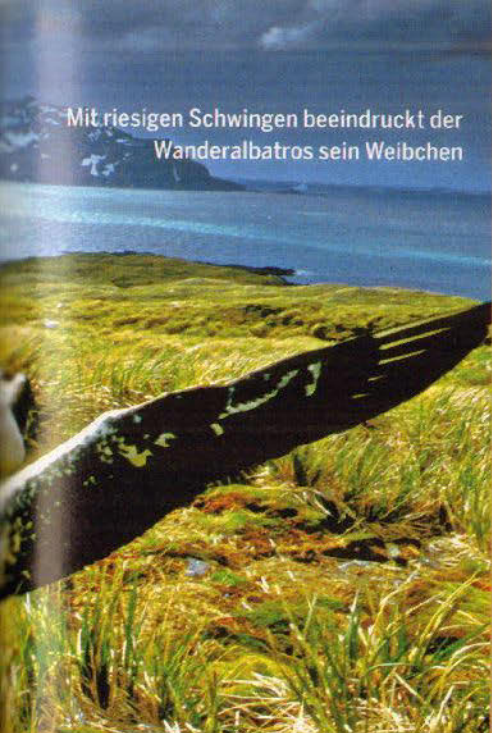
Delfine bei der Paarung – manchmal bedrängen mehrere Männchen ein Weibchen



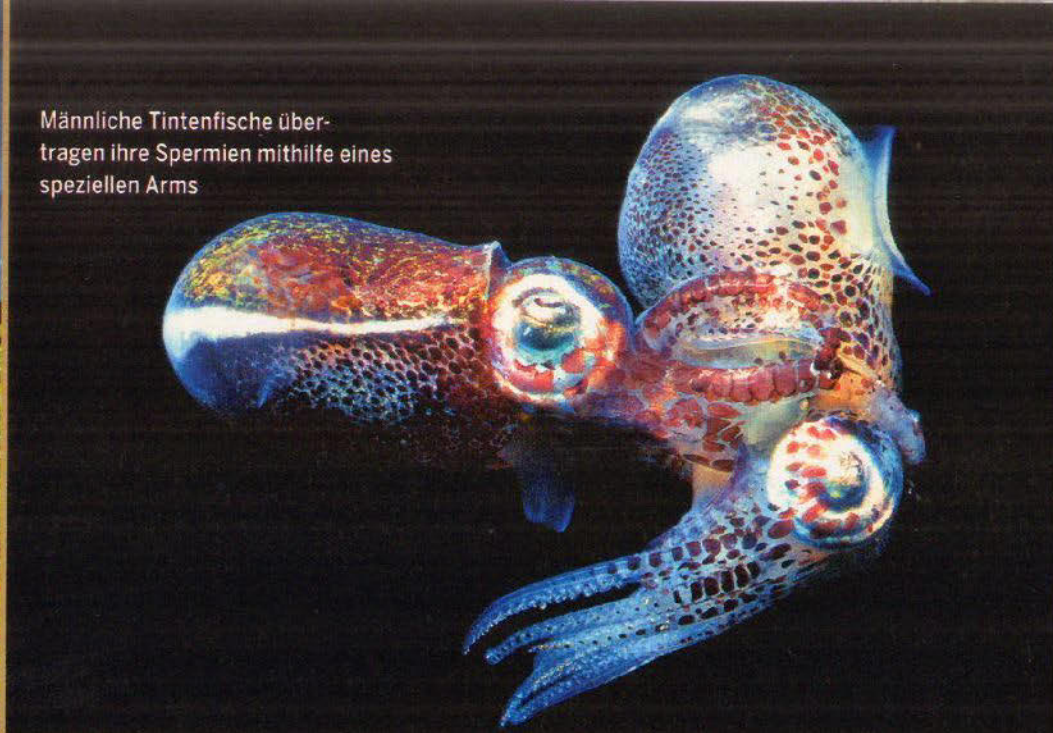
Skorpion-Männchen packen die Weibchen an den Scheren zu einem oft stundenlangen Balztanz, ehe sie ein Spermienpaket abgeben



See-Elefanten-Bullen kämpfen um die Vorherrschaft im Harem



Mit riesigen Schwingen beeindruckt der Wanderalbatros sein Weibchen



Männliche Tintenfische übertragen ihre Spermien mithilfe eines speziellen Arms



Ein grüneschecktes Kriechtier erschütterte 1958 die biologische Fachwelt: Im Kaukasus hatte der russische Zoologe Ilya Darewsky eine Population von Felseidechsen beobachtet, in der keine Männchen vorkamen. Aus den unbefruchteten Eiern schlüpften dennoch Jungtiere – allesamt identische Kopien ihrer Mutter. Offenbar brauchte die klonierte Damengesellschaft zur Fortpflanzung keine Spermien.

Die ungewöhnliche Echse war das erste der Wissenschaft bekannte **Wirbeltier**, das sich statt durch Sex per Jungfernzeugung

vermehrt. Inzwischen kennen die Forscher 74 Arten von Reptilien, Amphibien und Fischen, die sich die Besamung ersparen. Bei manchen dieser Spezies stimulieren sich die Weibchen gegenseitig, um die Entwicklung des Embryos auszulösen.

Die meisten Wirbeltiere jedoch (und auch viele **Wirbellose**) widmen einen beträchtlichen Teil ihrer Lebenszeit dem mühseligen Geschäft der geschlechtlichen Vermehrung – also dem Sex.

Spermien befruchten weibliche Eizellen: Nach diesem immer gleichen Prinzip kommt es im Tierreich zu immer neuen Varianten des Sex. Beinahe jede Art hat eigene, teils bizarre Rituale

Das Spiel der Triebe

Die Suche nach einem Sexualpartner ist gefährlich. Im Kampf um die Chance, die eigenen Gene zu verbreiten, sind Tricks und Betrug die Regel. Dabei geht es auch einfacher, wie jene Arten zeigen, die sich per Jungfernzeugung fortpflanzen. Wozu aber ist der Sex dann gut?

Text: Martin Paetsch



Bei Froschlurchen umklammern Männchen die Weibchen, bis die Eier abgelegt sind



Die festsitzenden Schwämme geben ihre Eier und Spermien in das Wasser ab. Die entstehenden Larven werden von der Strömung fortgetragen und siedeln sich an anderen Stellen an



Bonobos gehören zu den untereinander friedfertigsten Säugetieren – Sex dient bei ihnen dem Abbau von Aggressionen



Kopulationstechnik bei Eiskälte: Königspinguine bilden feste Paare und kümmern sich abwechselnd um das Ei



Bei höheren Krebsen halten die Männchen die Weibchen mit ihren Scheren fest und übertragen ihre »Samenpatronen« mit dafür modifizierten Beinen

und Techniken entwickelt, um das Erbgut der Elternteile zu vermengen und Nachwuchs in die Welt zu setzen. Das Spektrum reicht vom lustvollen Grupensex der Bonobo-Affen bis zur eher pragmatischen Fernbefruchtung der Skorpion-Männchen, die ihre Samenpakete zur Abholung auf dem Boden abstellen.

Mit Theorien, die an ökonomische Modelle erinnern, versuchen Evolutionsbiologen, die vielfältigen Fortpflanzungsstrategien zu erklären. Sex ist demnach eine – durchaus riskante – Investition in die Verbreitung der eigenen **Gene**. Einerseits lockt neben der Aussicht auf Nachkommen die Chance auf Durchmischung des genetischen Erbes. Andererseits drohen Sexually transmitted diseases, Betrug durch den Partner – und sogar der Tod: nicht nur wegen gefährlicher Sexpraktiken, sondern auch, weil die Tiere während der Paarung ihren Schutz vor Räubern und die Nahrungssuche vernachlässigen.

Die Teilnehmer an diesem Glücksspiel unterscheiden sich schon durch ihren Einsatz: Im Vergleich zu den kostbaren Eizellen sind Spermien ein Massenprodukt. Das Männchen kann seine Vaterschaftschancen oft durch Aufteilung der Investition – also Sex mit mehreren Partnerinnen – steigern. Für das Weibchen dagegen, das bei zahlreichen Spezies viel Energie



Nachdem sich ein Zeckenweibchen mit Blut zur Bildung Tausender Eier vollgesogen hat, paart es sich mit dem kleineren Männchen

für das Austragen der Embryos und die Brutpflege aufwenden muss, bedeuten wiederholte Begattungen meist ein erhöhtes Risiko. Auch werden seine Überlebenschancen verringert, wenn die Nachkommen zu schnell aufeinander folgen.

Um ein Weibchen buhlen häufig mehrere Bewerber. Diese Konkurrenz entschärfen viele Arten durch ritualisierte Auswahlverfahren: Hirsche lassen Geweihe aneinander krachen, Laubenvögel präsentieren kunstvoll gebaute Nester, Stichlinge stellen einen strahlend roten Bauch zur Schau. Die Umworbene sucht sich dann den stärksten, geschicktesten oder attraktivsten Kandidaten heraus.

Auffällige Ornamente oder Färbungen sind für die Freier zwar oft gefährlich – sie machen ja nicht nur die potenzielle Partnerin aufmerksam, sondern auch Feinde –, sind aber auch Beweise für gute Gene: Nur kräftige Pfauen können sich das eigentlich hinderliche Prachtgefieder leisten. Die Damenwahl gewährleistet somit eine gesunde Nachkommenchaft und züchtet zugleich Männchen mit extravaganter Äußerer heran.

Allerdings begnügt sich auch das Weibchen nicht immer mit nur einem Partner. Sehr häufig verlegt es den Wettbewerb einfach in den eigenen Körper: Es paart sich mit mehreren Kandidaten, deren Samenzellen dann das Rennen unter sich ausmachen – die schnellsten und gesündesten schaffen es in die Eizelle.

Um die Spermienkonkurrenz überhaupt zu ermöglichen, horten manche Weibchen den Samen in speziellen Organen. Die so gespeicherten Spermien bleiben bei einigen Reptilienarten mehr als zwei Jahre lang frisch.

Weil solche Strategien ihren Erfolg gefährden, reagieren die Samenspende oft mit Gegenmaßnahmen: Die Männchen mancher Arten versiegeln die Vagina sicherheitshalber mit einem Begattungspfropfen. Und bei einigen Spinnen-

stiletartiges Sexualorgan, mehr Waffe als Penis, in die Leibeshöhle seines Opfers. Der so injizierte Samen gelangt über den Blutkreislauf zu den Eierstöcken.

Doch auch das andere Geschlecht ist nicht immer zimperlich: Das Weibchen der im Wasser lebenden Riesenwanze etwa klebt seine Eier dem Männchen mit Gewalt auf den Rücken. Bis die Vorräte des Weibchens erschöpft sind, hat es mitunter vier Widerspenstige überwältigt, die dann bis zu 150 Eier tragen müssen.

Manchmal kommt es unter den Geschlechtern sogar zu einem Wettrüsten darum, wer beim Sexualakt die Oberhand behält

spezies brechen die männlichen Tiere sogar Teile ihrer Genitalien ab, die dann als Pfropf in der Genitalöffnung des Weibchens stecken bleiben.

Bei manchen Tierarten sind Vergewaltigungen die Regel. Walbullen etwa scheren sich ebenso wenig wie männliche Bettwanzen um die Zustimmung des Weibchens. Die Wanzen haben dabei eine besonders brutale Fortpflanzungstechnik entwickelt: Das Männchen rammt sein

Ein regelrechtes Wettrüsten der Geschlechter haben Biologen beim Wasserläufer nachgewiesen. Für das Weibchen ist Sex äußerst riskant – unter anderem, weil es während der langen Begattung die untere Position innehat und im Wasser „Rückenschwimmer“ lauern, räuberische Wanzen. Um sich die zu hartnäckigen Verehrer vom Leibe zu halten, haben bei einigen Arten die Weibchen dornige Fortsätze ausgebildet, mit deren Hilfe sie

aufdringliche Männchen loswerden. Im Gegenzug sind den Männchen Greifhaken gewachsen, mit denen sie die Bedrängten festhalten. Der Penis einiger Arten weist sogar eine dornenbesetzte Verdickung auf, die sich im weiblichen Geschlechtstrakt aufbläht und festhakt.

Solche sexuellen Konflikte waren vermutlich eine treibende Kraft bei der Evolution der Genitalien. Der Formenreichtum der Geschlechtsorgane ist erstaunlich – sie können sich schon bei eng miteinander verwandten Spezies stark unterscheiden. Auswüchse, Stacheln und Borsten am Penis stimulieren das Weibchen oder entfernen das Sperma früherer Freier – so bei vielen Libellen. Mancher Penis, etwa der des Waschbärs, wird durch einen Knochen stabilisiert, andere lassen sich in einer Penistasche zusammenfallen, wie das bis zu drei Meter lange Begattungsorgan der großen Bartenwale.

Ungewöhnlich gestaltete Genitalien erfordern so manche komplizierte Verrenkung. Wahre Stellungskünstler sind die Libellen, die sich – teils im Flug – zu einem Paarungsrad verflechten. Das vorn postierte Männchen greift mit seinen Hinterleibsanhängen den Nacken der Partnerin. Die biegt ihr Körperende nach vorn, um ihr Geschlechtsteil am vorderen Hinterleib des Männchens einzurasten (siehe Seite 8).

Bananenschnecken wiederum stecken beim Sex die Köpfe zusammen und versuchen, ihre dort wachsenden Glieder in die Geschlechtsöffnung des Gegenübers

einzuführen. Sie sind Zwitter, also jeweils mit männlichen und weiblichen Organen ausgerüstet. Wird ein Penis bei der heftigen Paarung abgeissen, begnügt sich das betroffene Weichtier künftig mit der weiblichen Rolle.

Ohnehin ist die sexuelle Identität nicht bei allen Spezies für immer festgelegt. Manche Tiefseebarsche können bei der Paarung bis zu viermal das Geschlecht wechseln. Parasiten dagegen begatten sich oft selbst, um sich möglichst schnell ausbreiten zu können. Für den im Wirt gefangenen Rinderbandwurm ist überdies die Partnersuche schwierig. Der bis zu zehn Meter lange Schädling besteht deshalb aus bis zu 2000 Segmenten, jedes mit pe-

Sie sparen sich so nicht nur die zeitraubende Partnersuche, sondern geben auch ihr komplettes Erbgut weiter (**Mitose**) – theoretisch sind sie unsterblich. Jedes Individuum kann Nachwuchs zeugen, während bei der langsameren geschlechtlichen Fortpflanzung nur ein Partner gebärt.

Um diese gravierenden Nachteile aufzuwiegen, muss es gute Gründe für den Sex geben. Viele Forscher vermuten, dass sich höhere Spezies mit seiner Hilfe gegen Parasiten wehren: Nur wenn sie ihr Erbgut ständig neu mischen (**Meiose**), können sie mit den Schädlingen Schritt halten.

Wenn allerdings unter relativ konstanten Umweltbedingungen die ständige neue Anpassung weniger wichtig

Der Rinderbandwurm im menschlichen Darm braucht keinen Partner. Er befruchtet sich selbst, dann werden die Eier ausgeschieden

nisartiger Ausstülpung und Vagina versehen. Nach der Selbstbefruchtung fällt das mit Eiern gefüllte Segment ab und wird vom Wirtsorganismus ausgeschieden.

Weshalb Sex in all seinen Kräfte zehrenden Spielformen überhaupt existiert, ist für Evolutionsbiologen gar nicht so leicht zu erklären. Viele niedere Organismen pflanzen sich durch Teilung, Knospung oder andere asexuelle Strategien fort.

ist, können manche Populationen auch ohne Samenspender gut bestehen – so die kaukasischen Felseidechsen.

Für Bdelloiden, kleine Rädertierchen, war die Verbannung der Väter sogar sehr erfolgreich: Obwohl sie seit 50 Millionen Jahren auf Sex verzichten, haben sie eine Tierklasse mit 370 Arten aufgebaut. □

Martin Paetsch, 34, ist Wissenschaftsautor in Hamburg.



Bei manchen Echsen – wie dieser der Gattung *Cnemidophorus* – kommen die Weibchen ohne Männchen aus: Sie vermehren sich durch Jungfernzeugung, also ohne Sex



Die Haken am Penis dieser Libelle können den Samen eines Vorgängers aus dem weiblichen Geschlechtstrakt entfernen

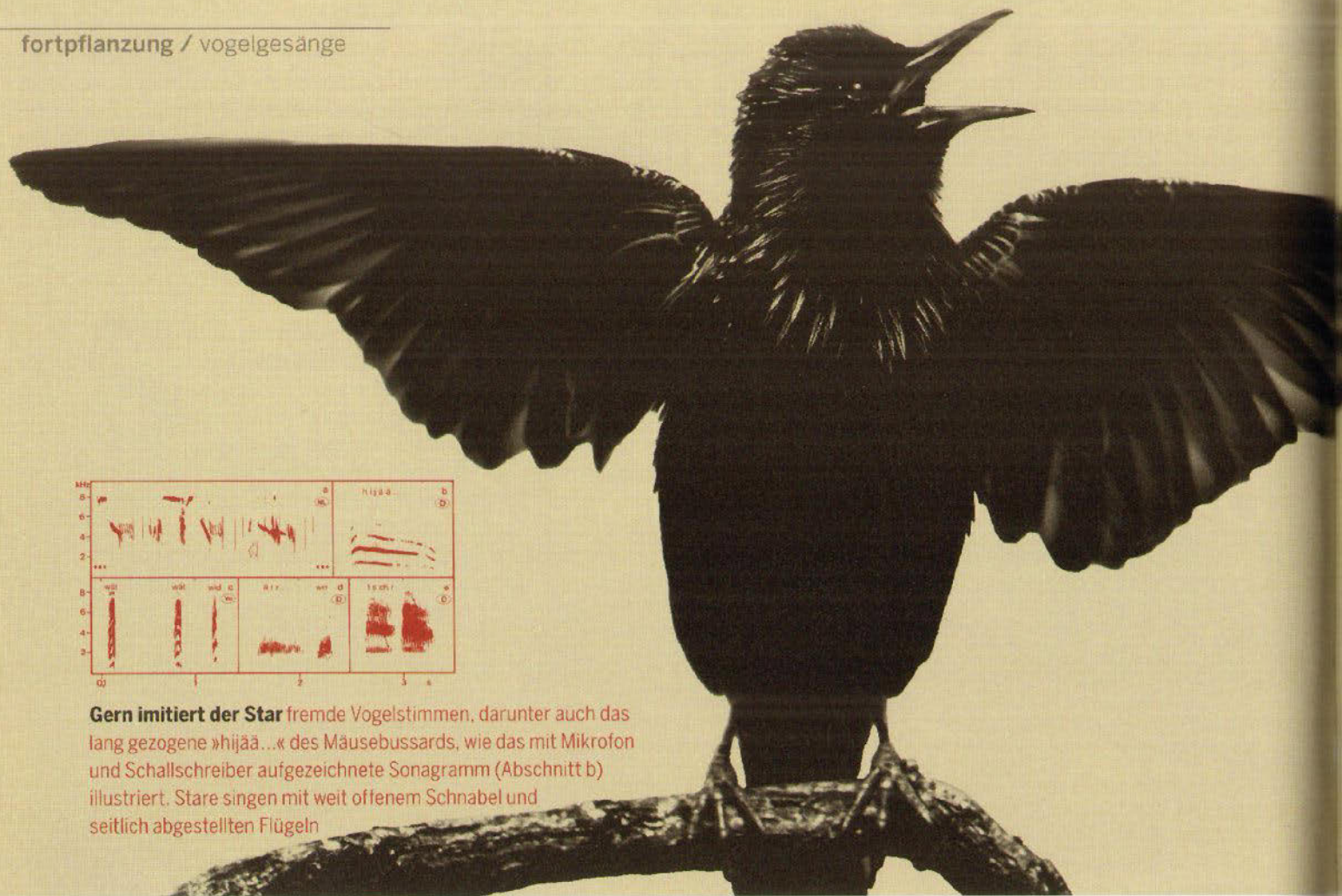
Gefühlte Temperatur: 20°



Nicht zu warm und nie zu kalt, aber immer trocken. Beim Sport muss dein Körperklima stimmen, dafür sorgt unsere hochfunktionelle Sportunterwäsche. Die neue Funktionsfaser «effect» verhindert wirksam die Entstehung von Schweißgeruch. Du fühlst dich einfach wohl bei jedem Wetter. passion for sports. www.odlo.com

mit der funktionellen Sportunterwäsche von


odlo

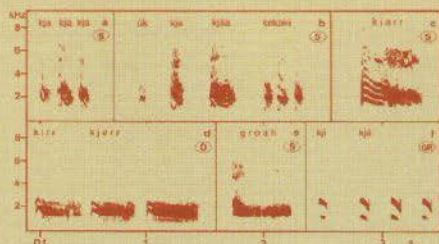


Gern imitiert der Star fremde Vogelstimmen, darunter auch das lang gezogene »hijää...« des Mäusebussards, wie das mit Mikrofön und Schallschreiber aufgezeichnete Sonagramm (Abschnitt b) illustriert. Stare singen mit weit offenem Schnabel und seitlich abgestellten Flügeln

Mein Reich —

Text: Ute Eberle

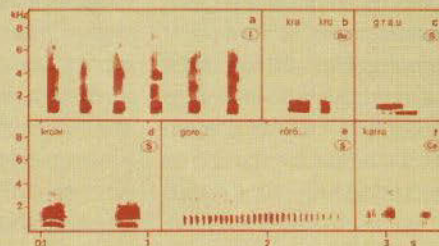
Gesang ist Männersache, zumindest bei den meisten der rund 4600 Singvogelarten: Sie trällern, sie pfeifen, sie bimmeln wie Glöckchen. Mit hochkomplexen Melodien verteidigen sie ihre Reviere, geben Auskunft über ihren Gesundheitszustand oder verspotten ihren Nachbarn. Manchmal mehrere Tage lang



Dohlen sind keine guten Sänger, dafür aber gesellige Schwätzer. Sie verfügen über ein großes Repertoire an Rufen: vom kurzen, in schneller Folge wiederholten »kja« (a) über das lang gedehnte »groah...« (e) bis zum fast perfekt imitierten Klingeln eines Mobiltelefons



Auch der Kolkrahe ist ein recht guter Imitator. Bei Balzspielen lässt er ein schnelles »krokro...« (a) hören, seine Luftkämpfe mit Greifvögeln begleitet ein kurzes »karra...« (f)



mein Gesang

Das Konzert beginnt, noch ehe die Sonne aufgeht: Ein erster Vogel flattert von seinem geschützten Schlafplatz auf einen hohen Ast oder einen Hausgiebel und fängt an zu singen. Ein zweiter folgt, dann ein dritter, und bald scheint es, als vereinten sich sämtliche Vögel der Nachbarschaft zu einem lauten und ungeordneten Chor.

Das morgendliche Pfeifen und Trillern ist jedoch kein Ausdruck von Lebensfreude, sondern hat eine wichtige Funktion: „Vögel singen nach dem Aufstehen, um ihre Nachbarn daran zu erinnern, dass es sie noch gibt und dass sie die Nacht gut

überstanden haben“, so Sandra Vehrencamp vom Cornell Lab of Ornithology im US-Staat New York, eine Spezialistin für die Gesänge der Akazienzaunkönige. Der Morgenchor stellt dabei nur den Auftakt dar. Singen ist für Vögel eine Ganztagsbeschäftigung, harte Arbeit – und wichtiges Instrument im Überlebenskampf.

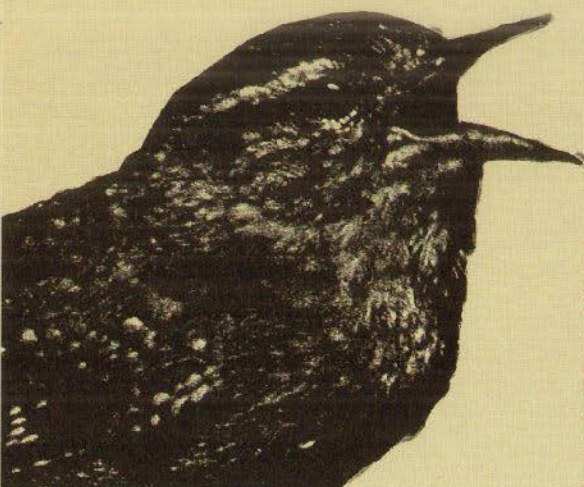
So liefern sich beispielsweise die männlichen Akazienzaunkönige oft regelrechte Kampfgesänge. Will so ein Vogel sein Revier vergrößern – etwa weil ein ausgeguckter Nistplatz zu nahe an der Grenze zum Territorium des nächsten Zaunkönigs liegt –, pfeift er oft Lieder aus dem Repertoire des entsprechenden Nach-

barn, um ihn zu provozieren, zu ver-spotten, zum Duell zu fordern.

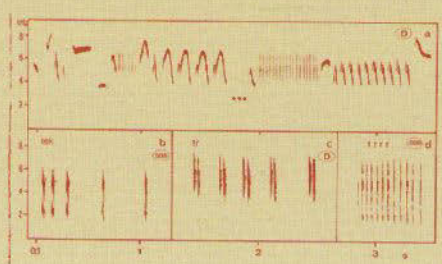
Dieser tut es ihm gleich oder geht zum akustischen Angriff über, indem er die exakt gleichen Lieder möglichst laut zurücksingt, den Rivalen sogar unterbricht und die Melodie für ihn beendet.

Manchmal singen die Vögel stunden- oder sogar tagelang gegeneinander an. „Auf diese Weise versuchen sie, durch Imponiergehabe ihre Kräfte zu messen“, sagt Sandra Vehrencamp, „um herauszufinden, wie wichtig diese paar Meter Territorium dem anderen wirklich sind.“

Gibt keiner der beiden nach, endet das Singduell schließlich damit, dass sich die



Bis zu neun Sekunden lang sind die Strophen, aus denen der Zaunkönig seine Lieder bildet. Jede Strophe besteht aus geträllerten Teilen (a) mit unterschiedlichen Klängen und Tempi



Vögel in Sturzflügen und mit Schnabelhieben attackieren.

Ein Akazienzaunkönig kann aber sängerisch auch den Rückzug einleiten. Dazu entschärft er die Situation, indem er als Botschaft an seinen Gegner ein Lied pfeift, das dieser nicht im Repertoire hat. Dies ist das Deeskalationssignal des Zaunkönigs. Da körperliche Auseinandersetzungen oft zum Tod führen können, gibt es eine solche Verhaltensweise bei vielen Tieren.

Auch abseits von Revierstreitigkeiten ist Singen das wichtigste Kommunikationsmittel der Vögel. Unter anderem verrät das, was die Männchen singen und wie sie es tun, den Weibchen, wie gesund sie sind und wie erfahren und erfolgreich im Überlebenskampf. Vieles an diesen melodiosen Signalen ist so subtil, dass die Wissenschaft es noch nicht entschlüsselt hat. Doch so viel ist klar: Wie gut ein Vogel singt, spielt eine entscheidende Rolle dafür, ob er sich fortpflanzen und seine Gene weitergeben kann.

Deshalb ertönt der Zwitscherchor am vielfältigsten und lautstärksten, wenn erst einmal die Balzseason begonnen hat – das gilt sowohl für Vögel, die hierzulande überwintern, als auch für die zurückgekehrten Zugvögel. Wie bei Teenagern, die vor einer Disco den Motor ihres Autos aufheulen lassen, sind Hormone für einen guten Teil des Krawalls verantwortlich. Bei den meisten Vogelarten singen nur die Männchen, durch deren Körper in den ersten hellen und warmen Monaten des Jahres besonders viel Testosteron zirkuliert. Von dem Hormon angestachelt,

trillern sie so ausgiebig und kreativ wie sonst das ganze Jahr nicht, und das spiegelt sich auf dramatische Weise auch in ihren Gehirnen wider.

Ornithologen haben herausgefunden, dass die das Singen steuernden Regionen in den Gehirnen der Männchen, die „Liedschaltkreise“, im Frühjahr deutlich an Masse zunehmen. Flaut die Testosteronproduktion und damit das Singen im Verlauf des Sommers dann wieder ab, schrumpfen diese Areale. Eine Sensation: Bis dahin hatten Wissenschaftler angenommen, dass sich ein erwachsenes Gehirn – gleich welcher Spezies – nicht mehr verändern kann.

Die einzelnen Töne des Vogelgesangs entstehen tief in der Kehle, kurz oberhalb der Lunge. In diesem Bereich, wo sich die Luftröhre in die zwei Hauptbronchien gabelt, sitzt die **Syrinx**: ein System von Membranen, die im Luftstrom des Atems schwingen und die das Tier durch winzige Muskeln manipulieren kann.

Die Singvögel – von denen es rund 4600 Arten gibt – besitzen zur Regulierung der Syrinx einen besonders komplex gebauten Muskelapparat mit meist fünf bis neun Muskelpaaren, dank derer sie die Membrane verschieden fest anspan-

nen und wieder entspannen können. So entstehen Schallwellen unterschiedlicher Frequenzen.

Singvögel haben zudem eine rechte und eine linke Syrinxkammer, zwischen denen sie hin- und herschalten. Auf diese Weise können etwa tiefe Töne links und hohe rechts erzeugt werden. Bei komplizierten Tonfolgen vibriert es in beiden Syrinxkammern gleichzeitig, die Vögel begleiten sich gewissermaßen selbst.

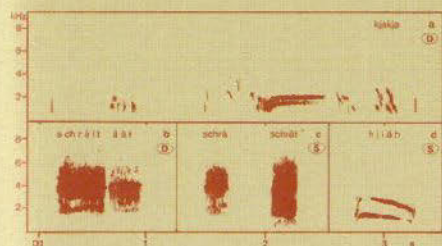
Die so produzierten Melodien sind derart komplex, dass sich Ornithologen technische Tricks einfallen lassen mussten, um sie überhaupt gründlich studieren zu können. Mit einem Schallschreiber verwandeln sie Mikrofonaufnahmen in Kurven, die Frequenzen, Lautstärke sowie die Dauer der Töne darstellen.

Dabei fällt den Forschern immer wieder auf, dass viele Vögel – etwa Meisen und Ammern – Tempo- und Tonartwechsel in ihre Melodien einbauen. Freilich: Nicht immer klingt melodisch, was aus einem Schnabel dringt. Der Kolkrabe etwa, der größte Singvogel überhaupt, knarrt in der Regel eher, als dass er singt.

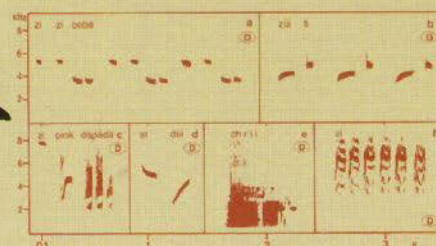
Doch selbst die virtuosesten Sänger werden nicht als solche geboren. Wie ein Kleinkind das Sprechen von den Eltern,

Die artspezifischen Klangfolgen müssen die meisten jungen Vögel von den alten erst lernen – so wie ein Kleinkind die Sprache seiner Eltern

Fühlt sich der Eichelhäher gestört, lässt er einen lauten, ein- oder zweisilbigen Ruf hören (b, c). Sonst ist er ein eher leiser Schwätzer, der dabei auch trillert und rätscht



Das »zizi-bebe...« der Kohlmeise und ihr Zilpen erscheinen im Sonagramm wie Notationen moderner Musik (a, b). Die Vögel entwickeln Dialekte, die je nach Landstrich variieren



so muss ein Singvogel das Trällern von den Altvögeln lernen. Jede Spezies pflegt charakteristische Klangfolgen von bis zu 300 000 Tönen, die mancher Vogel immer wieder neu zu „Liedern“ kombiniert und die Ornithologen „Strophen“ nennen.

Dabei kann es sich – wie etwa bei dem in Australien heimischen Zebrafinken – um eine einzige, kurze Strophe handeln, die das Tier sein Leben lang unbeirrbar wiederholt. Oder um ein Repertoire von gut fünf (Kohlmeisen), etwa 30 (Amseln) oder gar mehr als 2000 Strophen (Rote Spottedrossel). Manche Strophen, so die des Feldschwirls, dauern über 100 Minuten.

Die Fähigkeit, komplexe Lautfolgen durch Imitation zu lernen, verschafft den Singvögeln eine Ausnahmestellung. Nur einige Fledermaus-, Papageien- und Kolibriarten sowie manche Wale und Delfine beherrschen Vergleichbares.

Die ersten Versuche der Jungvögel ähneln noch dem Brabbeln eines Kleinkinds. Erst mit viel Übung gelingt es ihnen, die abgelauschten und in den Liedschaltkreisen gespeicherten Tonfolgen sowie die eigene Singmotorik so weit in Einklang zu bringen, dass sie die Melodien fehlerfrei und klar nachzwschern können.

Ganz anders verläuft dies bei den so genannten „Signalrufen“, mit denen sich Vögel etwa gegenseitig vor Angreifern warnen oder als Jungtiere um Futter betteln. Diese vergleichsweise simplen Klangfolgen sind angeboren und müssen nicht trainiert werden.

Manche Papageien und Singvögel – etwa Dohlen, Stare und Eichelhäher – behalten die Fähigkeit, sich neue Melodien einzuprägen, bis ins hohe Alter.

Dabei lassen sie sich nicht nur von fremden Vögeln, sondern auch von menschengemachten Geräuschen inspirieren, ahmen etwa Glockengebimmel oder Telefonklingeln nach – und bauen dadurch ihr Repertoire immer weiter aus.

Die Rote Spottedrossel eignet sich auf diese Weise jene rund 2000 Strophen an, die ein erwachsener Vogel beherrscht. Der Zebrafink dagegen ist nur in den ersten Lebensmonaten lernfähig. Lässt man die Vögel in dieser sensiblen Periode künstlich ertauben oder spielt ihnen das falsche Gezwitscher vor, entwickeln sie abnormale Klangfolgen, die sich nicht mehr korrigieren lassen.

Wie viele Strophen ein Vogelmännchen beherrscht, hängt vermutlich damit zusammen, wie wählerisch die Weibchen im Lauf der Evolution auf die Sangeskünste reagiert haben. „Bei den Rohrsängern etwa ist Vielfalt wichtig“, erklärt Peter Becker vom Institut für Vogelforschung in Wilhelmshaven. „Wer mit vielen Strophen aufwarten kann, bekommt die besten Reviere, paart sich eher und hat den größten Bruterfolg.“ Auch bei Arten mit kleinerem Repertoire fliegen die Weibchen bevorzugt zu jenen Sängern, die unter anderem vielfältiger und klarer singen als ihre Rivalen.

Dabei fallen die Umworbenen keineswegs auf Prahlerei herein. „Es ist nicht einfach, diese komplexen Tonfolgen zu produzieren, und sie bieten den Weibchen die Chance zu testen, wie vital und gesund ein Männchen ist“, erklärt die US-Ornitho-

login Sandra Vehrencamp. Ein größeres Repertoire oder ein besonders sauberer Vortrag würden zusätzlich darauf hinweisen, dass ein Kandidat bereits erfahren ist. Viele Weibchen schätzten das.

„Ein etwas älteres Männchen ist geübt im Kämpfen und bei der Aufzucht der Jungen und kennt auch sein Revier besser“, so Sandra Vehrencamp. Ohnehin halten die erfahreneren Männchen oft die besseren Territorien – das bedeutet: vorteilhaftere Nist- und Futterstellen.

Gesang kann auch verraten, woher ein Vogel stammt. Denn so wie Ostfriesen anders reden als Bayern, zwitschern Singvögel in Dialekten. Der Regenruf eines Buchfinken etwa – den der Vogel bei schlechtem Wetter ausstößt, wenn andere Arten schweigen – ändert sich oft innerhalb weniger Kilometer. So erklingt er in Osnabrück als *huit*, östlich von Osnabrück als *wrud*, in Norddeutschland als *huid* und im südlichen Schwarzwald als *tititüt*.

Auch die Goldammer pflegt lokale „Mundarten“, und Studien haben gezeigt, dass Weibchen sich bevorzugt mit Männchen aus ihrer eigenen Dialektgruppe paaren. Driften die Lokalsprachen weit genug auseinander, kann sich eine Art sogar in zwei neue teilen.

Haben sich die Paare gefunden, schwindet die Sangeslust der Männchen gewöhnlich deutlich. In den warmen Sommermonaten wird es dann ruhiger in den Wipfeln und Gärten.

Bis zur nächsten Balzzeit. □

Ute Eberle, 34, lebt als Wissenschaftsautorin in Leiden/Holland. Fachliche Beratung: **Prof. Dr. Peter Becker**, Institut für Vogelforschung, Wilhelmshaven.



Ein langer Haken hilft dem Samen der Bachnelkenwurz, sich im Fell von Tieren festzukletten. Die feinen Haare ermöglichen ihm auch den Transport durch den Wind



Der weite Weg der Samen

Text: Katharina Kramer
Fotos: Solvin Zankl

Landpflanzen sind fest verwurzelt und daher ortstreu. Damit sie dennoch neue Lebensräume erobern können, schicken sie ihren Nachwuchs auf Reisen – und nutzen dazu Wind, Wasser oder Tiere, die ihre Samen im Darm, im Fell oder als Vorrat transportieren





Wie ein Fallschirm ist der »Hut« am gestielten Samen des Löwenzahns konstruiert, und ähnlich funktioniert er auch. Der Wind kann die rund 200 Samen, die eine »Pustelblume« formen, kilometerweit fortblasen





Einem Bohrer ähneln die Früchte des Reiher-schnabels. Sie rollen sich bei Trockenheit auf und strecken sich, wenn es wieder feucht wird. So kann sich der Samen bewegen oder in den Boden bohren







Mit Widerhaken und Stacheln haften die Samen der Möhrenförmigen Haftdolde im Fell vorbeistreifender Tiere, werden mitgetragen und fallen irgendwo zu Boden.

Mit Herzklopfen, so erinnert er sich später, nähert sich der französische Wissenschaftler Edmond Cotteau am 26. Mai 1884 der Vulkaninsel Krakatau. Ein Dreivierteljahr zuvor ist das etwa 40 Kilometer vor der Küste Sumatras gelegene Eiland nach einem der gewaltigsten Vulkanausbrüche der Menschheitsgeschichte buchstäblich explodiert. Zwei Drittel ihrer Fläche hat die zuvor elf Kilometer lange, unbewohnte Insel eingebüßt. Bei einem darauf folgenden Tsunami sind wahrscheinlich mehr als 36 000 Menschen umgekommen.

Vor Cotteau liegt eine tote Landschaft: Kein Baum, kein Strauch, kein Tier hat den Ausbruch überstanden. Erkalte Lavaströme, verfestigte Asche und zu Bimsstein erstarrte Magmafetzen haben sich bis zu 80 Meter hoch aufgetürmt. Der Forscher findet nur eine Spinne, die wohl im Wind auf die Insel getrieben ist. „Es wäre interessant, zu beobachten“, notiert er, „wie sich hier Schritt für Schritt neues Leben entwickelt.“

Tatsächlich verfolgen Wissenschaftler seither die Wiederbesiedlung der Insel durch Flora und Fauna. Bis heute unternimmt das internationale Forscherteam des Krakatau Research Programme Expeditionen auf den zum Schutzgebiet erklärten, nach wie vor unbewohnten Flecken im Meer. „Vom Strand bis zum Gipfel ist die Insel heute wieder mit Urwald bewachsen“, hat die Gruppe jüngst gemeldet. Über 300 höhere Pflanzen haben sich angesiedelt, darunter Feigenbäume, Palmen und Orchideen, in denen sich Vögel, Fledermäuse und Insekten tummeln.

Doch wie konnten Pflanzen überhaupt nach Krakatau gelangen? Immerhin sind sowohl Sumatra als auch Java über 40 Kilometer entfernt, bis zur nächstgelegenen kleinen Insel sind es mehr als zehn Kilometer. So unbeweglich Pflanzen scheinen: Ihre Samen überwinden nicht selten Hunderte von Kilometern. Wie schaffen sie das?

WELTWEIT GIBT ES etwa 250 000 Samenpflanzenarten. Das Muttergewächs entlässt seine reifen Samen allein oder in Früchten eingeschlossen. Fallen die Samen neben die Mutterpflanze und keimen dort, hat das freilich Nachteile: Denn obwohl es so für konkurrierende Arten schwieriger wird, sich um sie herum anzusiedeln, nimmt die Mutterpflanze dem Nachwuchs Licht und Mineralstoffe weg.

Außerdem ist eine solche Samenhäufung ein unfreiwilliges Geschenk für samenfressende Tiere. Obendrein müssten die Nachkommen auch untereinander verstärkt um Licht, Wasser und Mineralsalze konkurrieren. Schließlich droht zudem noch die Gefahr von Epidemien – oder von Inzuchteffekten, weil genetisch verwandte Pflanzen zu nah beieinander stehen und sich gegenseitig bestäuben.

Viele Gewächse lassen deshalb **Diasporen** – also ihre Samen, Früchte, Sporen oder Sprosssteile – über weite Strecken transportieren und nutzen dafür vor allem drei Vehikel: Wind, Wasser oder Tiere (sieht man einmal vom Menschen ab, dem in Kulturlandschaften eine wesentliche Rolle bei der Pflanzenausbreitung zukommt). Viele Arten verteilen ihre Diasporen gleich auf mehreren dieser Transportwege.

DER WIND BEFÖRDERT sehr viele Samen. In Deutschland, so wird geschätzt, verdriften etwa 40 Prozent der Diasporen durch die Luft. Besonders häufig kommt diese Ausbreitung in windreichen Regionen wie an der Nordsee, im Mittelgebirge und in den Alpen vor. Viele Diasporen sind für das Fliegen besonders gut ausgestattet, etwa die staubfeinen Orchideensamen. Mit ihrem Gewicht von rund 0,000001 Gramm sind sie etwa 30 000-mal leichter als ein Reiskorn. Obendrein sind sie mit Luft gefüllt. Daher trägt schon der geringste Aufwind sie in höhere Luftschichten. Orchideen besiedelten einst das 2000 Kilometer vom nächsten Festland entfernte Neuseeland.

In Mitteleuropa ist der bekannteste Windflieger der Löwenzahn. Die Haarkränze der „Pustelblume“ lösen sich schon bei leichten Brisen mitsamt Samen ab. Dann gleiten sie wie Fallschirme zu Boden. Die Diasporen aller Windflieger sind so beschaffen, dass sich ihr Absturz verlangsamt und sie länger in der Luft bleiben. So steigt ihre Chance, von Aufwinden erfasst und im Idealfall kilometerweit getragen zu werden.

Durch Drehbewegungen bremsen beispielsweise die Diasporen von Ahornbäumen ihren Fall: Die Samen des Spitzahorns etwa sitzen am unteren Ende eines Flügels. Weil der Samen schwerer ist als der Flügel, beginnt die Reise mit einem Sturzflug. Sobald er sich aber aufgrund von Luftströmungen auf die Seite legt, wird der Luftwiderstand größer, die Sinkgeschwindigkeit dadurch geringer, und das ganze Konstrukt beginnt zu rotieren. Mit etwa zwölf Umdrehungen in der Sekunde segelt der Samen nun zu Boden.

Die weltweit imposantesten Drehbewegungen vollführen die bis zu 32 Zentimeter langen Nüsse des Flügelfruchtbaums in den tropischen Gebieten Asiens. Sie sehen aus wie ein Federball: fünf Flügel, die sternförmig an einer Nuss sitzen. Zur Rotation des Samens kommt es durch die Position der Flügel an der Nuss.

In offenen Landschaften wie etwa waldfreien Steppen, Halbwüsten oder Küstengebieten haben „Steppenroller“ eine besondere Form der Verbreitung entwickelt. Diese Pflanzen trocknen zur Samenreife aus und lösen sich entweder ganz aus dem

Die Haare an der Frucht der Kornblume strecken und spreizen sich je nach Luftfeuchtigkeit. Dadurch »kriecht« der Samen über den Boden. Er wird aber auch von Ameisen eingesammelt



Sex mit fremder Hilfe

Da eine Blüte nicht zur anderen kommen kann, brauchen Pflanzen Unterstützung, um ihre Spermakerne und Eizellen zu vereinigen

Auch Pflanzen haben Sex, die meisten jedenfalls. Und der ist genauso variantenreich wie bei den Tieren. Die Landpflanzen haben vielfältige Strategien entwickelt, um die männlichen Keimzellen und die Eizellen zueinander zu führen. So ist im Laufe von Jahrtausenden ein hoch spezialisiertes Sexualorgan entstanden: die Blüte. In ihr reifen entweder männliche oder weibliche **Keimzellen** heran – oder beide zugleich. Tiere, Wind und Wasser transportieren die männlichen Keimzellen dann zu den Eizellen.

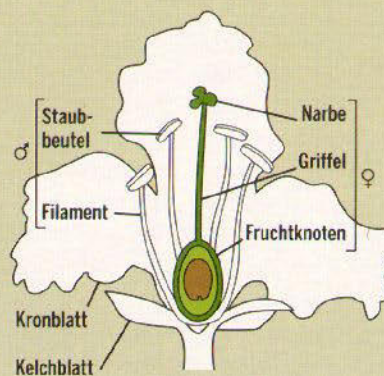
Allerdings gibt es bei den männlichen Keimzellen zwei Varianten, die sich ausgebildet haben:

- zum einen begeißelte Spermien, etwa bei den „archaischen“ Landpflanzen, den Moosen und Farnen, die sich lange vor den Blütenpflanzen entwickelt haben; diese Keimzellen erreichen die Eizelle schwimmend, etwa in einem Wassertropfen;
- zum anderen Spermien ohne Geißeln; diese Keimzellen sind nicht bewegungsfähig und entstehen als **Spermakerne** in den Pollenkörnern – die aber leicht transportiert werden können. Alle Blütenpflanzen vermehren sich über Spermakerne.

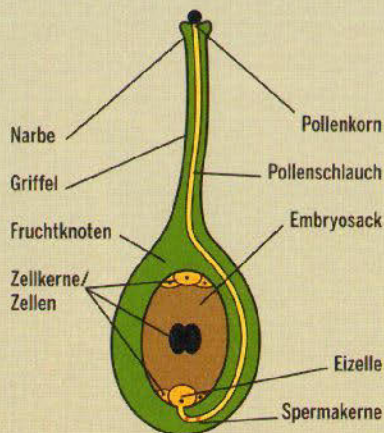
Die Blüten setzen sich meist aus vier Blättertypen zusammen. Die oft grünen **Kelchblätter** schützen noch nicht entfaltete Knospen. Die näher zum Blüteninneren liegenden **Kronblätter** sind meist auffällig gefärbt und dienen dem Anlocken von Insekten, Vögeln oder Fledermäusen. Sie hüllen die eigentlichen Fortpflanzungsorgane der Blüte ein. Die **Staubblätter**, die männlichen Geschlechtsorgane, setzen sich aus einem langen Fädchen (dem **Filament**) und einer kleinen Verdickung (dem **Staubbeutel**) an ihrem oberen Ende zusammen. Darin befinden sich die **Pollenkörner**: winzige Kugeln mit harter Schale, in denen die Spermakerne mit den männlichen Erbanlagen lagern.

Die weiblichen Geschlechtsorgane, die **Fruchtblätter**, sind weniger filigran: Der **Embryosack**, eine große Zelle mit mehreren Zellkernen, liegt geschützt im **Fruchtknoten**, tief im Innern der Blüte. Aus ihm wächst der lang gezogene Griffel, der in einem verdickten und häufig klebrigen „Pollenlandeplatz“, der **Narbe**, endet.

Bleibt nun ein Pollenkorn auf der Narbe kleben („bestäubt“ sie), erkennen die meisten Blütenpflanzen, ob der **Pollen** von ihnen stammt oder von einer anderen Pflanze der gleichen Art. Das ist wichtig: Denn nur die ständige Neukombination von Genen gewährleistet eine genetische Vielfalt, die es Pflanzen ermöglicht, sich an veränderte Lebensbedingungen anzupas-



Etwa 80 Prozent aller Blütenpflanzen haben männliche (links) und weibliche (rechts) Sexualorgane in derselben Blüte, umgeben von oft bunten Kronblättern und meist grünen Kelchblättern. 20 Prozent sind getrenntgeschlechtlich



Kurz vor der Befruchtung: Nachdem ein männliches Pollenkorn auf einer weiblichen Narbe gelandet ist, bildet es einen Pollenschlauch (gelb), durch den zwei Spermakerne (rot) zum Embryosack vordringen. Dort wird einer mit der Eizelle verschmelzen, der andere die Bildung des Nährgewebes auslösen, indem er mit Zellkernen (Mitte) fusioniert

sen. Neue Kombinationen entstehen aber zumeist nur bei einer Befruchtung durch einen fremden Pollen, also durch Sex.

Viele Pflanzen registrieren anhand komplexer molekularer Mechanismen die **genetische Information** im Pollen und verhindern – falls das Pollenkorn von ihnen selbst stammt – durch einen „biochemischen Block“ dessen Entwicklung. Andere, darunter viele Kulturpflanzen wie etwa Weizen, lassen auch Selbstbefruchtung zu.

Nun dringt Wasser durch Poren in das Pollenkorn ein. Dessen Hülle öffnet sich an den Keimporen. Der Pollen enthält zwei Zellen: Eine beginnt, den Pollenschlauch zu formen, der in die Narbe und entlang des Griffels tief in den Fruchtknoten hineinwächst – das weibliche Geschlechtsorgan. Dort dringt er durch eine kleine Öffnung in den Embryosack ein. Aus der zweiten Zelle des Pollenkorns entstehen durch Teilung zwei Spermakerne, die durch den Schlauch bis zum Embryosack gelangen.

Dann vollzieht sich ein erstaunlicher Vorgang, die „doppelte Befruchtung“: Ein Spermakern vereinigt sich mit der Eizelle – dieser Keim entwickelt sich zum Pflanzenembryo. Der zweite Spermakern verschmilzt mit Zellkernen des Embryosacks. Es entsteht das **Endosperm** – das Nährgewebe für den Embryo. Zunächst ist es oft noch eine milchige Flüssigkeit, die jedoch nach und nach verdickt und schließlich eine feste Konsistenz annimmt.

Die Blüte beginnt zu welken, die umgebenden Zellschichten verlieren immer mehr Wasser und verfestigen sich zu einer haltbaren Samenhülle: Das Endosperm wird als Nahrungsvorrat gemeinsam mit dem Pflanzenembryo „verpackt“. Hormonelle Veränderungen lassen den Fruchtknoten, der den Samen umhüllt, enorm anwachsen. Aus ihm entsteht die Frucht. Meist reift sie gemeinsam mit dem Samen – und macht diesen attraktiv für mögliche Verbreiter.

Fast alle Pflanzen können jedoch auch ohne Partner Nachkommen bilden – etwa durch die Entwicklung ober- oder unterirdischer Sprosse, die sich wie Klone von der Mutterpflanze abspalten (**ungeschlechtliche Fortpflanzung**). Durch sie können diese Pflanzen – etwa Unkräuter – unkompliziert und schnell eine neue Umgebung besiedeln.

Ebenso wie bei manchen wirbellosen Tieren ist dies eine gute Lösung für den Fall, dass kein Sexualpartner vorhanden ist – die Durchmischung des Genpools ist dabei allerdings ausgeschlossen.

Susanne Gilges

Boden oder brechen an dünnen Stellen oberhalb der Wurzel ab. Dann werden sie vom Wind erfasst und davongerollt. Dabei fallen nach und nach die Samen heraus.

Oft verhaken sich mehrere Steppenroller ineinander und können so allmählich Anhäufungen von der Größe eines Heuwagens bilden. Im November 1989 verstopften derart viele Steppenroller die Straßen von Mobridge in South Dakota, USA, dass der Ort von der Außenwelt abgeschnitten war.

DIE VERBREITUNG ÜBER DAS WASSER nutzt nur eine Minderheit der Pflanzen als Transportmittel, in Deutschland etwa ein Viertel. Einige Samen können einen längeren Aufenthalt in Flüssen oder gar im stark salzhaltigen Meerwasser überleben.

Etwa die Kokosnuss: Ihr wasserdichtes Gehäuse ist von einer Auftrieb verleihenden lufthaltigen Faserschicht umgeben. Die Kokosmilch und das Kokosfleisch im Innern dienen der Ernährung beim Auskeimen. Dank dieser Ausrüstung können die Riesensamen bis zu vier Monate auf dem Ozean zubringen und haben so von ihrer ursprünglichen Heimat Polynesien aus wohl alle tropischen Strände erobert.

Auch in unseren Breiten treiben Samen oft wochenlang auf Flüssen und Seen. An europäischen Ufern wachsen unter anderem Seggen (Sauergräser), die ihre Samen mit einer Luftblase in eine feste, wasserdichte Blatthülle einschließen. Die reife Frucht fällt ins Wasser und kann dort mehrere Monate überdauern und Hunderte Kilometer zurücklegen.

Längere Strecken überwinden die meisten Pflanzen jedoch weder im Wind noch im Wasser, sondern per Anhalter mit Tieren. Das gilt insbesondere für recht schwere Samen von Bäumen und Sträuchern in dicht bewachsenen Gebieten, auf die Wind kaum wirken kann. Weit mehr als die Hälfte* der Samen in Deutschland werden von Tieren verfrachtet.

Eine Methode ist die Passage durch den Darm: Dabei fressen Vögel oder Säugetiere die Früchte der Pflanzen und scheiden die Samen später gut gedüngt wieder aus. Gegen die Magensäfte der Verbreiter sind diese Samen resistent. Wie effektiv diese Methode ist, hat das Beispiel Krakatau gezeigt: Etwa 45 Prozent der Samenpflanzen, die heute auf dem Eiland wachsen, sind in Vogeldärmen dort hin gelangt.

In Europa hat sich etwa ein Drittel der Pflanzen an den Transport durch den Tierdarm angepasst. Einige dieser Arten erkennt man daran, dass sie für ihre Spediteure besonders verführerische Früchte hervorbringen. Pflanzen, deren Samen vor allem von Vögeln verbreitet werden, produzieren im Herbst nicht abfal-

lende, weiche und nicht zu große Früchte mit knalligen und kontrastreichen Farben, etwa Vogelbeeren.

Besonders attraktive Düfte verströmen viele Früchte, die in den Mägen der meist sehr geruchsempfindlichen Säugetiere landen. Diese Diasporen sind größer und hartschaliger und fallen in reifem Zustand oft zu Boden – so zum Beispiel Birnen und Äpfel. Ihre Samen sind häufig klein, spitz und glatt und flutschen deshalb unbeschadet durch die Zähne der Tiere.

Farbe, Duft und Wohlgeschmack nehmen all diese Früchte allerdings erst an, wenn die Samen reif sind. Sonst bestünde die Gefahr, dass die Diasporen zu früh gefressen werden.

WIEDER ANDERE PFLANZEN haben keine ausgeprägten Strategien entwickelt, um ihre Verbreiter anzulocken. Sie heften oder kleben sich einfach an jedes Tier, das zufällig vorbeistreift. Diese Diasporen haben häufig Haare mit elastischen Häkchen.

Besonders hartnäckig setzt sich die „Dornige Spitzklette“ an allem fest, was in ihre Nähe kommt. An Tierfell, Menschenkleidung oder anderes stoffähnliches Material geklammert, schaffte die aus Südamerika stammende Spitzklette den Sprung auf sämtliche Kontinente. Diese Verbreitungsform inspirierte den Schweizer Ingenieur George de Mestral einst dazu, den Klettverschluss zu erfinden, bei dem sich feinste aufgeschnittene Schlaufen aus Nylon im Filz des Gegenstücks verhaken.

Sehr viele Samen – mit und ohne Klettvorrichtung – finden sich im dicken Wollpelz von Schafen. Bei Feldforschungen auf der Schwäbischen Alb wurde ermittelt, dass eine Herde von bis zu 400 Wiederkäuern in einem Sommer mehr als drei Millionen Diasporen von etwa 100 Pflanzenarten auf ihren Wanderungen oft über 100 Kilometer weit trägt.

Schleimig-klebrig sind die Früchte der Moschus-Malve bei feuchtem Wetter. Sie haften dann etwa an Huftieren



* Da viele Arten mehr als ein Vehikel (Luft, Wasser, Tiere) nutzen, erreicht die Summe der Ausbreitungsarten über 100 Prozent.

Viele Samen werden als Klette im Fell von Tieren an neue Orte transportiert – eine Schafherde trägt im Durchschnitt etwa drei Millionen Diasporen von 100 verschiedenen Pflanzenarten

Andere Diasporen verbreiten sich dank im Tierreich recht häufiger Eigenschaften: Sammellust und – zumindest partieller – Vergesslichkeit. Die Früchte von Buchen, Eichen und Tannen werden unter anderem von Eichhörnchen und Tannenhähern als Wintervorrat versteckt.

In der kalten Jahreszeit finden die Tiere aber einen Teil ihres vergrabenen Schatzes nicht wieder. Beispielsweise verscharrt ein Tannenhäher in einer Saison durchschnittlich 100 000 Samen in rund 30 000 Verstecken – und bis zu 15 Kilometer vom Sammelort entfernt. Ein Viertel davon entdeckt der Vogel im Winter aber nicht wieder. Die verschonten Samen liegen dann bereits im Boden, wo sie gut keimen können.

Ein weiteres Tier dient Waldkräutern, Stauden und niedrigen Büschen der Krautschicht unserer Wälder zur Verbreitung: die Ameise. An den Samen der meisten dieser Gewächse hängt ein eiweiß-, zucker-, stärke- oder fettreiches „Ameisenbrot“. Die Insekten schleppen den Fund in den Bau, wo sie in Ruhe den Leckerbissen verzehren und den Samen schließlich hinauswerfen: dorthin, wo bereits andere Abfälle und tote Ameisen einen fruchtbaren Komposthaufen gebildet haben – ideale Startbedingungen für den Samen.

EIN DRITTEL DER IN DEUTSCHLAND heimischen Pflanzen aber ist auf keinerlei fremde Hilfe angewiesen, sie können sich selbst ausbreiten, zumindest über kurze Distanzen. Im Reifezustand schleudern, schießen oder spritzen sie aus eigener Kraft ihre Samen fort. Oft sind es einjährige Gewächse, deren Nachkommen also nicht mit der Mutterpflanze konkurrieren müssen. Der

Mechanismus beruht auf dem plötzlichen Abbau hoher Spannungs- oder Druckunterschiede im Pflanzengewebe und wird durch Wasserübersättigung oder, häufiger, durch Austrocknung ausgelöst (siehe Seite 100).

Zur ersten Gruppe zählt das in Mitteleuropa verbreitete Rührmichnichtan. Die inneren und äußeren Zellschichten der Fruchtwand sind unterschiedlich aufgebaut. Beim Heranreifen wird in der äußeren Schicht mehr Wasser eingelagert, sodass sie im Verhältnis zur inneren Schicht anschwillt – es entsteht eine Gewebespannung. Reift die Frucht, lösen sich die Nähte zwischen den verwachsenen Fruchtblättern auf und halten dem Druck der äußeren Fruchtwand nicht mehr stand – sie geben schlagartig nach. Dann rollen die einzelnen, jetzt voneinander gelösten Fruchtblätter blitzschnell nach innen und schleudern die Samen bis zu drei Meter weit.

Der brasilianische Sandbüchsenbaum gehört zur zweiten Gruppe. Wenn der Samen reif ist, trocknet der Samenbehälter aus, wodurch sich Spannung aufbaut. Irgendwann reißt die Frucht auf und katapultiert die Samen bis zu 14 Meter weit – und zwar mit einem lauten Knall, der kracht wie ein Gewehrschuss.

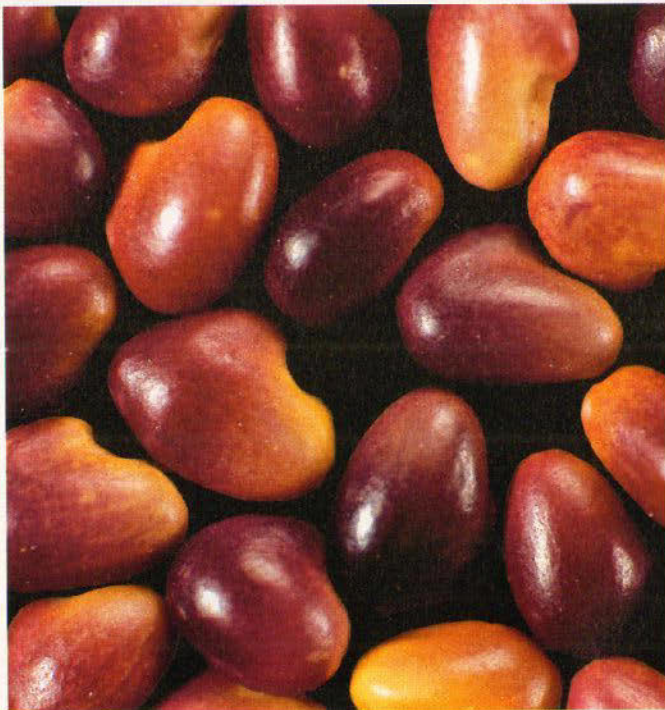
Haben die Diasporen am Ende ihrer Reise den Boden erreicht, keimen nicht alle gleichzeitig. Manche liegen tiefer im Boden als ihre Artgenossen, andere haben eine dickere Schale. So entsteht eine Samenbank. Sie dient auch der Risikostreuung: Wenn alle Diasporen einer Art simultan keimen würden, könnten zu viel Konkurrenz, zeitweilig ungünstige Umwelt- und Wetterbedingungen oder Krankheiten den Bestand gefährden.

Die meisten Samen bewahren ihre Keimfähigkeit über Jahre. Auf einen spektakulären Fall von Langlebigkeit stießen Forscher bei Ausgrabungen einer 2000 Jahre alten japanischen Bauernsiedlung. Sie fanden einen Samen, pflanzten und begossen ihn. Zum Vorschein kam eine Magnolie, in deren erster Knospe nicht wie bei heutigen Arten sechs Blütenblätter verborgen waren, sondern acht – möglicherweise also das Exemplar einer längst ausgestorbenen Spezies.

DIE SAMENBANKEN IM BODEN der Vulkaninsel Krakatau waren nach der Eruption unter einer festen, bis zu 80 Meter hohen Schicht vor allem aus Asche begraben. Doch obwohl Edmond Cotteau an jenem Maitag des Jahres 1884 nichts als trostlose Ödnis vor sich sah, schrieb er optimistisch in seinen Reisebericht: „Diese tote Erde wird schon bald wieder in einen grünen Schmuck gehüllt sein.“

Er hat die Mobilität der Pflanzen nicht überschätzt. □

Katharina Kramer ist Wissenschaftsautorin in Hamburg. Beratung: Dr. Oliver Tackenberg, Institut für Botanik, Universität Regensburg.



Ameisen, grasfressende Tiere und sogar Regenwürmer sorgen für die Verbreitung der Samen des Rotklees

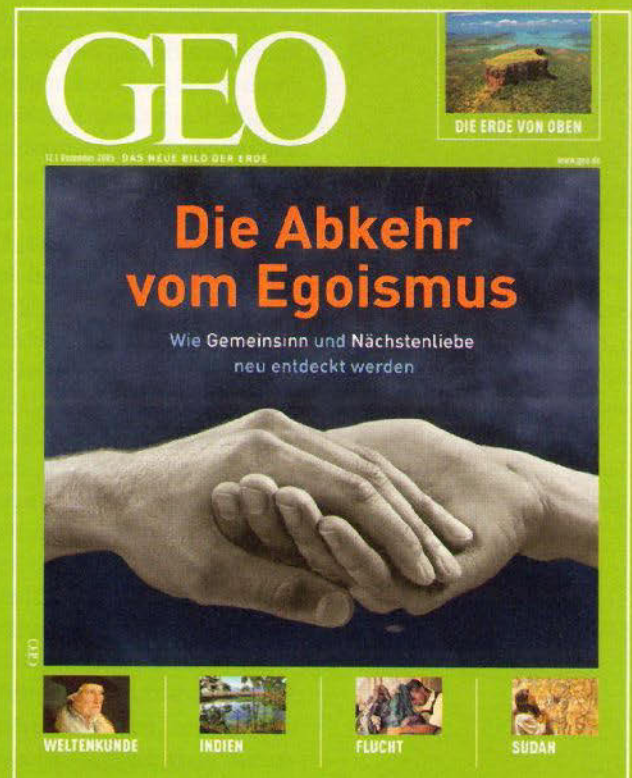


Jetzt im Handel



Macht mehr aus jedem Einzelnen: **Gemeinsinn.**

Ich-Gesellschaft, ade: Fünf Milliarden Arbeitsstunden widmen Menschen jährlich dem Wohl anderer – freiwillig, ehrenamtlich und selbstlos. Erfahren Sie alles über diese Art der Nächstenliebe und ihren ideellen und materiellen Wert. Jetzt im neuen GEO.



Der Mann, der Ordnung ins Leben brachte

Als erster Forscher veröffentlichte der schwedische Botaniker Carl Linnaeus 1735 eine Systematik, die Pflanzen und Tiere anhand von gemeinsamen Merkmalen einordnet – so etwa die Gewächse nach ihren Sexualorganen. Linnaeus erfand auch die noch heute verwendete lateinische Doppelbenennung für die Arten: etwa *Homo sapiens* für den Menschen

Text: Matthias Glaubrecht

So etwas hat der junge Schwede noch nicht gesehen. Auf dem großen Landgut südlich der niederländischen Stadt Haarlem gedeiht üppige Pflanzenpracht. Kakteen, Orchideen, Passionsblumen und Bananenstauden zieren den Garten des Bankiers und Naturliebhabs George Clifford. An jenem 13. August 1735 verblüfft indes auch der 28-jährige, frisch promovierte Carl Linnaeus seinen Gastgeber.

Denn obgleich er die meisten der Pflanzen nie zuvor gesehen hat, vermag er sie alle sicher einzuordnen – und zwar, indem er ihre Blüten inspiziert. Clifford stellt Linnaeus daraufhin an, damit er die Pflanzen seines weitläufigen Gartens katalogisiert. Bis zum Sommer 1738 bleibt der Schwede in Holland. Und erprobt hier ein revolutionäres System.

Sein Wirken ist vielen Zeitgenossen suspekt, offenbart es doch vermeintlich moralische Abgründe. Denn der junge Forscher teilt die Blütenpflanzen anhand ihres Geschlechtslebens ein. Bereits während seines Studiums hat er sich neben seinem Fach Medizin auch mit dem Aufbau der pflanzlichen Fortpflanzungsorgane beschäftigt – den Blüten, die zumeist aus vier Einheiten bestehen: den oft grünen Kelchblättern, welche die eigentliche Blüte umgeben; den meist farbigen Kronblättern; den Staubblättern, die als männliche Sexualorgane den **Pollen** bilden; und schließlich den Fruchtblättern mit den weiblichen Geschlechtsorganen, welche die Eizellen herstellen (siehe Seite 38).

Alle vier Einheiten sind je nach Pflanze in unterschiedlicher Anzahl, Form und Lage vorhanden. Schon 1730 verfasst Linnaeus eine kleine Abhandlung zu den „Hochzeiten der Pflanzen“. Religiöse Fanatiker empören sich über die angeblich jugendgefährdende Sprache des Traktats.

Denn für den Autor ist das Blüteninnere ein „Hochzeitsbett, das der große Schöpfer so herrlich hergerichtet, mit so edlen Vorhängen und Düften versehen, damit das Paar dort seine Hochzeit mit einer erhöhten Feierlichkeit begehen kann“.

In mächtiger Metaphorik beschreibt Linnaeus die vielfältigen sexuellen Verhältnisse, die er in den Blüten vorfindet, darunter nicht nur „die gleiche Zahl von Ehemännern und -frauen in unbeschwerter Freiheit“, sondern auch „20 Männer oder mehr im selben Bett mit einer Frau“, wie beim Mohn, oder gar Zustände wie bei der komplex gebauten Ringelblume, „wo sich die Betten der Verheirateten in der Mitte, die der Konkubinen am Rande befinden, die Ehefrauen aber unfruchtbar und die Konkubinen fruchtbar sind“.

Diese Vielgestaltigkeit zieht der Schwede zur Unterscheidung heran und entwickelt ein Bestimmungssystem. Ende 1735 veröffentlicht er die erste Ausgabe seines Werkes „Systema Naturae“ und versucht darin auf elf großen Folioblättern die „drei Reiche der Natur“ – die Welt der Steine, Pflanzen und Tiere – in ein logisches System zu bringen.

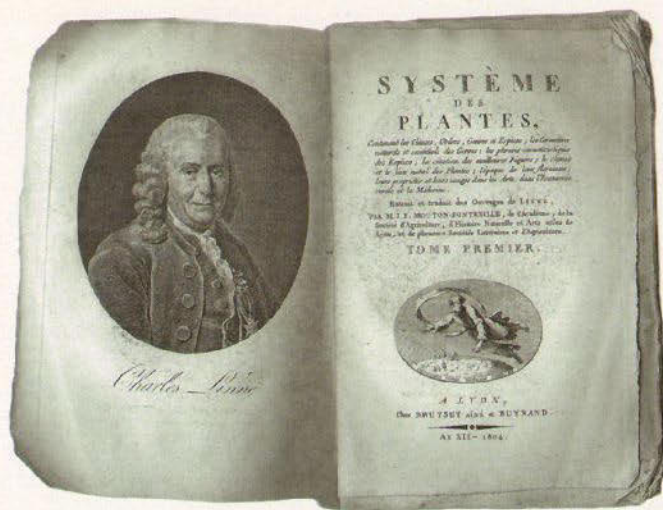
Linnaeus gliedert die Gewächse zunächst in Blütenpflanzen und Blütenlose Pflanzen, dann nach Art der Blüten: solche mit männlichen und weiblichen Geschlechtsorganen oder aber solche, in denen jeweils nur ein Geschlecht vertreten ist. Die Anzahl, Länge und Lage ihrer Staubblätter dient ihm dann für die Einteilung in Klassen. Eine Klasse wiederum unterteilt er in Ordnungen – und zwar anhand der Zahl der Fruchtblätter. Jede Ordnung gliedert er nach weiteren anatomischen Eigenschaften in Gattungen, dann in Arten, die kleinsten Einheiten, die sich in der Anordnung der Blütenteile unterscheiden.

Auch die Tierwelt stuft Linnaeus nach seinem hierarchischen System ein, jedoch nicht durchgängig, weil über die Anatomie weniger bekannt ist.

Dies ist keineswegs der erste Versuch, Ordnung in die Vielfalt der Natur zu bringen. Die Gelehrten haben Organismen bis dahin meist willkürlich in alphabetisch angelegten Katalogen aufgelistet oder sie nach Lebensräumen eingeteilt – Fische und Wale etwa in einer Gruppe zusammengefasst. Linnaeus



Nach ihrem Blütenbau fasste Carl Linnaeus die Pflanzen in diesem 1861 erschienenen Holzstich zu Klassen und Ordnungen zusammen. Hinweise auf Verwandtschaften lieferten ihm die Sexualorgane der Blüten: die Frucht- und Staubblätter



Mit seinen Schriften zur Systematik von Pflanzen und Tieren – hier eine französische Ausgabe des Werks »System der Pflanzen« (1804) – revolutionierte Carl Linnaeus die Biologie. Dafür wurde er vom schwedischen König 1761 zu »Carl von Linné« geadelt

dagegen erkennt Wale erstmals als Säugetiere und führt für diese Tierklasse den Namen **Mammalia** ein – nach den für sie typischen Milchdrüsen.

Im Sommer 1736 reist der Schwede nach London, um Pflanzen für Cliffords Garten zu kaufen. Erboast stellt er fest, mit welch umständlichen Bezeichnungen sich die Botaniker abmühen. „Verwenden Sie doch nicht diese Namen“, weist er einen von ihnen zurecht, „wir haben kürzere und präziserer!“

Tatsächlich hat er sich ein ebenso einfaches wie geniales Prinzip der Benennung ausgedacht. Während eine Johannisbeerart bei den Botanikern noch umständlich *Grossularia, multiplici acino: seu non spinosa hortensis rubra, seu ribes officinarium* heißt (Johannisbeere mit vielen Beeren, die entweder als unbedornete rote Gartenform oder als Heilpflanze auftritt), wird daraus bei Linnaeus schlicht *Ribes rubrum* (Rote Johannisbeere).

Solche Namenskombinationen überträgt er auch auf das Tierreich. Das Wortungetüm „Der auf denen grossen Disteln sich aufhaltende Schild-Kefer“ etwa verkürzt er zu *Cassida vibex* (Rostiger Schildkäfer). Seine Methode einer einheitlichen Doppelbezeichnung aus Gattungszuordnung (*Cassida*) und einem charakteristischen Beiwort (*vibex*) für die Art, gleiche, so der Schwede, „dem menschlichen Familiennamen und dem Vornamen des täglichen Lebens“ und erleichtere den wissenschaftlichen Diskurs über die Bestimmung von Organismen.

Immer mehr Gattungen und Arten beschreibt Linnaeus. Zwischen 1735 und 1758 steigt die Zahl der verzeichneten Tiere in zehn Auflagen seines Buches von 549 auf 4387. Das Werk markiert den Beginn der modernen botanischen und zoologischen Nomenklatur – der wissenschaftlichen Benennung von Organismen. Mit der umfangreichen zehnten Auflage der „Systema Naturae“ von 1758 verlieren alle anderen bisherigen Bezeichnungen für Lebewesen ihre Gültigkeit.

Auch heute noch ist dieses System in Gebrauch. Biologen nutzen allerdings nicht mehr ausschließ-

lich äußere Merkmale, sondern beziehen auch genetische Unterschiede mit ein, die in der Anatomie nicht festzustellen sind. Systematiker haben zudem neue Ebenen eingeführt und teilen die Welt des Lebens nun in drei Domänen auf: Bakterien, Archaeobakterien und **Eukaryoten**. Letztere werden in mindestens vier Reiche untergliedert, etwa das der Tiere und das der Pflanzen (siehe Seite 165).

Eine Feldmaus etwa gehört zum Reich der Tiere, in der nächsten GroÙebene zum Stamm der **Chordatiere** (nach der „Chorda“, einem unter dem Rückenmark gelegenen elastischen Stab), dann zum Unterstamm der Wirbeltiere, zur Klasse der Säugetiere, zur Ordnung der Nagetiere, zur Familie der Wühler und schließlich zur Gattung *Microtus*. Ihr Artnamen ist *Microtus arvalis*.

Als Linnaeus – 1761 zu Carl von Linné geadelt – im Januar 1778 nach einem Schlaganfall stirbt, wird er von Gelehrten und Schülern in ganz Europa gewürdigt: als Mitbegründer und erster Präsident der Schwedischen Akademie der Wissenschaften, als Professor für Botanik und Medizin, Direktor des Botanischen Gartens in Uppsala – und als begnadeter Lehrer. Frei von falscher Bescheidenheit, hinterlässt er der Nachwelt eine fulminante Würdigung des eigenen Wirkens: „Ich habe mehr von dem Wunderwerk des Schöpfers gesehen als irgendein Sterblicher, der vor mir gelebt hat“, so Linné in einer seiner Autobiografien. „Ich habe einen großen Namen errungen bis zu den Indern selber hin und bin als der Größte innerhalb meiner Wissenschaft anerkannt worden.“

In einer Annahme hat er sich dennoch geirrt: Zeitlebens glaubt er, dass es auf der Erde kaum mehr als 6000 Pflanzen- und 4400 Tierarten gibt. In Wirklichkeit aber gehen Linnés wissenschaftliche Erben heute von 13 bis 30 Millionen Arten aus.

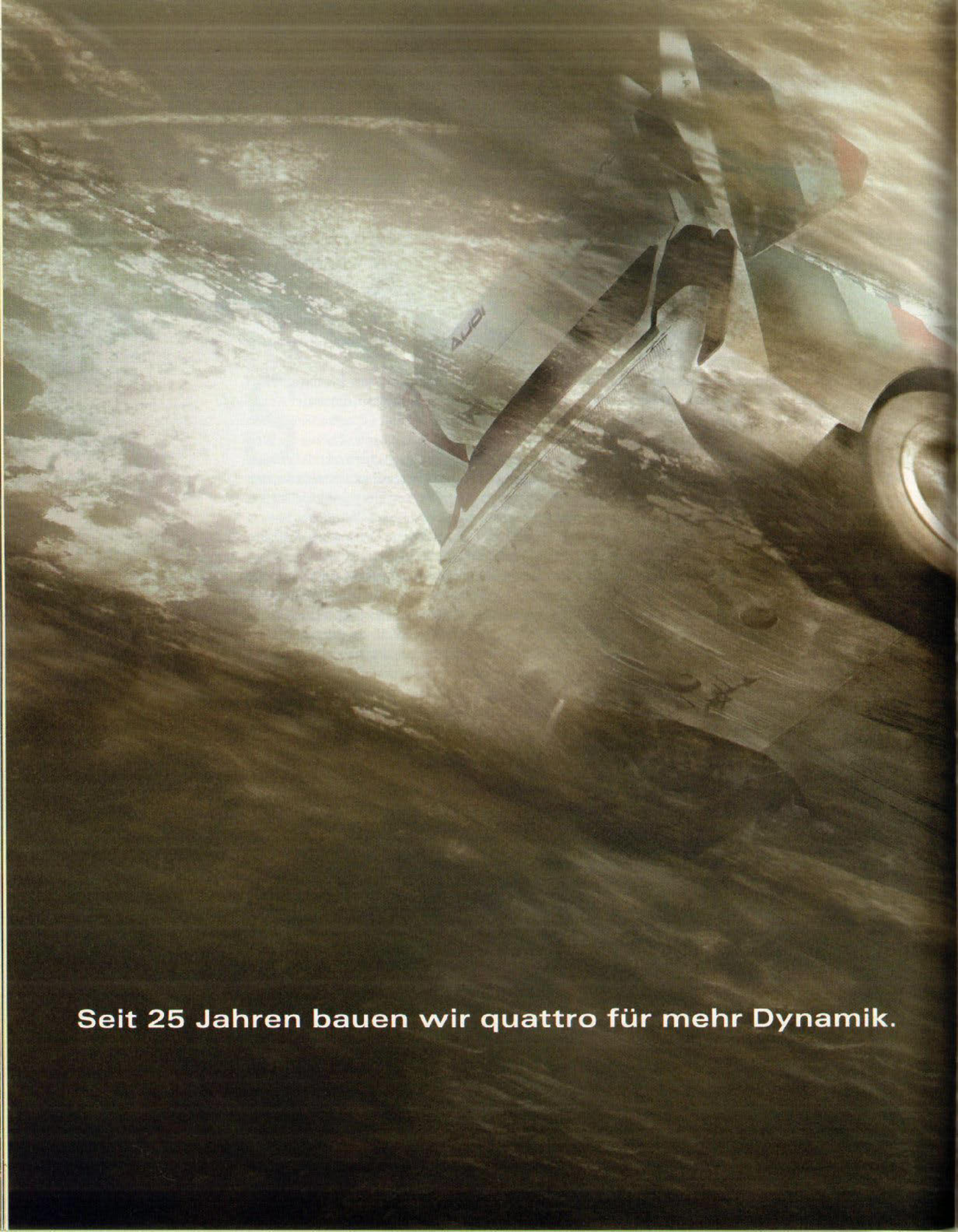
Nach seinem System benannt sind davon bislang aber erst weniger als zwei Millionen. □

Dr. Matthias Glaubrech, 43, ist Evolutionsbiologe und Kurator am Museum für Naturkunde in Berlin.

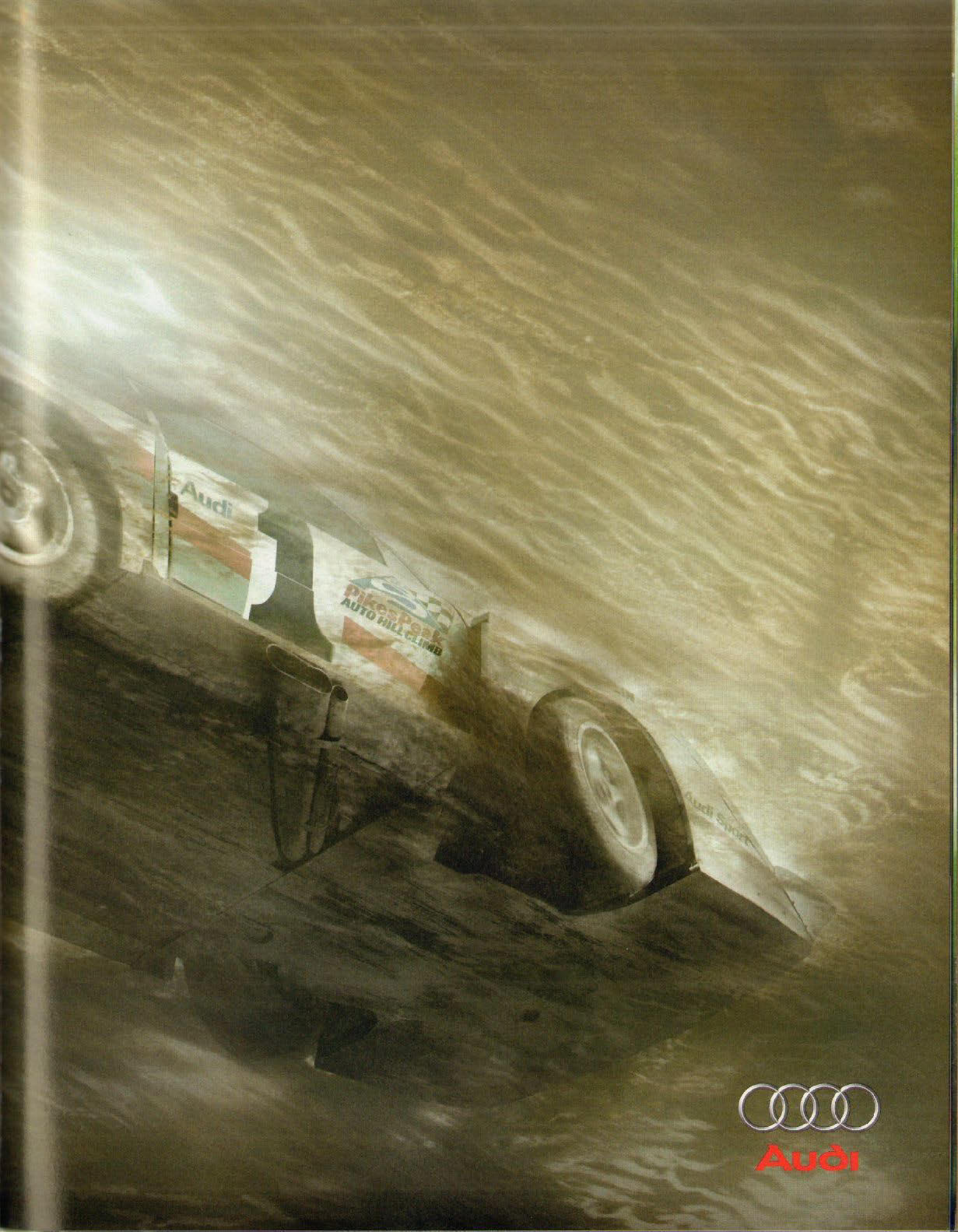


Selbst im eigenen Garten

klassifizierte Linnaeus wie besessen die Flora. Über zwei Jahrzehnte seines Lebens verbrachte er als Professor für Botanik und Medizin im schwedischen Uppsala



Seit 25 Jahren bauen wir quattro für mehr Dynamik.





**Jetzt haben wir ein Auto für mehr quattro gebaut.
Der Audi Q7. Vom Erfinder des quattro®**

Im Audi Q7 stecken die Gene jener Autos, die mit quattro Rennsportgeschichte geschrieben haben. Wie der Audi Sport quattro S1 „Pikes Peak“, mit dem Audi dreimal in Folge das legendäre Rennen zum Gipfel des Pikes Peak gewonnen hat – in Rekordzeit. Der Audi Q7 hat alles, was quattro auf der Straße überlegen

macht. Dazu überzeugt er auch auf schwierigem Terrain. Der Audi Q7 ist die neue Generation quattro – mit überzeugenden Fahrleistungen, durchzugsstarkem FSI- oder TDI-Motor und Raum für bis zu sieben Personen. Seine Eigenschaften machen ihn zum echten Performance-SUV. Und zum Audi für mehr quattro.

Vorsprung durch Technik www.audi.de/q7globe






Der Kraftstoff des Lebens



Pflanzen nutzen das Sonnenlicht, hoch komplexe Zellstrukturen aufzubauen. Bodenorganismen setzen aus organischen Substanzen das Pflanzenwachstum frei. So bleibt



BEWEGUNG benötigt viel chemische Energie. Der Körper gewinnt sie aus der Verbrennung organischer Stoffe, etwa Zucker. Dabei wird Wärme frei, die diese Wapiti-Hirsche zum Dampfen bringt

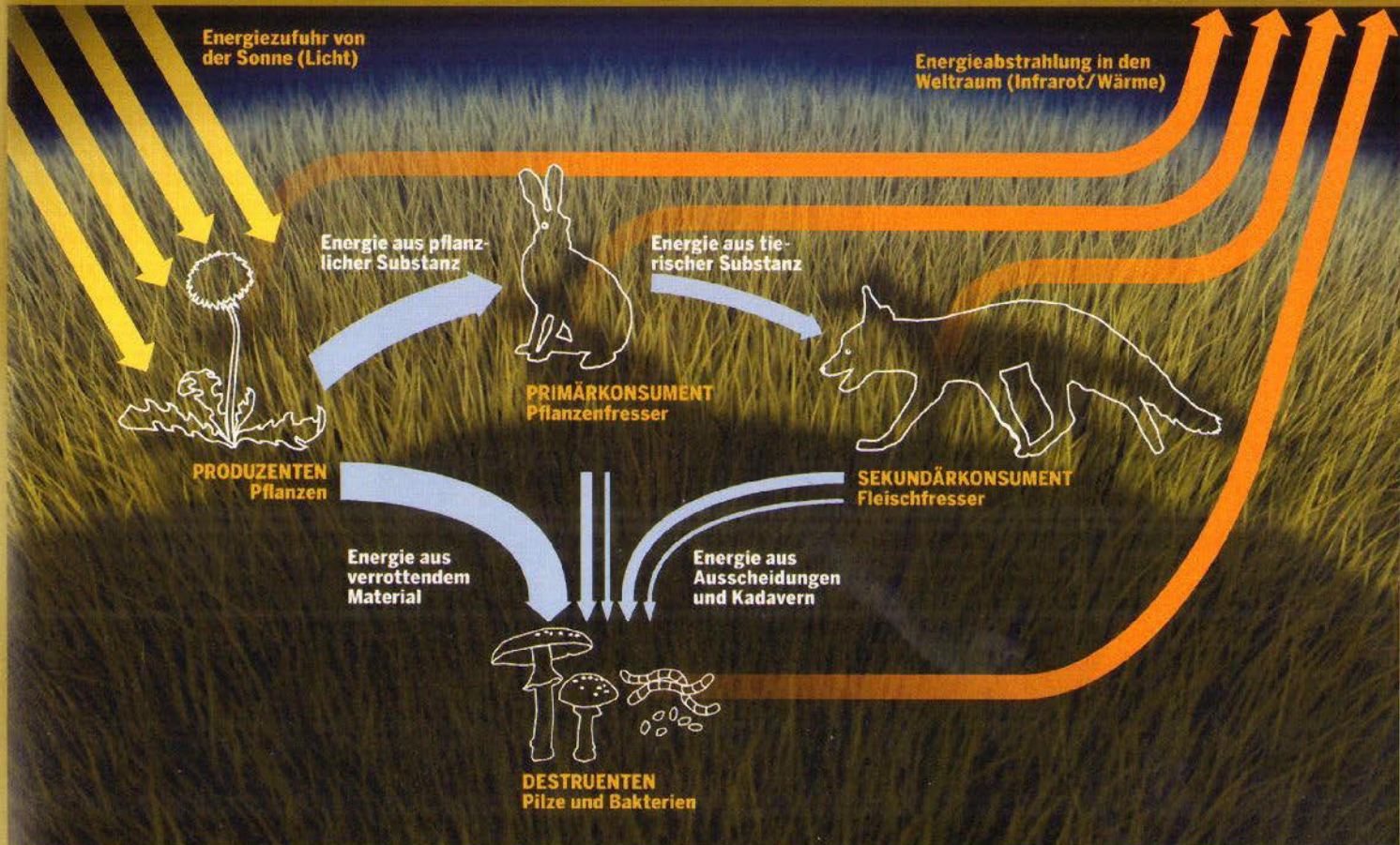
Text: Henning Engeln; Illustrationen: Jochen Stuhmann

um Energie chemisch zu binden und
aufzubauen. Tiere fressen und verarbeiten sie.
Aus organischen Resten Mineralsalze für neues
Leben. Ein gigantischer Kreislauf der Stoffe in Gang



Mit dieser Energie bringen die Pflanzen ein Kunststück fertig, das in der unbelebten Natur unmöglich ist: Sie bauen aus simplen, in der Atmosphäre umherschwirrenden Kohlendioxid-Gasmolekülen (CO_2) sowie Wasser (H_2O) dank der **Photosynthese** zunächst energiereichen Zucker zusammen. Und konstruieren dann, unter Verwendung weiterer chemischer Elemente, Tausende von unterschiedlichen, kompliziert aufgebauten

Zwischen den Organismen auf der Erde zirkuliert ständig Materie (in Form von Kohlenstoffverbindungen) sowie die in dieser Materie gespeicherte Energie (die ursprünglich von der Sonne kommt und irgendwann als Wärmestrahlung wieder ins All abgegeben wird). Ohne diesen verwobenen, perfekt ausbalancierten Prozess der Weitergabe und Umwandlung – hier vereinfacht in zwei Vorgängen dargestellt – wäre das Leben auf unserem Planeten nicht möglich



WIE ENERGIE WEITERGEGEBEN WIRD

Das Sonnenlicht liefert Pflanzen jene Energie, die sie befähigt, organische Substanzen selbst aufzubauen. Pflanzenfresser ernähren sich von der Vegetation und nutzen die darin gespeicherte Energie zu ihrer Versorgung. Fleischfresser vertilgen wiederum Pflanzenfresser und profitieren so von deren Energie. Wenn Lebewesen verrotten oder Kot ausscheiden, nutzen Bodenorganismen die in diesen Resten gespeicherte Energie. Bei jedem dieser Schritte wird also mit der Substanz auch Energie „weitergereicht“. Die verringert sich dabei jedoch beträchtlich: Pflanzen und Tiere geben immer nur einen Teil der aufgenommenen Energie an den nächsten Konsumenten weiter, weil sie manches davon für ihre eigenen Stoffwechselprozesse verbrauchen – und ständig Wärmeenergie an die Umwelt abstrahlen

Molekülen, die fast alle **Kohlenstoff** enthalten.

Diese Moleküle bilden die Substanz und biochemische Maschinerie der Pflanzenzellen, aus denen die unterschiedlichsten Pflanzenkörper geformt werden, von der Alge bis zum Mammutbaum. Auf diese Weise ist ein Teil der von der Sonne abgestrahlten Energie nun in den Pflanzen gespeichert.

All die Energie, die in der Biomasse der Vegetation enthalten ist, wird wiederum von den tierischen Pflanzenfressern genutzt. Sie zerlegen das Grünzeug in seine

molekularen Bestandteile, um daraus ihren eigenen Körper aufzubauen.

Auf die gleiche Art verwerten daraufhin Fleischfresser die Körper der von ihnen erbeuteten Opfer. Pilze, Würmer und Bakterien zersetzen schließlich die Reste toter Tiere oder abgestorbener Pflanzenteile. Und all diese biochemischen Prozesse erzeugen Wärme.

So entsteht ein unaufhörlicher Kreislauf des Werdens und Vergehens, bei dem Kohlenstoff aus dem Kohlendioxid der Luft entnommen und in organisches Material eingebaut wird, dann durch ver-

schiedene Körper wandert und letztlich – bei der **Zellatmung** – mit Sauerstoff wieder zu Kohlendioxid verbrannt wird und beim Ausatmen in die Luft entweicht.

Es ist ein vielfach ineinander verzahnter Vorgang der energetischen und stofflichen Wandlungen, ein permanentes Auf und Ab zwischen **anorganischen** und organischen Substanzen, zwischen geringer und extrem hoher molekularer „Ordnung“, zwischen Physik und Biochemie.

Im Prinzip ist der belebte Planet Erde also eine gigantische Maschinerie, die die Energie der Sonne über einen viel-

schichtigen Prozess der Wandlungen durch unterschiedlichste biochemische Verbindungen schleust, um sie zu guter Letzt in Form von Wärmestrahlung in den kalten Weltraum abzugeben.

Doch wie genau fängt das Leben die Sonnenenergie ein? Wie betreibt es seine biochemische Maschinerie? Und: Wie gewinnt es den Kampf gegen den physikalischen Hang der unbelebten Natur zur Durchmischung der Stoffe, zur Unordnung, der den Aufbau komplizierter Moleküle eigentlich verhindern müsste?

DIE SUCHE NACH einer Antwort führt zu jenen Einheiten, aus denen jedes Lebewesen aufgebaut ist: den **Zellen**. Sowohl bei Pflanzen wie auch bei Tieren sind Zellen wahre Wunderwerke. Denn es handelt sich bei ihnen um hoch organisierte Minifabriken aus komplexen Strukturen und – teilweise riesigen – Molekülen. Um Fabriken, die fast alle Substanzen, die sie zum Überleben brauchen, selbst herstellen (siehe Seite 54).

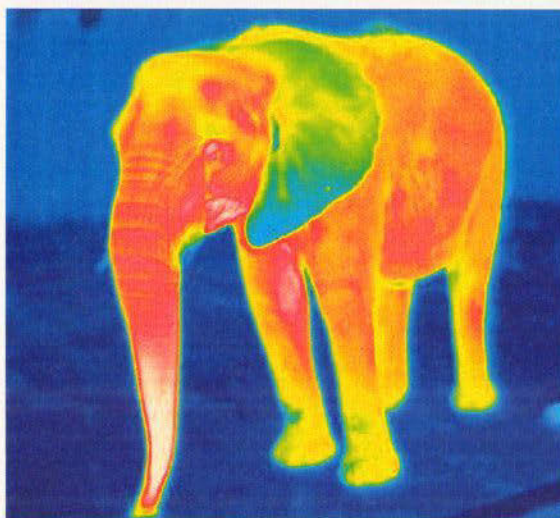
Gerade mal vier chemische Elemente (Kohlenstoff, Wasserstoff, Stickstoff, Sauerstoff) machen mehr als 96 Prozent des Gewichtes einer Zelle aus. Deren Atome werden in den Minifabriken zu mehreren tausend unterschiedlichen Molekül-Typen verbunden. Etwa zu Eiweiß-Molekülen, die – aus durchschnittlich rund 1500 Atomen zusammengesetzt – Bestandteil fast aller Zellstrukturen sind (siehe Seite 168).

Die enorme Vielfalt dieser komplexen Bauteile erschafft eine Pflanzenzelle aus den einfachen Kohlendioxid-Molekülen der Luft sowie aus dem Boden entnommenem Wasser und darin gelösten Mineral-salzen wie **Nitrat** (NO_3). Dieser Konstruktionsvorgang erfordert Energie – welche die Pflanze über das Sonnenlicht erhält.

Wie viel davon am Ende in den organischen Molekülen steckt, können Forscher auf einfache Weise ermitteln: Sie verbrennen getrocknete organische Substanz in einem geschlossenen Gefäß und messen die dabei entstehende Wärmemenge. Traubenzucker zum Beispiel setzt 16 Kilo-

joule Energie je Gramm frei, Eiweiße enthalten im Mittel 17 und verdauliche Fette 37 Kilojoule je Gramm.

DAS LEBEN ABER braucht für den Aufbau der Moleküle nicht irgendeine Energie, sondern – um neue Ordnung



EIN WARMBLÜTER wie dieser Elefant strahlt ständig viel Wärme ab, wie die roten Anteile dieser Infrarotaufnahme zeigen. Bei hohen Temperaturen laufen chemische Reaktionen schneller ab; der Preis dafür ist ein großer Energiebedarf

zu schaffen – eine spezielle Form davon. Denn eine Zelle ist ein extrem geordnetes biochemisches Konstrukt, das nicht von selbst entsteht. Schließlich hat die Welt einen starken Hang zur Unordnung.

Diese Aussage gründet sich nicht etwa auf einen vagen Verdacht, sondern lässt sich exakt mithilfe eines Naturgesetzes beschreiben, das 1865 entdeckt und als Zweiter Hauptsatz der Thermodynamik (Wärmelehre) bekannt wurde.

Damals prägte der deutsche Physiker Rudolf Julius Emmanuel Clausius für das physikalische Phänomen der „Unordnung“ den Begriff **Entropie**.

Er formulierte die Erkenntnis: „Die Entropie des Universums strebt einem Maximum zu.“ Das bedeutet: Seine Unordnung nimmt unaufhörlich zu.

Was Entropie ist und wie sie sich auswirkt, veranschaulicht ein Gedankenexperiment: Wenn ein Mensch den Boden einer Kiste mit farbigen Pingpong-

bällen belegt und sie dabei so sortiert, dass auf der rechten Seite alle blauen und auf der linken Seite alle roten Bälle liegen, sind die Farben geordnet – die Entropie (Unordnung) ist gering.

Wird die Kiste nun kräftig geschüttelt, durchmischen sich die Bälle und verteilen sich nach dem Zufallsprinzip – die Entropie nimmt zu. Die Wahrscheinlichkeit, dass sich durch weiteres Schütteln sämtliche blauen Bälle wieder auf der einen Seite ansammeln und alle roten auf der anderen, ist extrem gering.

Nur ein Mensch, der die Bälle sortiert, kann die Ordnung jetzt wieder vergrößern – und muss zu diesem Zweck Energie aufwenden.

Ähnlich geht es in der Welt der Moleküle zu. Weil sie sich unaufhörlich in Bewegung befinden – nichts anderes ist Wärme –, besteht eine ständige Neigung zur Durchmischung und damit zur Vergrößerung der Entropie.

Lebewesen aber sind genau das Gegenteil, nämlich hochgradig geordnet. Die Bestandteile und Strukturen einer Zelle müssen sich an ganz bestimmten Orten befinden, damit das Ganze funktionieren

kann. Die molekularen Bestandteile einer Zelle würden sich genauso wenig selbst arrangieren wie etwa die in einer Kiste zusammengeworfenen Einzelteile eines Staubsaugers.

Wie aber bringt es das Leben fertig, ständig neue Ordnung zu schaffen, obwohl scheinbar ein fundamentales Naturgesetz dagegen spricht?

Des Rätsels Lösung ist im Sonnenlicht verborgen: in der Fähigkeit des Lebens, dessen Energie zu nutzen.

Darauf sind die Pflanzen spezialisiert. Und sie leisten das mithilfe einer genialen Erfindung, welche die Natur bereits vor mehr als 2,5 Milliarden Jahren gemacht hat: der Photosynthese.

Mittels der Photosynthese kann eine Pflanze nicht nur Energie einfangen, sondern auch die Unordnung der Baustoffe vermindern. Die geheimnisvolle Transformation geschieht in speziellen Zellbestandteilen, den **Chloroplasten**.

In ihnen befinden sich hoch komplex angeordnete **Chlorophyll**-Moleküle, die die Lichtquanten der Sonne absorbieren und deren Energie zunächst in elektrische, dann – über mehrere komplizierte Zwischenstufen – in biochemische Energie umwandeln.

Was die Energie der Lichtquanten letztlich bewirkt, ist Folgendes: Aus je sechs gasförmigen CO_2 -Molekülen und sechs Wassermolekülen entstehen ein Traubenzuckermolekül (**Glukose**, $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$) sowie sechs Sauerstoffmoleküle (O_2), die in die Luft entweichen und Mensch wie Tier die Atmung ermöglichen.

Das Zuckermolekül speichert nun Energie, ist also energiereicher als die Ausgangsstoffe – ähnlich wie eine aufgeladene Autobatterie.

Die Pflanzenzelle hat also durch den Aufbau der Glukose chemische Energie gewonnen. Was aber hat das mit der Entropie, also der Unordnung, zu tun?

Auch in Bezug auf das Verhältnis zwischen Ordnung und Unordnung in der Natur hat sich während der Photosynthese etwas geändert: Da aus sechs ungeordnet in der Luft herumschwirrenden Kohlendioxid-Molekülen am Ende ein Zuckermolekül mit fester Struktur entstanden ist, ist die Ordnung größer geworden und damit die Entropie geringer.

Nach den Erkenntnissen der Physik aber gilt: Wenn irgendwo Ordnung entsteht, muss an anderer Stelle die Unordnung zunehmen.

Doch wo in der Zelle ist das geschehen?

Die Antwort: Einerseits erhält die Zelle Sonnenlicht mit geringer Entropie, das sie für die Photosynthese nutzt – auf der anderen Seite aber gibt sie über ihre **Spaltöffnungen** Wärme ab, die als „Abfall“ bei jedem biochemischen Prozess entsteht. Und da es sich bei der Wärmeenergie um ungeordnete Bewegungen von Molekülen handelt, ist ihre Entropie hoch. Wärme ist sozusagen die maximale Form von Unordnung.

FÜR DIE ZELLE ist es ein Segen, dass sie Energie mit hoher Entropie abgeben kann. Dies passiert, indem Wasser aus der Zelle verdunstet. Da Wassermoleküle im

Dampf – also in Gasform – ungerichtet durcheinander schwirren, ist ihre Ordnung geringer als im flüssigen Wasser, wo sie viel enger gepackt sind und sich gegenseitig beeinflussen. Nur deshalb ist es der Pflanzenzelle möglich, das Sonnenlicht zu nutzen und in ihrem Inneren die Ordnung zu erhöhen.

Von der gesamten einfallenden Lichtmenge kann ein Blatt allerdings nur einen Bruchteil tatsächlich verwerten: Weil zum Beispiel UV-Strahlung, Infrarot- oder grünes Licht nicht vom Chlorophyll absorbiert werden, sind für die Pflanze nur 40 Prozent der empfangenen Lichtenergie verwertbar. Acht Prozent hiervon werden vom Blatt reflektiert oder durchgelassen; nochmals acht Prozent werden als Wärme frei und gehen verloren; 19 Prozent schließlich verschlingen die Stoffwechselvorgänge des Blattes.

So kommt es, dass letztlich nur fünf Prozent der auf das Blatt einstrahlenden Sonnenenergie chemisch gespeichert werden. Von den 17 280 Kilojoule, die durchschnittlich jeden Tag auf einen Quadratmeter bewachsene Erdoberfläche entfallen, werden nur 864 Kilojoule in Form von Glukose eingelagert.

Ein Zuckermolekül enthält mehr Energie und innere **Ordnung** als das gasförmige Kohlendioxid

Mit dessen Bildung allerdings hat die pflanzliche Zelle einen Riesenschritt gegen das Chaos getan. Die Glukose liefert nämlich sowohl das Ausgangsmaterial zum Aufbau weiterer organischer Moleküle als auch – nach Abbau in den **Mitochondrien** – die dafür benötigte chemische Energie (siehe Seite 54).

Die Biologen bezeichnen Pflanzen und bestimmte Bakterien deshalb als **autotroph** – sie gewinnen alle Energie aus dem Sonnenlicht und bauen alle benötigten Stoffe selbst auf.

Andere Lebewesen profitieren von den Leistungen der Pflanzen: Tiere, Bakterien und Pilze. Indem sie Pflanzen fressen oder zersetzen, nutzen sie deren organische Moleküle für ihre eigene Energiegewinnung; sie heißen deshalb **heterotroph**.

Ein Kaninchen zum Beispiel, das die Gräser und Blumen einer Wiese frisst, zerlegt die pflanzlichen Zellen in Magen und Darm mithilfe von Verdauungsenzymen in „handliche“ Bestandteile: Zucker, Eiweißbausteine und Fettsäuren.

In seinem Körper baut es daraus eigene Zellstrukturen auf. Dazu braucht das Kaninchen natürlich Energie, und die gewinnt es, indem es einen Teil der aufgenommenen Moleküle, vor allem Zucker, „verbrennt“.

Die Nahrung liefert dem Tier also zweierlei: Kraftstoffe und Baustoffe (die teilweise identisch sind). Ein Vergleich: So wie aus Erdöl sowohl Kraftstoffe (etwa Benzin) als auch Materialien (etwa Kunststoffe) produziert werden können, so ist auch die Zelle fähig, aus Substanzen wie etwa dem Zucker beides zu gewinnen.

• Kraftstoffe. Um den aufgenommenen Zucker für die eigenen Energieprozesse

optimal nutzen, also verbrennen zu können, besitzen alle Zellen winzige Kraftwerke, die erwähnten Mitochondrien. In ihnen werden zerlegte Zuckermoleküle und andere Nahrungsbestandteile mit Sauerstoff verbunden, wobei wieder Kohlendioxid entsteht: jenes Gas, das Mensch und Tier als Stoffwechsel-Endprodukt ausatmen.

Deshalb heißt der Vorgang **Zellatmung** – er ist sozusagen die Umkehrung der Photosynthese. Der Trick dabei: Die frei werdende chemische Energie verpufft

DER GROSSE UNTERSCHIED

Pflanzen stellen organische Stoffe aus CO_2 , Wasser und Mineralsalzen dank Lichtenergie selbst her; Tiere nehmen energiereiche Grundstoffe mit ihrer Nahrung auf

Text: Philipp Crone/Jörn Auf dem Kampe

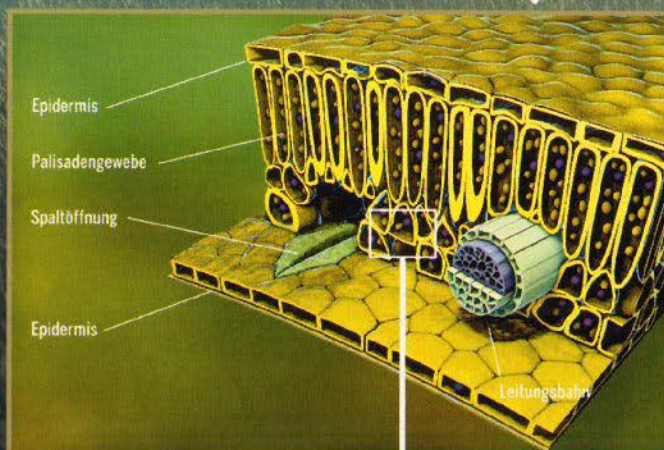
Pflanzen

Pflanzen brauchen zum Leben Licht, Kohlendioxid, Wasser und Mineralstoffe. Sie sind autotroph, das heißt: für ihren Stoffwechsel auf keine anderen Organismen angewiesen. Denn mittels **Photosynthese** sind sie in der Lage, aus energiearmem Kohlendioxid energiereichen Zucker herzustellen. Die Energie für diese Reaktion kommt von der Sonne.

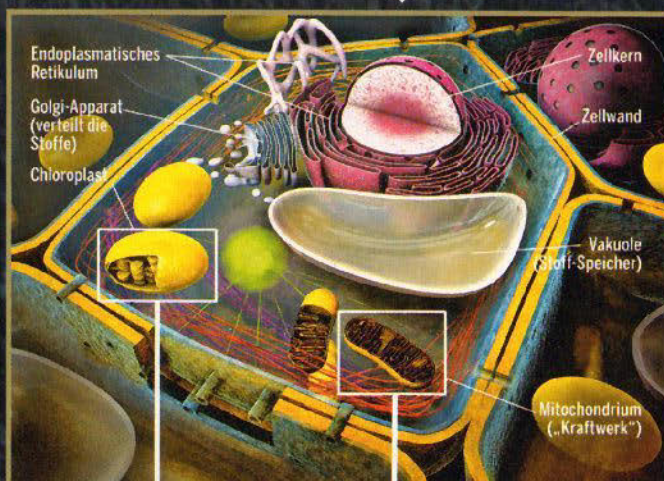
Die Photosynthese besteht aus zwei Prozessen: der Licht- und der Dunkelreaktion. Bei der **Lichtreaktion** absorbiert der grüne Farbstoff in den Blättern und anderen grünen Pflanzenteilen (**Chlorophyll**) Sonnenlicht bestimmter Wellenlängen und wandelt dessen physikalische Energie durch komplexe Reaktionen in eine chemische um.

Dazu werden die Moleküle des über die Wurzeln aufgenommenen Wassers (H_2O) gespalten. Der dabei freigesetzte Sauerstoff (O_2) wird über **Spaltöffnungen** an die Umwelt abgegeben.

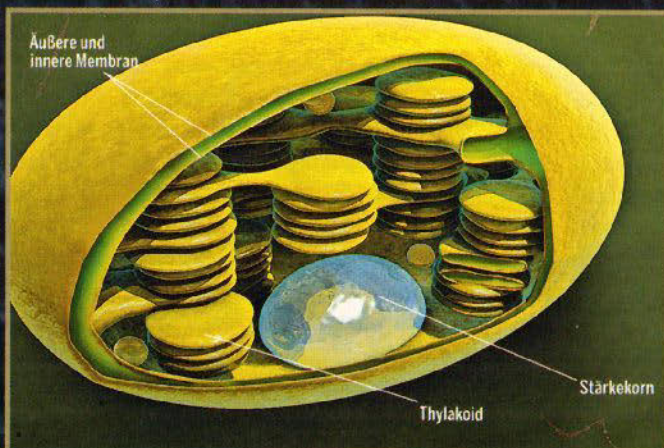
Bei der **Dunkelreaktion** spielt die durch die Lichtreaktion gewonnene, von der Pflanze gespeicherte biochemische Energie eine entscheidende Rolle: Mit ihrer Hilfe wird aus je sechs Molekülen Kohlendioxid (CO_2) und Wasser (H_2O) nach und nach ein Zuckermolekül ($\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$) aufgebaut. Der Zucker wird dann unter anderem zu den **Wachstumszonen** geleitet, wo er als Ausgangsmaterial für die Produktion von Pflanzenbaustoffen sowie zur Energiebereitstellung dient. Die gesamte Reaktion lässt sich auch als chemische Formel darstellen: $6 \text{H}_2\text{O} + 6 \text{CO}_2 \rightarrow \text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6 + 6 \text{O}_2$.



Über Blätter nehmen Pflanzen Licht auf und wandeln dessen Energie in den Chloroplasten, überwiegend im Palisadengewebe, in biochemische Energie (Zucker) um. Leitungsbahnen transportieren Wasser von den Wurzeln heran. Über Spaltöffnungen nimmt das Blatt Kohlendioxid auf und gibt Sauerstoff sowie Wasserdampf ab



Pflanzenzellen können alle organischen Stoffe selbst herstellen. In den Chloroplasten erzeugen sie Zucker: Basis vieler Baustoffe, die im Endoplasmatischen Retikulum hergestellt werden. Aus Zucker gewinnen Mitochondrien zudem eine besondere Form biochemischer Energie, die Stoffwechselprozesse antreibt. Eine starre Zellwand schützt die Zelle

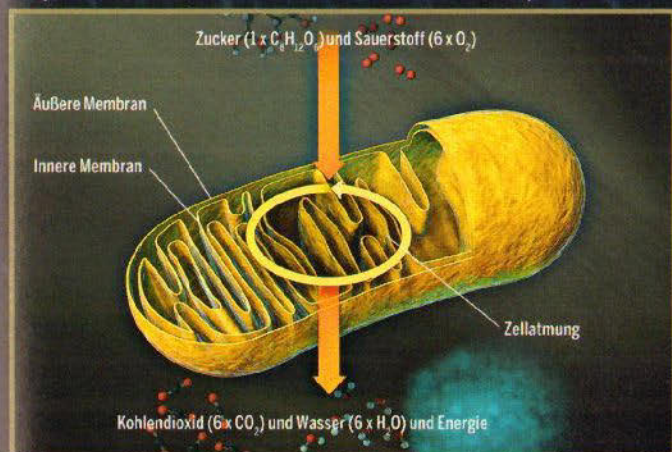
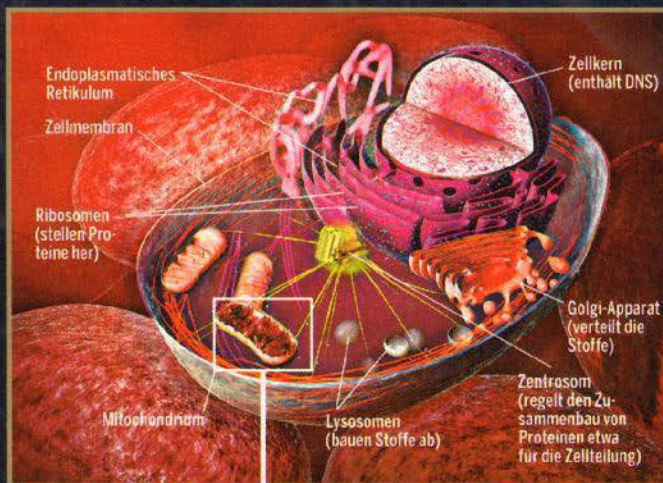


In den Chloroplasten läuft die Photosynthese ab. Sie enthalten flache Säckchen aus »Photosynthese-Membranen« (Thylakoide). Diese nehmen über grüne Farbstoffe Licht auf und bauen mithilfe von dessen Energie Zuckermoleküle aus CO_2 und Wasser zusammen. Den Zucker können sie abgeben oder als Stärke zwischenspeichern

Tiere zerlegen Nahrung in Magen und Darm, der Blutkreislauf verteilt die Nährstoffe im Körper. Gewebezellen nehmen sie aus dem Blut auf und verwerten sie. Den Zucker etwa »verbrennen« sie in den Mitochondrien. Den dazu nötigen Sauerstoff transportieren rote Blutkörperchen aus der Lunge heran



Die tierische Zelle muss chemische Energie und organische Grundbausteine über ihre Zellmembran von außen aufnehmen – etwa Einfachzucker, Amino- und Fettsäuren. Daraus kann sie (wie die Pflanzenzelle) im Endoplasmatischen Retikulum eigene Baustoffe zusammensetzen und in den Mitochondrien die dafür nötige Energie gewinnen



Mitochondrien sind die Kraftwerke jeder Zelle und zweigeteilt. Im inneren Raum bauen Enzyme Nährstoffe wie etwa Zucker in komplizierten chemischen Reaktionsfolgen ab: Es kommt zur so genannten **Zellatmung**, quasi der Umkehrung der Photosynthese. Dabei wird Energie frei, die elektrische Spannung zwischen den Membranen erzeugt. Diese wird genutzt, um das energiereiche Molekül ATP herzustellen, das viele Reaktionen antreibt

Tiere

Anders als Pflanzen können Tiere energiereiche Grundsubstanzen wie Zucker nicht selbst herstellen, sondern müssen sie als Verbindungen aufnehmen, die andere Organismen aufgebaut haben. Sie sind **heterotroph**. Wenn ein Tier eine Pflanze frisst, kann es die darin enthaltene **Energie** sowie die Baustoffe aber nicht direkt verwerten.

Denn zum einen sind die meisten Moleküle zu groß, um in die Zellen der Tiere zu gelangen, zum anderen sind die pflanzlichen nicht identisch mit denen, die ein Tier benötigt. Erst wenn etwa **Kohlenhydrate** in einzelne Zucker-Moleküle zerlegt sind, kann es daraus Energie gewinnen beziehungsweise eigene Strukturen aufbauen (siehe Seite 168).

Die meisten Tiere spalten die Nahrung in Magen und Darm mithilfe von Enzymen auf und transportieren die so gewonnenen Moleküle über den Blutkreislauf zu den einzelnen Zellen. Einen Teil der Moleküle verwenden die Zellen nun zum Aufbau von Baustoffen – also von Körpersubstanz –, einen anderen wandeln sie in biochemische Energie um.

Dazu werden in den **Mitochondrien**, den Kraftwerken der Zelle etwa Zucker-Moleküle mit Sauerstoff zu Kohlendioxid und Wasser „verbrannt“, und die freigesetzte Energie wird auf **ATP**-Moleküle übertragen. Diese liefern dann die Energie, um alle Baustoffe zu konstruieren, die das Tier braucht.

nicht, sondern wird auf ein anderes Molekül übertragen, das **ATP**.

Das ATP ist für die Zelle von größter Bedeutung, denn es kann zu vielen biochemischen Reaktionen Energie liefern.

Dazu koppelt die Zelle den *Abbau* des energiereichen ATP mit dem *Aufbau* eines anderen Moleküls, dessen Produktion Energie erfordert. Auf diese Weise bringen Pflanzen und Tiere Moleküle hervor – zum Beispiel Eiweiße –, welche die unbelebte Natur niemals zusammenstellen könnte.

• **Baustoffe.** Das ATP enthält also die Energie in einer für diese Prozesse verwertbaren Form. Bestimmte Moleküle, die **Enzyme**, bilden nun die Werkzeuge, um die Strukturen der Zelle aufzubauen.

Dazu werden in der Molekülfabrik einer jeden Zelle, dem **Endoplasmatischen Retikulum**, beispielsweise aus Aminosäuren (die etwa ein Tier über die Nahrung aufgenommen hat) Eiweiße (**Proteine**) zusammengesetzt, die dann als Grundsubstanz für unterschiedlichste Baustoffe dienen – etwa das Keratin, aus dem Haare und Nägel bestehen (siehe Seite 168).

In Wirklichkeit ist dies ein höchst komplizierter Prozess, den die Biologen bis heute nicht in allen Einzelheiten verstehen. Er läuft in der tierischen wie in der pflanzlichen Zelle ab.

Nur muss die Pflanzenzelle die Energie zur Herstellung des ATP aus dem selbst erzeugten Zucker gewinnen, um anschließend die eigenen Körpergewebe aufzubauen.

AUS SICHT eines Biophysikers ist eine saftige Wiese deshalb ein gut gefüllter Speicher an chemischer Energie und ein Hort der Ordnung – also geringer Entropie. Davon profitiert ein Kaninchen, wenn es Klee oder Gänseblümchen frisst.

Wenn ein Tier ein anderes frisst, baut es nur **wenige** Prozent der Biomasse in seinen Körper ein

Es nimmt mit der Nahrung chemisch gespeicherte Energie und wohlgeordnete Moleküle auf.

Ein Hektar einer typischen Wiese besteht im Durchschnitt aus 0,7 Tonnen organischer Substanz, also Stängeln, Blättern und Blüten. Pro Jahr erzeugen die Pflanzen darüber hinaus mithilfe des Sonnenlichtes zwei Tonnen an neuer Biomasse; deshalb nennen Biologen sie **Produzenten** (siehe auch Seite 138).

Nicht so die *Energie*. Eine Tonne pflanzlicher Biomasse enthält etwa 19 Millionen Kilojoule. Doch nur ein Teil davon wird, nachdem ein Pflanzenfresser das Grün verdaut hat, wieder in eigene Körpermasse umgewandelt. Bei Insekten liegt der Prozentsatz etwa zwischen 30 und 40 Prozent, bei Säugetieren sind es lediglich ein bis drei Prozent.

Das bedeutet: Die in den Pflanzen gebundene Energiemenge eines Quadrat-



EISBÄREN SCHÜTZT der dicke Pelz vor zu viel Wärmeverlust. Doch insgesamt ist Leben darauf angewiesen, Wärme abzugeben – letztlich entschwindet sie ins All

Pflanzenfresser wie die Kaninchen (die **Primärkonsumenten**) weiden davon im Lauf des Jahres rund eine Tonne ab. Eine weitere Tonne stirbt als Blatt, Samen oder Stängel ab und verrottet. Letzteres erledigen die **Destruenten** – Pilze und Bakterien –, die ihre Energie und Baustoffe aus totem organischem Material beziehen. Alles in allem bleibt die *Substanz* der Wiese daher konstant, das System ist im Stoffgleichgewicht.

meters und Tages von 864 Kilojoule reduziert sich auf bescheidene 17 Kilojoule im Körper des Kaninchens. Wie kommen diese großen Verluste zustande?

Jedes Tier muss die pflanzlichen Bausteine zunächst im Verdauungstrakt zerlegen, sie ins Blut aufnehmen und dann daraus in den Zellen körpereigene Moleküle bilden. Ordnung zerfällt und wird neu aufgebaut. Vor allem die Synthese der neuen Substanzen und Zellbestandteile kostet Energie – die ja durch „Verbrennung“ von Zucker in den Mitochondrien erzeugt wird – und macht die Abfuhr von Energie hoher Entropie in Form von Wärme nötig.

Zudem bewegen sich Tiere mithilfe ihrer Muskeln, was ebenfalls Energie erfordert. Bei den Säugetieren kommt noch etwas hinzu: Da sie Warmblüter sind, arbeitet ihr Stoffwechsel auf

höchstem Niveau und muss ständig organische Substanzen „verheizen“, um die Körpertemperatur konstant zu halten. (Wärme ist aber nicht die einzige Form, in der chemische Energie aus den Körpern entweicht: Mit ihren Ausscheidungen verlieren die Tiere einen ähnlich hohen Anteil der aufgenommenen Biomasse und Energie.)

Wenn nun ein Fuchs (als **Sekundärkonsument**) das Kaninchen frisst, dann geschieht auf dieser nächsthöheren **Trophie-Ebene** das Gleiche wie zuvor: Wieder werden nur wenige Prozent der Biomasse in die Körpersubstanz des Räubers eingebaut, wieder geht Substanz über Verbrennung und Ausscheidung verloren, und wieder muss Energie in Form von Wärme abgeführt werden. Jetzt sind von der Lichtenergie eines Tages und Quadratmeters nur noch 0,35 Kilojoule übrig geblieben – gerade mal zwei Hunderttausendstel (siehe Kasten Seite 51).

Wegen dieser immensen Verluste reicht die verfügbare Biomasse für weit mehr Pflanzen- als Fleischfresser. Auf die Menschheit bezogen, bedeutet das: Mit vegetarischer Kost könnte die Erde zehnmal mehr Menschen ernähren als mit rein fleischlicher Kost. Fleisch als Nahrungsmittel ist ökologisch gesehen also pure Verschwendung.

Doch gleichgültig, ob Produzent, Pflanzen- oder Fleischfresser: Alle sterblichen Reste landen schließlich, ebenso wie die Ausscheidungen, bei den Destruenten. Sie bauen die organischen Moleküle ab, um daraus eigene Substanz zu bilden. Nebenbei zerlegen sie viele organische Stoffe auch in anorganische Mineralsalze, die nun wieder von den Pflanzen aufgenommen werden können. Und erneut wird bei jedem dieser Prozesse Energie umgesetzt und in Form von Wärme frei.

DAS RESULTAT des gesamten Energiekreislaufes auf der Erde ist daher eine permanente Erhitzung der Umwelt. Sie ist nicht zu umgehen, weil dabei Energie niedriger Entropie in solche hoher Entropie verwandelt wird – und erst dadurch wird die hoch komplexe Ordnung ermöglicht, die wir Leben nennen (siehe Seite 20).

Müsste sich die Erde aufgrund der ständig produzierten Wärme aber nicht logischerweise immer weiter aufheizen und schließlich den Hitzetod sterben?

Dies geschieht deshalb nicht, weil die Erde ihre Wärme in Form von Infrarotstrahlung in den kalten Weltraum abgibt – und zwar genauso viel, wie sie an Energie von der Sonne zuvor erhalten hat.

Wenn aber das Leben ständig Entropie in Form von Wärme in die Umgebung entsendet, stellt sich die Frage: Weshalb nimmt die Entropie auf der Erde insgesamt nicht ständig zu?

Des Rätsels Lösung liegt im Unterschied zwischen der Strahlung, welche die Erde erreicht, und jener, die sie in Form von Wärme wieder verlässt.

Das von der Sonne eintreffende, kurzwellige Licht, das die Pflanzen zur Photosynthese nutzen, besitzt eine viel höhere Energie als das langwellige Infrarotlicht, das die Erde abstrahlt.

Weil aber die Energiebilanz insgesamt ausgeglichen ist, müssen der Logik gemäß weit mehr Wärmestrahlungsquanten ins All abgegeben werden, als Lichtquanten zuvor angekommen sind.

Da also die Zahl der von der Erde hinausgesandten Wärmestrahlungsquanten höher ist als die Zahl der zuvor eingefallenen Lichtquanten, hat auch deren Entropie zugenommen.

Denn generell gilt: Eine Zunahme der Teilchenzahl bedeutet auch eine Zunahme der möglichen Zustände, in denen sich die Teilchen befinden können – und damit erhöht sich die Wahrscheinlichkeit für Unordnung.

Die ins All abgehende Infrarotstrahlung hat also eine größere Entropie – und damit wird unser Planet die Unordnung los.

Möglich ist dieser Energiefluss aber nur, weil sich in der Sonne fast die gesamte Energie unseres Planetensystems konzentriert und der Weltraum infolgedessen eiskalt ist. Nur deshalb ist die Erde in der Lage, Wärme ins All abzugeben.

Zum Wohle für das Leben. □

Wissenschaftliche Beratung:

Prof. Reinhard Lieberei, Biozentrum Klein Flottbek, Universität Hamburg.

Jochen Stuhmann ist Illustrator in Hamburg.



WARUM MÄNNER NICHT STUNDEN
BRAUCHEN, UM GUT
ANGEZOGEN ZU SEIN.



MAURICE LACROIX

Switzerland

Tomorrow's Classics




Der Tod, der das Leben bringt

Im Gegensatz zu Pflanzenfressern, deren Nahrungsquelle unbeweglich ist, müssen Jäger ihre Beute aufspüren, überraschen, verfolgen und überwältigen. Das erfordert besondere Fähigkeiten: zum Beispiel Schnelligkeit, Einsatz von Gift, Intelligenz, Zusammenarbeit




MIT LANGEN GIFTZÄHNEN versucht die Greifschwanz-Lanzenotter den Kolibri zu erwischen. Tagelang kann die in Regenwäldern Mittelamerikas heimische Schlange reglos an einem Ort verharren – hier an einer Heliconienblüte – und auf ein geeignetes Beutetier warten. Dann schlägt sie ohne Vorwarnung zu. Und kann selbst Menschen töten

A dramatic night scene showing a lioness attacking an elephant. The lioness is perched on the elephant's back, its mouth open in a roar or bite, with its front paws gripping the elephant's skin. The scene is illuminated by a warm, orange light, possibly from a fire or a spotlight, creating a high-contrast, almost cinematic effect. The background is dark, emphasizing the action in the foreground.

IM SCHUTZ DER NACHT haben Löwen den erst vierjährigen Elefanten von seiner Herde getrennt. Ein so großes Tier können die Räuber nur bewältigen, indem sie die Beute etwa durch Blutverlust schwächen, und oft zieht sich der Todeskampf über Stunden hin. Auch für die Jäger birgt das ein Risiko: Gereizte Elefanten oder Büffel können sie verletzen





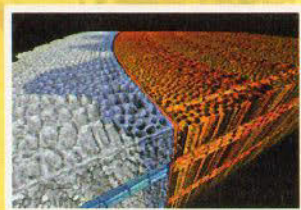


VON DER JAGDKUNST ANDERER profitieren diese Bronzehaie vor der Küste der Transkei in Südafrika, die sich die Mäuler mit Sardinen füllen. Denn Delfine hatten die Schule der Sardinen zuvor zu einer »Kugel« zusammengetrieben. Nicht nur Haie, auch Tunfische, Kaptöpel und Tümmler holen sich hier nun ihren Beuteteil

EIN SCHWARM TREIBERAMEISEN hat sich auf eine Langfühlerschrecke gestürzt und sie mit unzähligen Stichen und Bissen getötet. Binnen Minuten wird das riesige Insekt zerlegt und fortgeschafft. Die Jagdstrategie der Ameisen ist derart erfolgreich, dass sie häufig das Quartier wechseln müssen, um überhaupt noch Beute zu finden □







→ Seite 69

Die Wurzeln nehmen Wasser sowie Nährsalze aus den Tiefen des Bodens auf und geben dem Baum Halt. Der hohe, mächtige Stamm und die Äste und Zweige sorgen für eine optimale Position der Blätter zum Einfangen von Sonnenlicht



→ Seite 70

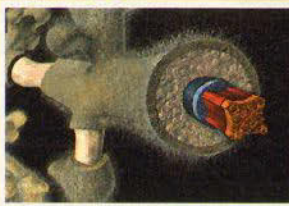
DIE PUMPE IM BAUM

Täglich vollzieht sich in Laubbäumen ein erstaunlicher Prozess: In einem stabilen Röhrensystem strömt Wasser gegen die Schwerkraft von den Wurzelspitzen bis in die Krone, transportiert lebenswichtige Minerale zu den Blättern – und von oben unter anderem energiereichen Zucker zurück zu den Wurzeln. Den gewaltigen Unterdruck für den Aufstieg der Säfte erzeugt allein das Blattwerk: durch Verdunstung

Text: Martin Paetsch
Illustrationen: Tim Wehrmann

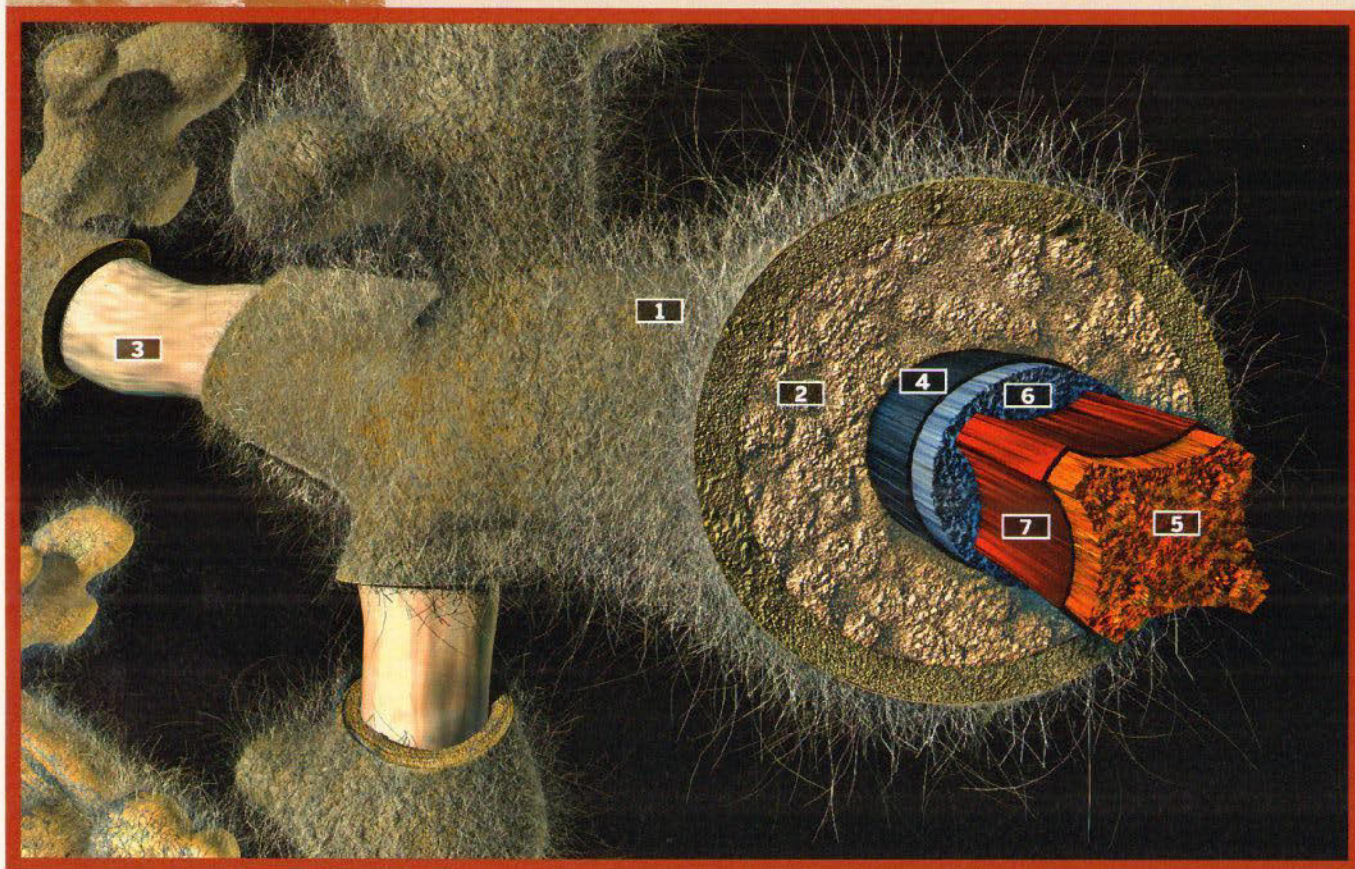


→ Seite 68



Die Wurzel und ihre Helfer

Ein Pilzgeflecht [1] ummantelt die junge Wurzel und hilft ihr, Wasser und Salze aus den Zwischenräumen der Erdpartikel in die Rindenzellen [2] (freigelegte Rindenzellen [3]) aufzunehmen. Die Lösung gelangt durch die Endodermis [4] auf komplexen Wegen in ein Leitungssystem, das Xylem [5], in welchem sie über den Stamm in die Blätter transportiert wird. Umgekehrt befördert ein zweites System, das Phloem [6], Zucker aus den Blättern unter anderem in die Wurzel. Gebildet werden die Zellen beider Leitungssysteme vom Kambium [7], einem Gewebe, das zwischen ihnen liegt.



DREI DINGE braucht ein Baum zum Leben: **Licht**, Luft, Wasser. Das Licht liefert ihm die Energie für chemische Reaktionen. Der Luft entnimmt er Kohlenstoff, aus dem ein Großteil seiner festen Substanz aufgebaut ist. Wasser schließlich ist mit über 60 Prozent sein Hauptbestandteil; zudem sind darin auch Mineralsalze gelöst, die für die Produktion vieler Moleküle unentbehrlich sind und wichtige Lebensfunktionen wie die Pflanzenatmung steuern.

Den Kohlenstoff kann der Baum in Form des Gases Kohlendioxid (CO_2) über seine Blätter direkt aufnehmen, doch mit dem Wasser und den Mineralstoffen hat er ein Problem: Sie befinden sich im Boden. Der Baum hat nun ein erstaunliches Pum-

pensystem entwickelt, mit dessen Hilfe er Mineralstoffe und Wasser von den Wurzeln im Boden bis in die höchsten Bereiche der Wipfel transportieren kann.

Die Kraft, die diese Pumpe antreibt, liefert vor allem die Verdunstung. Eine große Buche etwa „verschwitzt“ an einem Sommertag über ihre 200 000 Blätter bis zu 400 Liter Wasser. Im Winter stoppt dieser Vorgang, da die Wasserversorgung durch Frost gefährdet wäre. Deshalb werfen die meisten Laubbäume ihre Blätter ab und versetzen sich in einen Ruhezustand*.

Wenn jedoch im März die Temperaturen in Mitteleuropa ansteigen und die Tage länger werden, erwachen die Laubbäume allmählich. Noch sind sie kahl und enthalten wenig Wasser. Ihre Energie-

vorräte aus dem vergangenen Sommer haben die Bäume als **Stärke** eingelagert, unter anderem in den Zellen der äußersten Holzschichten.

Jetzt, unter der Frühlingssonne, werden dort **Enzyme** aktiviert, die diese Speichersubstanz spalten. Die chemische Umwandlung bringt Bewegung in den Baum – es entsteht Zucker (**Glukose**), ein wahrer Zauberstoff im Leben der Pflanzen.

Die süße Substanz entwickelt im Gewebe eine erstaunliche Anziehungskraft: Zwischen Zellen mit unterschiedlichem Zuckergehalt beginnt ein Wasserstrom zu fließen – und zwar immer in Richtung der stärker konzentrierten Lösung. Nach dem Prinzip der **Osmose** (siehe Seite 104) **entziehen** die zucker-

* Die Photosynthese der Nadelbäume ist weniger effektiv, dafür aber fast das ganze Jahr über möglich. Das liegt daran, dass Nadeln anders gebaut sind als Laubblätter und daher nicht so viel Licht aufnehmen können. Allerdings besteht im Winter die Gefahr der „Frosttrocknis“, wenn kein Wasser mehr nachfließen kann.

reichen Zellen dem Holzkörper seine knappen Wasservorräte. Von dort aus setzt sich der Sog fort bis zu den Wurzeln. Bald schon steigt im Baum eine Nährlösung hinauf zu den Knospen. Die gigantische Pumpe kommt nach und nach in Gang, und die Blattknospen erhalten mit dem Zucker all jene chemische Energie, die sie brauchen, um austreiben zu können.

DAS TRÄGE STRÖMEN der Säfte ist jedoch nur das Vorspiel zum eigentlichen Stoffkreislauf des Baumes: Kaum haben sich die Blätter entfaltet, beginnt in ihren Zellen die **Photosynthese** (siehe Seite 54). Mithilfe von Sonnenlicht erzeugen alle grünen Pflanzen aus Wasser und Kohlendioxid Zucker – Ausgangsstoff für viele organische Verbindungen, darunter die Zellulose, den Hauptbestandteil der Zellwände.

Der energiereiche Zucker muss aber auch in jene Teile der Pflanze gelangen, die kein Licht für die Photosynthese aufnehmen können – etwa in die Wurzeln. Umgekehrt ist es erforderlich, Mineral- salze und Wasser aus dem Boden bis in die Krone zu befördern. Der Baum benötigt daher ein System von Transport- röhren, das dem Kreislaufsystem von

Mensch und Tier ähnelt – auch das Blut dient ja vor allem der Beförderung von Stoffen innerhalb des Körpers.

Im Baum fließen die Säfte durch zwei Typen von Gefäßsystemen:

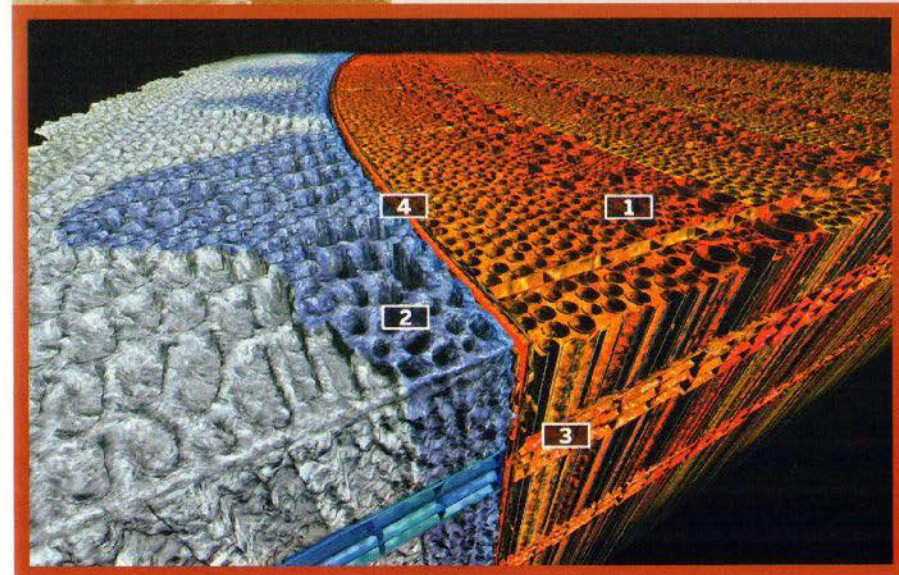
- das **Xylem**, in dem hauptsächlich Wasser und Minerale für die Zellen und für die Photosynthese von den Wurzeln hinauf in die Blätter transportiert werden;
- das **Phloem**, in dem vor allem der in den Blättern gebildete Zucker befördert wird – in die Keimzonen neuer Blätter oder zur Speicherung in die Wurzeln.

Es gibt allerdings wesentliche Unterschiede zwischen dem Gefäßsystem eines Baumes und dem Blutkreislauf. So dienen die Röhren im Baum – anders als die Adern und Venen im menschlichen Körper – nicht dem Transport von gebundenen Gasen wie Sauerstoff oder Kohlendioxid. Und der Antrieb erfolgt nicht über eine Muskelpumpe wie das Herz, sondern zum großen Teil über die Verdunstung.



Das Leitungssystem im Stamm

Durch die Röhren des Xylems [1], das vor allem aus verholzten Zellen besteht, wird Wasser geleitet. Das Phloem [2] befördert Nährstoffe, welche die Zellen der Holzstrahlen [3] speichern können. All diese Gewebe entstehen aus den sich fortlaufend teilenden Kambiumzellen [4].



Ein Baum kann Wasser über eine **Höhendistanz von mehr als 100 Metern** transportieren

Das Ausmaß der Verdunstung können Gewächse weitgehend regulieren: über die **Spaltöffnungen** ihrer Blätter. Durch diese winzigen Ventile gibt die Pflanze kontrolliert Wasserdampf aus dem Blattinneren ab (Transpiration) und nimmt zugleich Kohlendioxid auf. Je trockener die Außenluft ist, desto mehr Wasser verdunstet aus den Spaltöffnungen.

Aufgrund der Wasserabgabe entsteht in den Blättern ein Sog, der sich über die Gefäße des Xylems bis in den Stamm und die Wurzeln fortsetzt – es baut sich ein Unterdruck auf. Dieser sorgt dafür, dass ständig Flüssigkeit hinauf zur Krone gesogen wird. Bei Mammutbäumen in Nordamerika überbrückt das Wasser dabei eine Höhendistanz von über 100 Metern.

Gewaltig sind die Kräfte des Soges, die innerhalb der baumhohen Gefäße des Xylems wirken. Da zwischen den Wassermolekülen außerordentliche Anziehungskräfte wirken, die **Kohäsionskräfte**, reißt die Wassersäule im Stamm nicht ab – es sei denn, es kommt zu besonders starkem Sog oder einer Verletzung.

Dann tritt Luft in das Röhrensystem ein, und im schlimmsten Fall wird die ganze Leitungsbahn dadurch funktionsunfähig. Das ist auch ein Grund, weshalb sich Schnittblumen nur begrenzt halten: Ist Luft in ihre abgetrennten Stängel geraten, wird der Wassertransport erschwert.

Im Winter, wenn der Stoffkreislauf des Baumes ruht, sind Lufteinschlüsse kein Problem. Und in jeder Saison wächst eine frische Schicht des Xylem-Leitungsgewebes heran: Im Querschnitt des Stammes bildet es die jeweils äußerste von mehreren, als Jahresringe erkennbaren Holzlagen.

Die neuen Zellen sterben größtenteils ab, sobald sie voll ausgebildet sind. Durch die teilweise oder komplette Auflösung der Wände formen sich dünne, verholzte, von unten nach oben durchgehende Leitungsröhren mit Durchmessern von einigen Hundertstel bis fast einem Millimeter.

Durch diese Röhren strömt die Flüssigkeit bei Eichen mit einer Geschwindigkeit von bis zu 44 Meter pro Stunde zu den



Das Blatt – ein grünes Sonnenkraftwerk

Die Epidermis [1] schützt das Blatt vor Verdunstung. Vor allem im Palisadengewebe [2] findet die Photosynthese (siehe Seite 54) statt: Mithilfe des Sonnenlichts entstehen aus Wasser und Kohlendioxid (CO₂) Zucker und Sauerstoff. Im Schwammgewebe [3] liegen das Phloem [4], das Zucker in andere Pflanzenteile leitet, sowie das Xylem [5], das Wasser transportiert. Die Spaltöffnungen [6] regulieren die Aufnahme des CO₂ sowie die Abgabe des verdunsteten Wassers, eine weitere Epidermis [7] begrenzt das Blatt unten.



Blättern. Rekordhalter sind Lianen mit 150 Meter je Stunde.

UM DEN GEWALTIGEN DURST der Krone zu stillen, müssen die Wurzeln dem Erdreich ständig Wasser entziehen. Der Boden liefert zudem über ein Dutzend lebensnotwendiger Elemente. So braucht der Baum beispielsweise Magnesium, um das für die Photosynthese benötigte Blattgrün **Chlorophyll** herzustellen. Vor allem die Feinwurzeln, die jüngsten Teile des ständig wachsenden Wurzelsystems, nehmen das Wasser und die darin gelösten Mineralstoffe auf.

Sie vergrößern ihre Oberfläche enorm, indem sie unzählige, jeweils nur etwa ein Hundertstel Millimeter dicke Ausstülpungen der äußersten Zellschicht bilden. Diese Wurzelhaare wachsen in die Zwischenräume der Erdteilchen und saugen darin gespeicherte Feuchtigkeit auf.

Die ebenfalls absorbierten Nährsalze gelangen ins Xylem der Wurzel, wo laufend eine relativ hoch konzentrierte Salzlösung angesammelt wird. Wie bei der Zuckerlösung in den Blattzellen strömt auch hier durch Osmose Wasser aus den umgebenden Zellen nach, um den Konzentrationsunterschied auszugleichen. Auf diese Weise kommt es zum „Wurzeldruck“ – die Flüssigkeitszufuhr presst also die Lösung in der Wurzel nach oben.

Bei der Wassergewinnung verlassen sich zudem fast alle Bäume auf fremde Hilfe: Sie schließen eine Partnerschaft (**Symbiose**) mit Pilzen, deren unterirdi-

ches Fadengeflecht die jungen Wurzeln überwuchert. Einige Pilzfäden dringen dabei ins Wurzelgewebe ein, während sich andere meterweit ins Erdreich erstrecken. Sie verbessern die Wasserversorgung des Baumes und helfen ihm, Mineralstoffe wie Phosphor und Stickstoff aufzunehmen. Der Pilz, der keine Photosynthese treibt, erhält im Gegenzug aus den Baumwurzeln lebenswichtige **Kohlenhydrate**.

Doch auch das Wurzelsystem selbst benötigt Kohlenhydrate zum Wachstum. Deshalb muss Zucker laufend von seiner Produktionsstätte, dem Blätterdach, in den Untergrund geschafft werden.

Im Herbst **wirft der Baum seine Blätter ab**, um bei Frost nicht zu verdursten

ÜBERLEBEN IN DER TROCKENHEIT

Regenwald, See oder Wüste – jede Pflanze geht anders mit Wasser um

Keine Pflanze kommt ohne Wasser aus: Denn H_2O ist nicht nur der Hauptbestandteil einer jeden Zelle, sondern liefert auch das Element Wasserstoff für die Photosynthese und dient zudem als Transportmittel für Nährstoffe. Deshalb haben Gewächse die unterschiedlichsten Strategien entwickelt, um in nahezu jedem Klima der Erde an den kostbaren Rohstoff zu kommen und ihn zu speichern.

Am einfachsten ist dies für im Wasser lebende Pflanzen: Sie nehmen die Flüssigkeit direkt über ihre äußere Zellschicht auf. Die meisten Landgewächse benötigen dagegen spezialisierte Organe wie Wurzeln, um Wasser zu gewinnen. Ein Großteil davon verdunstet von der Pflanzenoberfläche, vor allem über die Spaltöffnungen der Blätter. So entsteht ein Unterdruck, durch den ständig neues Wasser und lebenswichtige Mineralsalze über die Wurzeln angesaugt werden.

Je feuchter die Luft, desto geringer ist die Transpiration. In Gebieten mit hoher Feuchtigkeit haben manche Gewächse höher aufragende Spaltöffnungen, um sie dem Wind auszusetzen und so die Verdunstung zu fördern. Die Blätter einiger Arten besitzen zudem spezialisierte Zellen, die Flüssigkeit herauspressen können. Tropenpflanzen etwa scheiden auf diese Weise oft Wasser als Tropfen aus, wenn bei hoher Luftfeuchtigkeit die Transpiration zum Erliegen kommt.

Die mit Wasserdampf gesättigte Luft des Regenwaldes ist dagegen für viele **Epiphyten** lebensnotwendig, die auf den Ästen der Baumriesen siedeln. Zu ihnen gehören Orchideen, die Feuchtigkeit sowie Mineralstoffe aus dem Staub in der Luft über schwammartige Luftwurzeln aufnehmen. Ananasgewächse stillen ihren Durst auf andere Weise: Ihre Blätter laufen trichterförmig zusammen und sammeln so Regenwasser – bis zu 45 Liter pro Pflanze.

In Trockengebieten können einige Spezies ebenfalls Feuchtigkeit aus der Luft aufnehmen: So dienen Härchen oder Dornen als

Kondensationsfallen für den Morgennebel. Zudem erstreckt sich das Wurzelsystem mancher Arten sehr weit, um den seltenen, schnell verdunstenden Regen möglichst großflächig aufzusaugen.

Bei anderen Spezies reichen die Wurzeln bis zu 20 Meter tief zu den Grundwasserspeichern. Kleine und ledrige Blätter, deren Spaltöffnungen in Vertiefungen sitzen, verringern darüber hinaus die Transpiration (siehe Seite 148). Wieder andere Gewächse betreiben sogar eine Sonderform der Photosynthese: In der Tageshitze bleiben die Spaltöffnungen geschlossen, um den Wasserverlust zu verringern. Erst nachts öffnen sie sich und nehmen Kohlendioxid aus der Luft auf.

Häufig horten die Überlebenskünstler, etwa Kakteen, das Wasser in fleischigen Blättern, Stämmen oder Wurzeln. Als Anpassung an das Wüstenklima ist ihre Gestalt oft kugel- oder säulenförmig: Dies gewährleistet hohe Speicherkapazität bei minimaler Transpirationsfläche. Manche Gewächse nehmen gewaltige Wassermengen auf: So fasst der Stamm des afrikanischen Affenbrotbaumes bis zu 120 000 Liter.

Auf eigenartige Weise schützen sich südafrikanische „Fensterpflanzen“ vor Austrocknung. Sie leben nahezu völlig unterirdisch – allein ihre fensterähnlichen Blattenden, durch die Licht ins schachtartige Innere der Pflanze fällt, ragen aus dem Boden. Andere Gewächse versinken bei großer Trockenheit in einen Dürreschlaf: Sie werfen ihre Blätter ab, oder die Zweige rollen sich gar zu einem Ball ein, der sich bei Feuchtigkeit wieder entfaltet – wie bei der „Rose von Jericho“.

Wo aber Regen nur unregelmäßig fällt, etwa in der amerikanischen Sonora-Wüste, helfen selbst solche Strategien nicht weiter. Dort haben sich viele Arten auf ein Leben im Eiltempo eingestellt: Sie keimen nur bei Niederschlag und sterben nach einer Saison. Ihre Samen können jedoch jahrelang im Boden überdauern – bis ein neuer Regenfall die Wüste erblühen lässt.

Martin Paetsch

Für dessen Verteilung sorgt das zweite Leitungssystem – das Phloem –, das parallel zum Xylem die Pflanze durchzieht. Anders als sein Gegenpart besteht es aus lebenden, aber hoch spezialisierten Zellen: Um der Zuckerlösung möglichst wenig Widerstand zu bieten, sind ihre Zellwände siebartig durchlöchert.

Der Phloemsaft strömt durch die sogenannten „Siebröhren“ mit einer Geschwindigkeit von bis zu zwei Metern pro Stunde. Neben Zucker transportiert er auch andere Verbindungen wie **Aminosäuren** und Vitamine, die mithilfe anorganischer Stoffe in den Blättern erzeugt werden. Die Nährlösung fließt vor allem in Richtung Wurzelwerk, versorgt aber auch andere wachsende Teile wie Früchte und Samen. Ein ständiger, wiederum durch Osmose gesteuerter Flüssigkeitsaustausch mit dem benachbarten Xylem hält die Strömung aufrecht.

Bis zum August etwa dauert die Bauzeit des Baumes, dann kommt sein Wachstum zum Erliegen. Der in den Blättern produzierte Zucker wird ab jetzt nicht mehr vollständig verbraucht, sondern zunehmend als Stärke in Zellen im Holz und in den älteren Wurzeln gespeichert.

Im Herbst leitet die Pflanze ihre Ruhephase ein. Sie entzieht den Blättern alle wertvollen Stoffe, um sie im Stamm zu deponieren, und baut auch das Chlorophyll ab. Das lässt die Blätter vergilben.

Schließlich bildet sich ein Trenngewebe an der Basis der Blattstiele, und der Baum wirft sein Laub ab – denn sonst würde er über die Blätter weiterhin Wasser verdunsten; da aber bei Frost aus dem Boden kein Nachschub käme, würde der Baum nach und nach vertrocknen.

Die Transpirationspumpe hat nun ihren Dienst eingestellt, und zurück

bleibt das riesige, kahle Gerüst aus Stamm und Ästen. Weshalb aber ist dieser gewaltige Aufwand an Holz überhaupt nötig? Schließlich könnte eine strauchhohe Konstruktion ebenso effektiv Photosynthese betreiben.

Es war, so Evolutionsbiologen, ein entwicklungsgeschichtlicher Wettlauf zwischen den Bäumen. Jene Individuen, die ihre Nachbarn überragten, bekamen am meisten Licht ab und konnten sich besser behaupten und fortpflanzen.

So erreichten sie im Lauf der Jahrmillionen die enorme heutige Höhe – zum Vorteil für den Menschen, denn Holz ist mit seinem geringen Gewicht und der großen Festigkeit einer der besten Baustoffe, welche die Natur je erfunden hat. □

Beratung: **Dr. Klaus Haas**, Institut für Botanik, Universität Hohenheim, Stuttgart.
Tim Wehrmann ist Illustrator in Hamburg.

Was die Materie zusammenhält

Seit der Antike fragten sich Gelehrte, wie die kleinsten Teilchen in einer Substanz angeordnet sind. Bei Versuchen mit Kohlenstoffverbindungen kam der deutsche Chemiker Friedrich August Kekulé 1854 auf eine revolutionäre Idee: Atome verbinden sich untereinander fest. Damit wurde erstmals verständlich, wie Moleküle aufgebaut sind

Text: Catarina Pietschmann

London, Sommer 1854. Müde sitzt Friedrich August Kekulé nach einem arbeitsreichen Tag am St. Bartholomew's Hospital im Pferdeomnibus. Er nickt ein. Plötzlich beginnen winzige Kugeln vor seinen Augen zu tanzen, so erinnert er sich später: „Ich sah, wie vielfach zwei kleine Atome sich zu einem Pärchen zusammenfügten. Wie größere zwei kleine umfassen.“ Und er sieht Atome Ketten bilden, indem sie immer mehr Teilchen zu sich heranziehen. Noch in der Nacht bringt er Skizzen dieser seltsamen Gebilde zu Papier.

Das Arbeitsgebiet des Deutschen ist die Chemie der **Kohlenstoff-Verbindungen**. In dem Element sehen Forscher einen zentralen Baustein des Lebens. Denn immer, wenn organisches Material verbrennt, bleibt Kohlenstoff zurück. Um 1850 sind etwa 3000 dieser Verbindungen bekannt – darunter das Bittermandelöl, Ameisen- und Weinsäure, die Inhaltsstoffe des Opiums sowie Benzol.

Die Chemiker unterscheiden Substanzen anhand von Aussehen, Geruch, Geschmack und ihren physikalischen Eigenschaften, etwa dem Siedepunkt. Durch Analyse der festen und gasförmigen Verbrennungsrückstände können sie in einem Stoff den Gehalt an Elementen wie Kohlenstoff, Wasserstoff, Sauerstoff und Stickstoff bestimmen.

Versuche haben ihnen gezeigt, dass die Elemente in einer Substanz stets in denselben Verhältnissen vorhanden sind. Ein Molekül des Gases Methan zum Beispiel besteht aus einem Kohlenstoffatom und vier Wasserstoffatomen. Solche Verhältniszahlen der Atome im Molekül lassen sich als **Summenformel** darstellen. Beim Methan lautet sie: CH_4 .

Doch die Chemiker haben noch keinerlei Vorstellung, wie die Atome der einzelnen Elemente in einem Molekül angeordnet sind und was sie zusammenhält. Sollte das, was Kekulé im Halbschlaf erschienen ist, die Lösung sein? Atome, so vermutet er, sind in Kohlenstoff-Verbindungen nicht nur

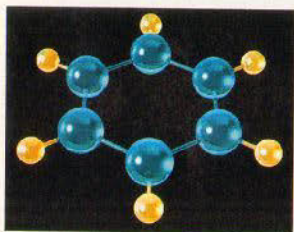
locker und gegeneinander verschiebbar, sondern über feste Bindungen miteinander verkettet. Der Gedanke lässt den Chemiker nicht mehr los.

Im 19. Jahrhundert gehen die Vorstellungen über Materie kaum über das hinaus, was bereits der Grieche Demokrit im 4. Jahrhundert v. Chr. angenommen hat: Die Basis jeglicher Materie seien kleinste Teilchen, die er „atomos“ („unteilbar“) nannte. Die Atome der verschiedenen chemischen Elemente, so vermuten die Forscher, fügen sich zu Molekülen. Doch wie genau, ist nicht bekannt.

Um 1830 ist die chemische Welt bereits in zwei Kategorien eingeteilt: Zum einen gibt es die **anorganischen** Verbindungen. Sie entstammen der unbelebten Natur, sind meist mineralischen Ursprungs (Farbpigmente, Salze, Metalle) und setzen sich bis auf wenige Ausnahmen aus allen Elementen außer Kohlenstoff zusammen. Für sie haben die Chemiker schon ein Formelsystem: Sie sehen die anorganischen Atome als geladene Teilchen (Ionen) an und erklären sich ihren Zusammenhalt über die Anziehungskraft von entgegengesetzten elektrischen Ladungen.

Für die sehr vielfältigen **organischen Kohlenstoff-Verbindungen** dagegen passt dieses System nicht. Der Begriff „Organische Chemie“ entspringt der Überzeugung, nur lebende Pflanzen und Tiere seien in der Lage, solche Stoffe aufzubauen. Doch bereits 1828 hat der deutsche Chemiker Friedrich Wöhler dies widerlegt: Beim Versuch, ein anorganisches Salz (Ammoniumcyanat) durch Erhitzen in ein anderes umzuwandeln, entstand organisches Material – nämlich Harnstoff, eine Substanz, die man bereits im menschlichen Urin gefunden hatte.

Lehrbücher reichen zu Kekulés Zeit längst nicht mehr aus, um das enorme empirische Wissen aufzunehmen, das sich bereits angesammelt hat und sich ständig vermehrt. Die ersten „Periodika“, chemische Zeitschriften, erscheinen. In Laboratorien kochen, extrahieren, destillieren und kristallisieren Chemiker und Apotheker. Doch all das ist noch eine reine „Probierkunst“. Was die in den



Die Anordnung der Kohlenstoffatome im Benzol war lange Zeit ein Rätsel. Bis Kekulé erkannte, dass sie nicht nur Ketten bilden können, sondern beim Benzol – wie in diesem vereinfachten Modell gezeigt – sogar Ringe formen: aus sechs Kohlenstoffatomen (blau), mit denen jeweils ein Wasserstoffatom verknüpft ist (gelb). Der Benzolring ist Bestandteil vieler Stoffe in der belebten Welt, zum Beispiel der Sexualhormone Testosteron und Östrogen, des Zellstoffs Lignin und von Blütenfarbstoffen



Friedrich August Kekulé
(1829–1896) untersuchte die Chemie des Kohlenstoffs und anderer Elemente. Diese teilte er nach ihrer »Wertigkeit« ein: Den Wasserstoff etwa, der nur ein Atom binden kann, bezeichnete er als einwertig, Sauerstoff als zweiwertig, Kohlenstoff als vierwertig

Glaskolben brodelnden Stoffe im Innersten *zusammenhält*, bleibt nach wie vor rätselhaft.

Kekulé entwickelt seine Gedanken weiter. Er weiß, dass bei chemischen Umwandlungen Teile einer Verbindung ausgetauscht werden, bestimmte Atomgruppen jedoch meist unverändert bleiben. Den Zusammenhalt dieser Gruppen erklären sich die Chemiker durch den Drang jedes einzelnen Atoms, stets eine bestimmte Anzahl anderer Atome „an sich zu fesseln“. Diese Affinität, eine elementspezifische Eigenschaft, nennen sie „Wertigkeit“.

1857 beschreibt Kekulé in den „Annalen der Chemie und Pharmacie“ drei Typen von Elementen: einwertige Elemente wie Wasserstoff und Kalium, die nur *ein* weiteres Atom an sich binden können, zweiwertige (Sauerstoff, Schwefel) sowie dreiwertige (Stickstoff, Phosphor). Im März 1858 legt er nach und erklärt, dass Kohlenstoff vierwertig sei.

Ein Kohlenstoffatom kann also bis zu vier Bindungen mit anderen Atomen eingehen. Plötzlich wird die Struktur eines Moleküls wie Methan (CH_4) verständlich: Es handelt sich um ein vierwertiges Kohlenstoffatom, an dessen vier Bindungsstellen jeweils ein einwertiges Wasserstoffatom sitzt.

Beim Kohlendioxid (CO_2) dagegen reichen zwei Sauerstoffatome – da jedes zweiwertig ist –, um die vier Wertigkeiten des Kohlenstoffs zu „fesseln“. Weiter nimmt Kekulé an, dass Kohlenstoff Ketten mit sich selbst bilden kann. Ein Ethylen-Molekül (C_2H_4) sei demnach eine kurze Kette aus zwei Kohlenstoffatomen und sechs Wasserstoffatomen.

Kekulé's Erkenntnisse sind revolutionär – und liegen dennoch in der Luft. Denn der Schotte Archibald Scott Couper hat die gleiche Idee. Im Mai 1858 – Couper wartet auf die Veröffentlichung seines Artikels durch die Französische Akademie der Wissenschaften – bekommt er in seinem Labor einen Beitrag Kekulé's über dessen Theorien zu lesen. Er stürmt aus dem Gebäude, erleidet

einen schweren Nervenzusammenbruch und kehrt der Wissenschaft für immer den Rücken.

Dass Couper dennoch nicht vergessen wird, liegt an seiner Idee, die Bindung zwischen den Atomen – von Kekulé zunächst als „Würstchen“ angedeutet – als Strich zu zeichnen. Jedes Element bekommt so viele Striche, wie es Bindungen eingehen kann.

Kekulé's und Couper's Vorstellungen sind der Beginn der **Strukturchemie**. Sie erklären die Existenz von kettenförmigen und verzweigten **Kohlenwasserstoffen**. Manche Verbindungen haben doppelte oder dreifache Bindungen, gekennzeichnet durch Mehrfachstriche. Rätselhaft bleiben zunächst Substanzen wie Benzol (C_6H_6) oder Naphthalin, bei denen der Anteil an Wasserstoffatomen unerklärbar niedrig ist. Wieder erkennt Kekulé die Lösung: Die sechs Kohlenstoffatome im Benzol bilden einen Ring – verbunden abwechselnd durch Einfach- und Doppelbindungen.

Endlich gibt es eine Systematik für die Ordnung organischer Moleküle. Bis heute gültige **Stoffklassen** kristallisieren sich heraus. Und schon aus den Strichformeln lassen sich wesentliche Moleküleigenschaften ablesen, was die Synthese neuer Verbindungen bereits auf dem Papier erleichtert.

Mit Kekulé's und Couper's Ideen beginnt der Aufschwung der organischen Chemie und die Entwicklung der Biochemie. Doch erst 1911 sehen Forscher in Atome hinein, erkennen ihren inneren Aufbau und identifizieren wenig später Elektronen als bindenden „Kitt“ zwischen den Atomen.

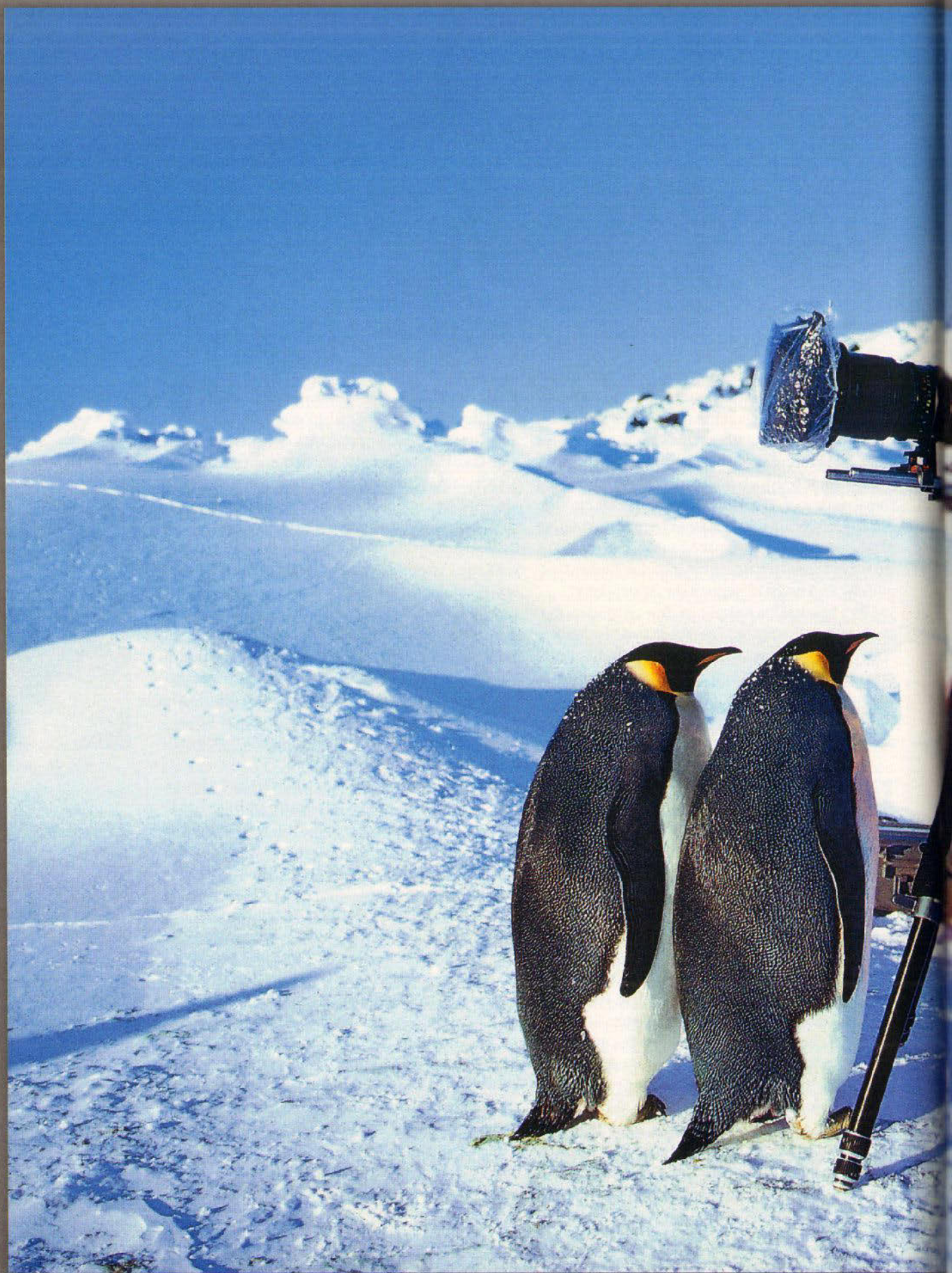
Biomoleküle wie Enzyme und Hormone werden heute im Röntgenstrahl vermessen – exakt und in 3-D. Weit über 15 Millionen organische Moleküle sind inzwischen bekannt. Doch noch immer greifen Chemiker zu Bleistift und Papier, um selbst die komplexesten Strukturen neu entdeckter Naturstoffe aufzuzeichnen oder deren Synthese zu planen.

Es geht ganz einfach: mit Strichformeln. □

Dr. Catarina Pietschmann, 42, ist freie Autorin in Berlin.



Die Erkenntnis von Kekulé (untere Reihe, zweiter von rechts) über die Verbindungen zwischen Atomen ermöglichte es Forschern – wie hier seinen Kollegen von der Universität Heidelberg –, chemische Reaktionen auf dem Papier mit einfachen Strichformeln zu planen



VIEW

DAS NEUE MAGAZIN VOM STERN.



NEU: DIE BESTEN BILDER DES MONATS JETZT NUR IN VIEW!

Das neue Magazin vom stern ist da. VIEW - jeder Monat hat Bilder, die man nicht vergisst!

- VIEW lebt von der Faszination außergewöhnlicher Fotos
- VIEW bringt die wichtigen und interessanten Themen des Monats in Bildern
- VIEW ist informativ, faszinierend und emotional

Lassen Sie sich die Weltpremiere von VIEW nicht entgehen. Erleben Sie die Macht der Bilder wie noch nie zuvor und sichern Sie sich jetzt Ihr persönliches Test-Paket!

Diese 6 Rubriken finden Sie in jeder Ausgabe von VIEW:



DIE WELT

Weltbewegende Momente - eingefangen in faszinierenden Bildern.



DEUTSCHLAND

Die beeindruckendsten Bilder des Monats - made in Germany.



SPORT

Erleben Sie die aufregende Welt des Sports - als seien Sie live dabei gewesen.



ENTERTAINMENT

Skurrile Geschichten und Blitzlichtgewitter - that's entertainment.



WISSEN & WUNDER

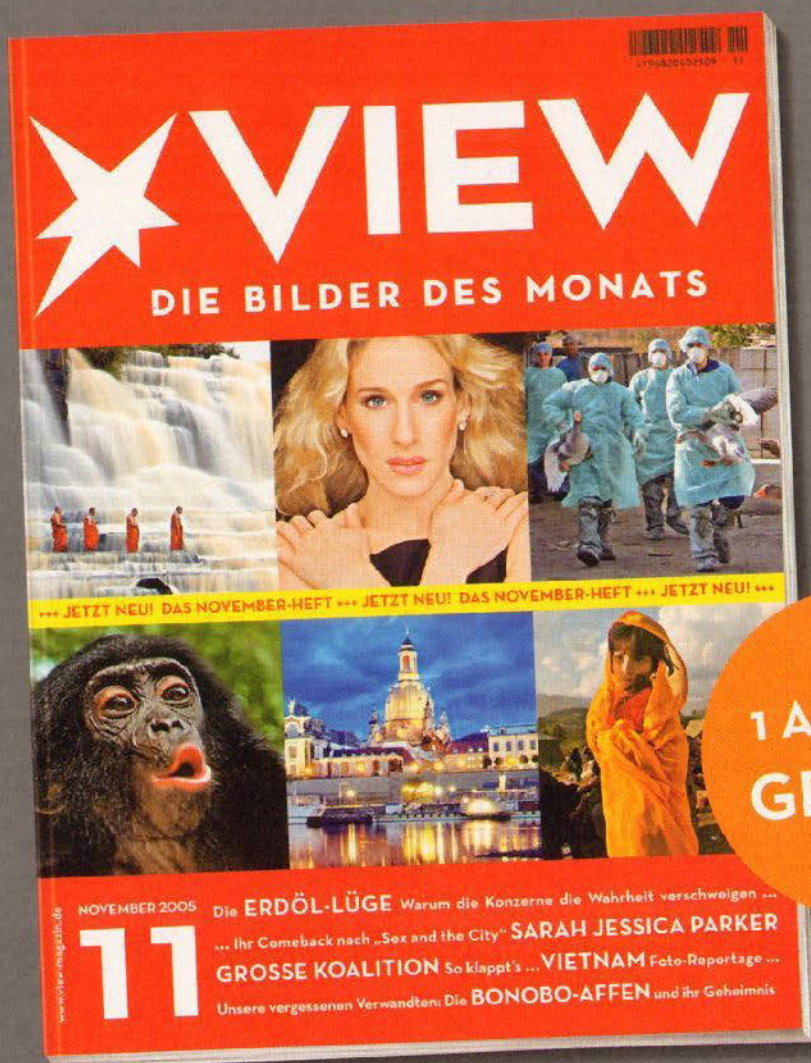
Erleben Sie fantastische Fotos von unglaublichen Ereignissen.



DIE REPORTAGE

Bewegend und informativ - erfahren Sie alles rund um ein packendes Thema.

JETZT SICHERN: IHR VIEW-TEST-PAKET!



Sichern Sie sich jetzt Ihr Test-Paket: 3x VIEW zum Vorzugspreis von nur € 5,85! Alle Ausgaben kommen pünktlich und bequem frei Haus. Als Geschenk erhalten Sie 1 Ausgabe von VIEW gratis dazu.

1 Ausgabe
GRATIS!

Bitte hier ausschneiden. ✂

IHRE VIEW-VORTEILE!

- 1. Preisvorteil**
3 Ausgaben für nur € 5,85.
- 2. Ihr Geschenk**
Sie erhalten 1 Ausgabe gratis.
- 3. Ideal zum Sammeln**
Sie verpassen keine Ausgabe.
- 4. Lieferung frei Haus**
Alle Hefte bequem frei Haus.

Ja, ich will mein VIEW-Test-Paket für nur € 5,85.

Mein Geschenk erhalte ich nach Zahlungseingang. Wenn ich mich nach dem 2. Heft nicht gemeldet habe, möchte ich VIEW auch weiterhin beziehen. Dann zum Vorzugspreis von zzt. nur € 2,70 statt € 3,- pro Heft. Ich lese nur, solange ich möchte, und kann nach Ablauf des vereinbarten Bezugszeitraumes zum Monatsende kündigen. Die Kündigung muss dem VIEW-Kunden-Service bis zum 1. des Monats schriftlich vorliegen. Das Angebot gilt nur in Deutschland und solange der Vorrat reicht. Auslandspreise auf Anfrage. Widerrufsrecht: Die Bestellung kann ich innerhalb der folgenden 2 Wochen ohne Begründung beim VIEW-Kunden-Service, 20080 Hamburg, in Textform (z.B. Brief oder E-Mail) oder durch Rücksendung der Zeitschrift widerrufen. Zur Fristwahrung genügt die rechtzeitige Absendung.

Name, Vorname _____

Straße, Nr. _____

PLZ, Wohnort _____

Telefon-Nr. _____

Geburtsdatum _____

19 _____

E-Mail _____

☐ Ja, ich bin damit einverstanden, dass Sie mich ggf. per Telefon oder E-Mail über weitere Grüner + Jahr-Angebote informieren.

Ich zahle die € 5,85 für mein Test-Paket bequem per Bankeinzug.

Bankleitzahl _____

Konto-Nr. _____

Geldinstitut _____

Datum, Unterschrift _____

Best.-Nr.: 468 641

Coupon senden an: VIEW-Kunden-Service, 20080 Hamburg.

Oder einfach anrufen unter 0 180 5/861 8000 (tägl./Mo.) oder www.view-magazin.de anklicken.

VIEW erscheint in der View Magazin GmbH,
Ove Seife, Thomas Osterkorn, Am Baumwall 11, 20459 Hamburg,
AG Hamburg, HR-Nr.: B 94 992

www.view-magazin.de

Was einen Kern zum **Kürbis** macht

Ganz gleich, ob Blume oder Baum – ohne Wärme, Wasser und Licht kann aus einem Samen kein Keimling werden und aus dem jungen Spross keine Pflanze. Doch hat dabei jedes Gewächs seine eigene Methode entwickelt, um ganz nach oben zu kommen

Text: Jürgen Bischoff und Jörn Auf dem Kampe



Beim traditionellen Wettwiegen in Altoona, Pennsylvania, brachte ein Kürbis im Oktober 2005 genau 666,3 Kilo auf die Waage. Seither gilt diese Frucht aus der Familie der Cucurbitaceae als größter Kürbis der Welt. Als **Samen** wog die Mega-Frucht etwa ein halbes Gramm. Doch war bereits in diesem Winzling alles Nötige

angelegt, um später daraus jenen gigantischen Kürbis werden zu lassen, der in Altoona das Wettwiegen gewann.

Das Wachstum der Pflanzen ist eine wundersame Angelegenheit – fast jedes Gewächs hat dabei seine eigene Strategie und seine Eigenheiten. Manche fangen schon recht mächtig an. Die Samen der Seychellen-Palme etwa wiegen 20 Kilogramm und sind damit die schwersten im Pflanzenreich. Orchideensamen hin-

gegen gehören zu den Federgewichten, bei manchen Arten wiegen rund eine Million von ihnen gerade einmal ein Gramm (siehe Seite 32).

Auch die Pflanzenformen, die aus den Samen hervorgehen, sind variantenreich. Botaniker unterscheiden unter anderem:

- Sträucher, die mit zahlreichen dünnen Trieben von einem oder mehreren Stämmen am Boden aufstreiben;



Der Kürbispflanze – hier auf einer Schautafel aus dem Jahre 1891 – bleiben nur wenige Monate Zeit, um auszuwachsen und eine Frucht zu bilden. Täglich legt sie deshalb bis zu 14 Zentimeter an Länge zu



ARUM Maximum Aegyptiacum
quod vulgo Colocasia c. n. p.

Eine Colocasia aus der Familie der Aronstab-Gewächse. Die Blätter einiger asiatischer Arten dieser Familie werden neun Quadratmeter groß

**Manche Blätter sind so
groß wie vier Bettlaken**

- Bäume, die meist nur einen einzelnen, mächtigen Stamm ausbilden und sich erst in der Krone auffächern;
- Gräser, die mit zahlreichen Halmen flächig oder in Horsten heranwachsen;
- krautige Gewächse wie den Kürbis, die Stängel mit Blättern, Blüten und Früchten hervorbringen und während ihres Daseins nicht verholzen.

Doch so unterschiedlich diese Pflanzen auch sind, der Anfang ihres Lebens sieht bei fast allen ziemlich ähnlich aus: Samen fallen zu Boden und beginnen zu keimen.

Beim Kürbis können sie bis zu zehn Jahre überdauern, ohne Schaden zu nehmen.



Kürbisse können Hunderte weniger als ein Gramm schwere Samen enthalten

In der harten Schale wartet der pflanzliche Embryo (siehe Seite 38) so lange, bis es draußen warm und feucht wird – das ist sein Signal zum Wachsen.

Bei Temperaturen zwischen 20 und 30 Grad Celsius kommt der Stoffwechsel des Kürbissamens in Gang. Wenn es dazu noch ausreichend regnet, beginnt er zu quellen. Das Regenwasser füllt den Samen bis zum Bersten und löst zugleich Veränderungen im embryonalen Stoffwechsel aus.

Enzyme beginnen, die Vorräte aus dem Nährgewebe im Sameninneren abzubauen. Sie werden zu den **Wachstumszonen** des Keimlings transportiert, damit dieser sein erstes Organ ausbilden kann: die **Keimwurzel** (Radikula). Sie schiebt sich, während das Nährgewebe langsam zur

Neige geht, durch die aufgeplatzte Samenhülle in das Erdreich und holt sich von dort jetzt selbst das benötigte Wasser mit den darin gelösten Nährstoffen.

Um an möglichst viele der lebenswichtigen Substanzen zu gelangen, vergrößert die Wurzel ihre Oberfläche – erst durch zahlreiche Wurzelhaare, dann durch Seitenwurzeln. In einigen Fällen nimmt diese Expansion gewaltige Ausmaße an: So erreicht etwa das Wurzelsystem einer vier Monate alten Roggenpflanze 10 000 Kilometer Länge und eine Oberfläche von 1000 Quadratmetern.

Wurzeln haben aber noch eine andere Aufgabe: Sie verschaffen Pflanzen den nötigen Halt. Bäume des Regenwaldes bilden wegen der dort dünnen Humusschicht deshalb oft oberirdische Brettwurzeln aus, während Bäume aus gemäßigten Breiten ihre Fortsätze meist in den Untergrund wachsen lassen – Eichenwurzeln dringen bis in neun Meter Tiefe vor. Ist der Boden zu hart, erstrecken sich Baumwurzeln oft auch horizontal über dem Waldboden.

Mangroven, die im Gezeitenbereich tropischer und subtropischer Küsten wachsen, ruhen dagegen wie Pfahlbauten auf zahlreichen Stützwurzeln. Ihre Sämlinge haben Schwierigkeiten, sich in der durch Ebbe und Flut unruhigen Umgebung zu verankern. Daher keimen sie bereits auf dem Mutterbaum und entwickeln dabei speerförmige Radikulae. Fällt der Keimling bei Ebbe ab, bohrt er sich damit in den Grund und treibt dort schnell Seitenwurzeln aus.

Die Kürbispflanze dagegen kann in Ruhe ihre erste Wurzel in die Tiefe wachsen lassen. Sobald sie sich im Boden verankert hat, wächst ein Spross in die Gegenrichtung – und strebt zum Licht. Denn ohne Sonnenschein funktioniert die **Photosynthese** nicht, und ohne diese kann (fast) kein Gewächs überleben (siehe Seite 54).

Pflanzen haben daher eine Vielzahl von Techniken entwickelt, um ans Licht zu kommen. So wächst die Würgefeige im

Tierische Größen

Grenzen des Wachstums

Weshalb Eisbären groß sind und Dinos heute kleiner wären

Wie im Pflanzenreich ist auch bei vielen Tieren die Körpergröße von Bedeutung. Wer etwas werden will, muss meist größer sein als die Artgenossen. Innerhalb einer Spezies setzen sich die mächtiger gewachsenen bei der Nahrungssuche durch, etwa bei der Jagd auf Beute; das physisch imposantere Männchen gewinnt eher den Konkurrenzkampf um ein Weibchen und kann so sein Erbgut an die nächste Generation weitergeben. Größere Weibchen wiederum können ihren Nachwuchs besser verteidigen.

Größe hat noch andere Vorteile. Sie hilft Tieren etwa in polaren Regionen, möglichst wenig Wärme über die Körperoberfläche zu verlieren: Denn die Oberfläche eines Körpers nimmt proportional weniger zu als dessen Volumen. Diese Eigenschaft nutzen Vögel und Säugetiere, die in kälteren Regionen durch Größenzunahme ihren relativen Wärmeverlust über die Oberfläche verringern. Sie müssen als Warmblüter ihren Körper auf einem konstanten Temperaturniveau halten und dürfen nur wenig Energie in Form von Wärme an die Umwelt verlieren.

Bei sonst vergleichbaren Lebensbedingungen sind zum Beispiel Bären in Alaska wesentlich größer als im Südwesten Kanadas. Wer klein ist, benötigt dagegen mehr Energie: Eine winzige Spitzmaus etwa verbraucht pro Gramm Körpergewicht 100-mal mehr Energie als ein Elefant.

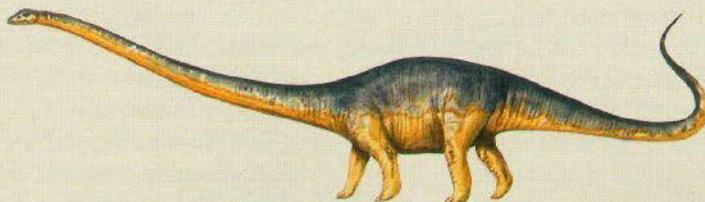
Dennoch sind Tiere im Laufe der Evolution nicht immer riesiger geworden. Denn mit zunehmender Größe braucht ein Organismus beispielsweise mehr Nahrung, die ein Lebensraum nicht unbedingt bietet. Und auch die Physik setzt Grenzen: Wirbeltiere haben zwar einen aufwendigen Körperbau entwickelt, dessen Knorpel- und Knochenkonstruktionen sehr belastbar sind und der – verglichen mit den übrigen tierischen Bauprinzipien – die größten und schwersten Körper tragen kann.

Trotzdem vermag auch dieses Skelettsystem, so haben Biomechaniker berechnet, bei Landlebewesen nicht viel mehr als 50 Tonnen Gewicht zu bewältigen. Tiere mit ganz anderen Bauprinzipien bleiben ohnehin kleiner: Die **Wirbellosen**, etwa Insekten und Krebse, die kein Innenskelett mit Wirbelsäule ausbilden, werden meist nur wenige Zentimeter groß.

Auch die Sauerstoffkonzentration in der Erdatmosphäre limitiert das Größenwachstum: Da jede einzelne Körperzelle eines Tieres Sauerstoff benötigt, verbraucht ein großer Organismus mit vielen Zellen entsprechend mehr Sauerstoff als ein kleiner. Zur Zeit der Dinosaurier, vor rund 300 bis 65 Millionen Jahren, hatte die Atmosphäre einen bedeutend höheren Sauerstoffanteil als heute: Sein Anteil an der Luft lag bei 35 Prozent (heute: 21 Prozent). Weil sie eine höchst effiziente Lunge entwickelten, konnten die Saurier, so eine Hypothese, diese hohe Konzentration nutzen, um ihre gigantischen Körper ausreichend mit dem lebenswichtigen Gas zu versorgen.

So wuchsen unter den Sauriern Landtiere mit über 50 Tonnen Gewicht heran – Wesen, schwerer als sieben Elefanten.

Philipp Crone



Vom Kopf bis zur Schwanzspitze brachte es *Diplodocus* (155–145 Mio. Jahre) auf bis zu 28 Meter Länge – und wog dank luftgefüllter Wirbel doch nur rund zehn Tonnen

Regenwald zunächst ganz harmlos als **Epiphyt** auf den Ästen ihres Wirtsbaumes heran. Mit der Zeit jedoch streckt sie Luftwurzeln nach unten und nutzt zugleich den Wirt als Leiter zum Licht. Sobald ihre Wurzeln den Boden erreicht haben, gewinnt sie Wasser und Nährstoffe aus der Erde.

Die Feigenwurzeln werden dicker und bilden Seitentriebe aus, bis sie den Stamm des Wirtsbaumes vollständig umschließen. Das behindert dessen Dickenwachstum, und seine Gefäße werden allmählich abgeschnürt – er stirbt ab und verfault. Übrig bleibt die Würgefeige, die nun selbst zum Baum geworden ist, mit einem röhrenförmigen, hohlen Stamm. Ihre Krone kann sich so weit ausbreiten wie die mehrerer Urwaldriesen zusammen: Die größte bekannte Würgefeige bedeckt ein Areal von zwei Hektar.

Anders einige südostasiatische Aronstab-Gewächse: Um auch am Boden möglichst viel Licht aufzufangen, bilden sie herzförmige Blätter – mit einer Fläche von bis zu neun Quadratmetern.

Oder die Coco-de-Mer-Palme auf der Seychelleninsel Praslin: Sie drängt zunächst mit großen Blättern auf armdicken, zwölf Meter langen Stielen zum Licht. Erst wenn die Ernährung durch Photosynthese gesichert ist, beginnt sie mit der Ausbildung des Stammes.

Einjährige Pflanzen – dazu zählen unter anderem die Gräser – bilden keine überwinterungsfähigen Stämme aus. Weil sie oft nur wenige Monate Zeit haben, vom Samen bis zur Frucht zu reifen, müssen sie schneller wachsen und eher blühen als etwa Bäume und Sträucher.

Auch der Kürbis gehört zu den einjährigen Pflanzen und ist deshalb bestrebt, seinen Spross möglichst schnell nach oben zu treiben: Zunächst wird er von zwei massigen Keimblättern geschützt – gekrümmt wie ein Haken, durchbrechen sie gleichsam mit dem Rücken zuerst das Erdreich und bewahren so die empfindliche Spitze vor dem Schmirgeleffekt des körnigen Bodens.

Bei optimaler Temperatur, ausreichend mit Wasser und Nährstoffen versorgt,

kann der Spross täglich gut 14 Zentimeter wachsen – also mehr als einen halben Zentimeter pro Stunde. Damit ist er 20-mal schneller als die meisten Pflanzen.

An der Spitze des Sprosses wie auch der jungen Wurzel befinden sich Gewebe aus teilungsfähigen Zellen – die Wachstumszonen (siehe Grafik Seite 167). Aus ihnen wächst mit der Zeit die komplette Kürbispflanze heran. Diese Zellen sind zunächst noch nicht auf eine bestimmte Aufgabe spezialisiert und können sich aufgrund ihrer genetischen Informationen in alle Pflanzentypen entwickeln.

Je nachdem, was gebildet werden soll – ob Zellen in den Blättern oder Gefäßzellen im Leitungsgewebe oder dickwandige Zellen zum Stützen der ausgewachsenen Pflanze –, wird der jeweilige genetische „Bauplan“ aktiviert, und die Zellen in den Wachstumszonen teilen und verändern sich nach dessen Vorschriften. Damit sind diese Multitalente den embryonalen Stammzellen bei Menschen und Tieren vergleichbar (siehe GEO kompakt Nr. 2) – mit dem Unterschied, dass eine Pflanze diese Zellen immer wieder neu ausbildet.

Während dieser **Differenzierungsphase**, in der sich die verschiedenen Zelltypen herausbilden, können aus dem Spross neue Fortsätze wachsen; er selbst wird dann zum tragenden Stängel. In jeder abzweigenden Sprossspitze legt das Gewächs ebenfalls Wachstumszonen an, die bei Bedarf neue Organe heranbilden.

Neben diesen Zellen an den Spitzen finden sich in Sprossen und Blättern häufig weitere Bereiche von teilungsfähigen Zellen. Diese sorgen unter anderem dafür, dass sich viele Gewächse durch Stecklinge vermehren lassen. Bei der Begonie etwa reicht ein einziges Blatt, um daraus eine neue Blume zu klonen.

Mit Ausnahme der Wachstumszonen werden die Stängel und Äste einer Pflanze aus dem **Dauergewebe** gebildet. Es besteht aus nicht mehr teilungsfähigen Zellen. Sie

nehmen allerdings durch die Aufnahme von Wasser an Volumen zu und verhalten sich dabei wie ein Ballon, der mit Luft gefüllt wird. Auf diese Weise lassen sie die Pflanze in die Höhe wachsen – ein Vorgang, der bei Tieren und Menschen nur durch Zellteilung erreicht wird.

Pflanzliche **Botenstoffe** steuern den Wachstumsprozess. Diese **Phytohormone** sind kleine Moleküle, welche die Wände der Zellen durchdringen. Für das Streckungswachstum der Dauergewebszellen sind vor allem zwei Sorten von Botenstoffen verantwortlich: die Auxine und die Gibberelline.

Um die Zelle zu strecken, beeinflussen diese beiden Moleküle zwei voneinander unabhängige physikalische Prozesse: die Fähigkeit der Zelle zur Wasseraufnahme und die Dehnbarkeit ihrer Zellwand (siehe Seite 166). Immerhin sind die Wände der Pflanzenzellen schon wegen des als Baumaterial verwendeten Zellstoffes (siehe Seite 168) ziemlich steife Konstruktionen – ganz im Gegensatz zu den meisten tierischen Zellen.

Die Auxine nun säuern die Zellwand an und weichen sie dadurch gewissermaßen auf. Die Gibberelline wiederum unterstützen diesen Vorgang und ermöglichen gleichzeitig die Einlagerung zusätzlichen Baumaterials. Dadurch vergrößert sich das Zellvolumen, was wiederum dazu führt, dass Wasser nachströmen kann.

So ist es möglich, dass eine Pflanzenzelle ausgewachsen mehr als 1000-mal so groß sein kann wie im Embryonalzustand. Und dies innerhalb kürzester Zeit – manche Dauergewebszellen benötigen nur eine Stunde, um ihr Volumen zu verdoppeln. Menschen und Tiere dagegen wachsen in erster Linie durch langsame Zellteilung: Gerüstzellen bilden neue Gerüstzellen, Muskelzellen neue Muskelzellen, Hautzellen neue Hautzellen.

Die schnelle Volumenzunahme in den Pflanzenzellen führt zu erstaunlichen Leistungen: Einige Bäume können im Frühjahr binnen weniger Stunden ihre Blätter austreiben – Zellteilungen wie bei den Tieren würden dagegen viel mehr Zeit in Anspruch nehmen.

Hormone weisen den Weg ans Licht



Tulpenzwiebeln speichern Nährstoffe, damit – ausgelöst durch pflanzliche Botenstoffe – jedes Jahr von neuem eine Blume sprießen kann

Bäume besitzen neben den Wachstumszonen an Spross- und Wurzelspitze auch solche, die ringförmig in Spross und Wurzel liegen. Dort bilden sich jedes Jahr neue Leitungsbahnen für den Wasser- und Nährstofftransport (siehe Seite 66). Diese Zonen sorgen für das – manchmal

extreme – Dickenwachstum des Stammes: Affenbrotbäume haben einen Durchmesser von bis zu 47 Metern.

In der Theorie könnte ein Baum wohl auch Hunderte Meter dick werden, um wirklich jedem Sturm zu widerstehen. Doch diese Maximallösung hat die Natur

nicht vorgesehen: Wissenschaftler vermuten, dass Bäume im Laufe der Evolution eine gewisse Verlustrate „einkalkuliert“ haben. Gelegentliche Schäden scheinen weniger zu „kosten“ als permanenter, aufwendiger Massivbau – Bäume haben sich zu Holzkonstruktionen entwickelt, die bei minimalem Materialaufwand die bestmögliche Stabilität garantieren.

Diese ist auch von äußeren Faktoren abhängig: In Gegenden mit starken Winden muss ein Baum erst in die Breite wachsen, bevor er an Höhe gewinnen kann. Und bei schwierigen Umweltbedingungen, zum Beispiel im Gebirge nahe der Baumgrenze, sind Pflanzen häufig kleiner als ihre Verwandten im Tal.

Maximal 130 Meter hoch kann ein Baum werden, dann ist der Wassertransport von den Wurzeln zur Krone physikalisch nicht mehr möglich, die Gravitationskraft wird zu groß. Trotzdem hört er auch dann nicht auf zu wachsen. Wenn ein Baum in Mitteleuropa 60 Jahre alt ist, nimmt sein jährlicher Höhenzuwachs zwar deutlich ab. Dennoch besitzt er dann noch aktive Wachstumszonen, die Knospen austreiben, neue Zweige, Blüten, Blätter und Früchte hervorbringen.

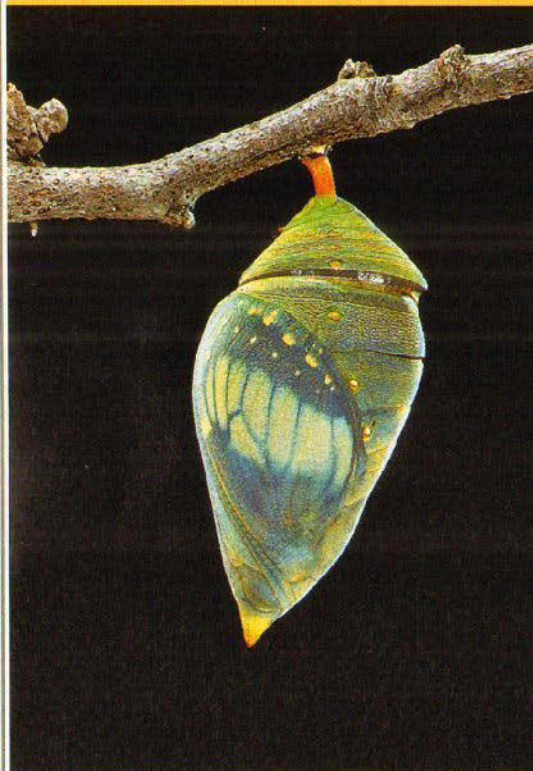
Selbst der vermutlich älteste Baum der Welt, eine über 4700 Jahre alte Grannenkiefer in Kalifornien, befindet sich noch im Wachstum. Unermüdlich ist auch eine südwestafrikanische Wüstenpflanze namens *Welwitschia mirabilis*. Zwar bildet diese in ihrem ganzen Leben nur zwei bandförmige Laubblätter aus – die aber wachsen ununterbrochen. Manchmal 2000 Jahre lang.

Die Kürbispflanze dagegen hat meist schon nach einem Jahr ihre maximale Größe erreicht und stirbt ab. Übrig bleiben ihre Früchte, die Kürbisse, in denen mit den neuen Samen bereits die nächste Generation der Pflanze verborgen ist. Vielleicht sogar ausgestattet mit den genetischen Anlagen für eine Frucht, die den Mega-Kürbis aus Pennsylvania noch in den Schatten stellt. □

Jürgen Bischoff, 51, ist GEOkompakt-Redakteur. Beratung: Prof. Dieter Hanelt, Biozentrum Klein Flottbek, Universität Hamburg.



Aus den winzigen Eiern des Himmelsfalters *Morpho peleides* schlüpfen nach einigen Tagen Larven (Raupen), die in den Regenwäldern Zentralamerikas Blätter von Kletterpflanzen vertilgen und sich bei jedem Wachstumsschub häuten



Eine erstaunliche Verwandlung findet in der Puppe statt: Die Raupe löst ihre inneren Organe vollständig auf und verwandelt sich in einen Schmetterling. Das kann bis zu zwei Monate dauern

Ein Tier, zwei Körper

Text: Jörn Auf dem Kampe,
Monika Rößiger
Fotos: Paul Starosta

Ein Verwandlungstrick macht Insekten erfolgreich: Als Larven sind sie reine Fressmaschinen, als ausgereifte Tiere aufs Fortpflanzen spezialisiert



Hat die Raupe genug an Gewicht zugelegt, hängt sie sich an einen Ast und häutet sich ein letztes Mal – zur Puppe. Nun beginnt die Metamorphose der Larve



Der schlüpfende Falter scheidet Abfallstoffe im Tropfen aus



Seine Flügel entfaltet der Schmetterling, indem er Hämolymphe – Insektenblut – in deren Adern pumpt. Sind diese dann ausgehärtet, wird die Lymphe durch Luft ersetzt

Wenn es um die schiere Masse geht, sind sie die erfolgreichsten Tiere des Planeten: Insekten bringen mehr Gewicht auf die Waage als jede andere Tierklasse. Etwa 2,7 Milliarden Tonnen wiegen alle zusammen – so viel, wie es 39 Milliarden Menschen tun würden. Und sie stellen die weitaus artenreichste Gruppe der Erde, auch wenn nicht klar ist, ob es nun zwei, fünf oder gar zehn Millionen Insektenarten gibt.

Eine außergewöhnliche Strategie könnte zu diesem evolutionären Erfolg maßgeblich beigetragen haben: die **Metamorphose**. Fast alle Insekten schlüpfen als **Larven** aus dem Ei und verändern danach radikal ihren Körper, bis sie eine **Imago** geworden sind, ein erwachsenes

Die Fresswerkzeuge

am mächtigen Kopf
der Raupen des
Chinesischen Eichen-
seidenspinners
bewältigen auch dicke,
harte Eichenblätter



Tier. Bei der großen Mehrheit verpuppen sich die Larven und bauen ihren Körper komplett um: Käfer, Fliegen, Ameisen und Schmetterlinge kommen geradezu ein zweites Mal auf die Welt. Insektenkundler nennen diese Metamorphose **Holometabolie**: vollständige Umwandlung*.

Die Taktik „Ein Lebewesen, zwei Lebensformen“ verschafft Insekten einen immensen Vorteil. Denn Larven und erwachsene holometabole Insekten können vollkommen unterschiedliche Lebensräume besiedeln – und müssen nicht um Nahrung konkurrieren. „Bei der holometabolen Entwicklung unterscheiden sich Larve und Imago derart in ihrer Lebensweise“, erklärt der Biologe Dieter Mahsberg, „dass man ökologisch gesehen sogar von zwei Arten sprechen kann, die unterschiedliche Nischen ihrer Umwelt besetzen.“

Dazu haben die Insekten verschiedene Strategien entwickelt. So fressen sich die Larven des Hirschkäfers durch vermoderndes Eichenholz – das fertige Insekt aber saugt Säfte aus den Wunden der Bäume. Die Larve mancher Ameisenjungfer-Arten lauert in einer trichterförmigen Fanggrube Ameisen auf, die in die Falle rutschen – die Fluginsekten, die nach der **Verpuppung** schlüpfen, machen dagegen nachts Jagd auf kleinere Kerbtiere.

Die Rattenschwanzlarven der Schwebfliege *Eristalis tenax* sind auf Abwasserkanäle oder Jauchegruben spezialisiert – die erwachsene „Mistbiene“ versorgt sich mit Nektar und Pollen.

Und die Alkalifliege *Ephydra hians* hat sich mit einem noch extremeren Biotop arrangiert: Sie legt ihre Eier in Sodaseen im Nordwesten der USA ab, in deren salziger Lauge kaum ein anderes Tier überdauert. Unter Wasser entwickeln sich daraus die Larven, die sich nach mehreren Wochen verpuppen und schließlich in luftgefüllten Säcken an die Oberfläche steigen, um fortan als Fliegen am Seeufer zu leben.

Bis es aber so weit ist, müssen alle holometabolen Insekten einen komplexen Prozess überstehen. Bei Schmetterlingen etwa verwandelt sich die Larve (Raupe) innerhalb weniger Monate

* Manche Insekten – etwa Libellen oder Heuschrecken – machen eine unvollständige Metamorphose durch (**Hemimetabolie**). Ihre Larven ähneln schon der Imago und wachsen über eine Reihe von Häutungen zur vollen Größe heran.

Weil ihr Verdauungssystem rund die Hälfte der Körpermasse ausmacht, wachsen Raupen schnell heran – ihre Sinnesorgane sind primitiv, Fortpflanzungsorgane fehlen

in ein Fluginsekt. Die Raupen, die sich aus den Eiern der vorigen Schmetterlingsgeneration entwickelt haben, sind als Fressmaschinen konstruiert: Das Verdauungssystem macht bei vielen rund die Hälfte der Masse aus. Geschlechtsorgane fehlen, die Sinnesorgane sind einfach gebaut. Die Larven haben nur eine Aufgabe: zu fressen. Eine Schwalbenschwanz-Raupe etwa nimmt in den ersten vier bis fünf Wochen um das Tausendfache an Gewicht zu.

Im schlauchförmigen Körper tragen die Larven schon Anlagen für das erwachsene Tier: die **Urkeimzellen**, aus denen sich Eier und Spermien bilden, und die **Imaginalscheiben** – verdickte Zellschichten, die unter anderem Beine, Flügel und den Kopf des Schmetterlings formen.

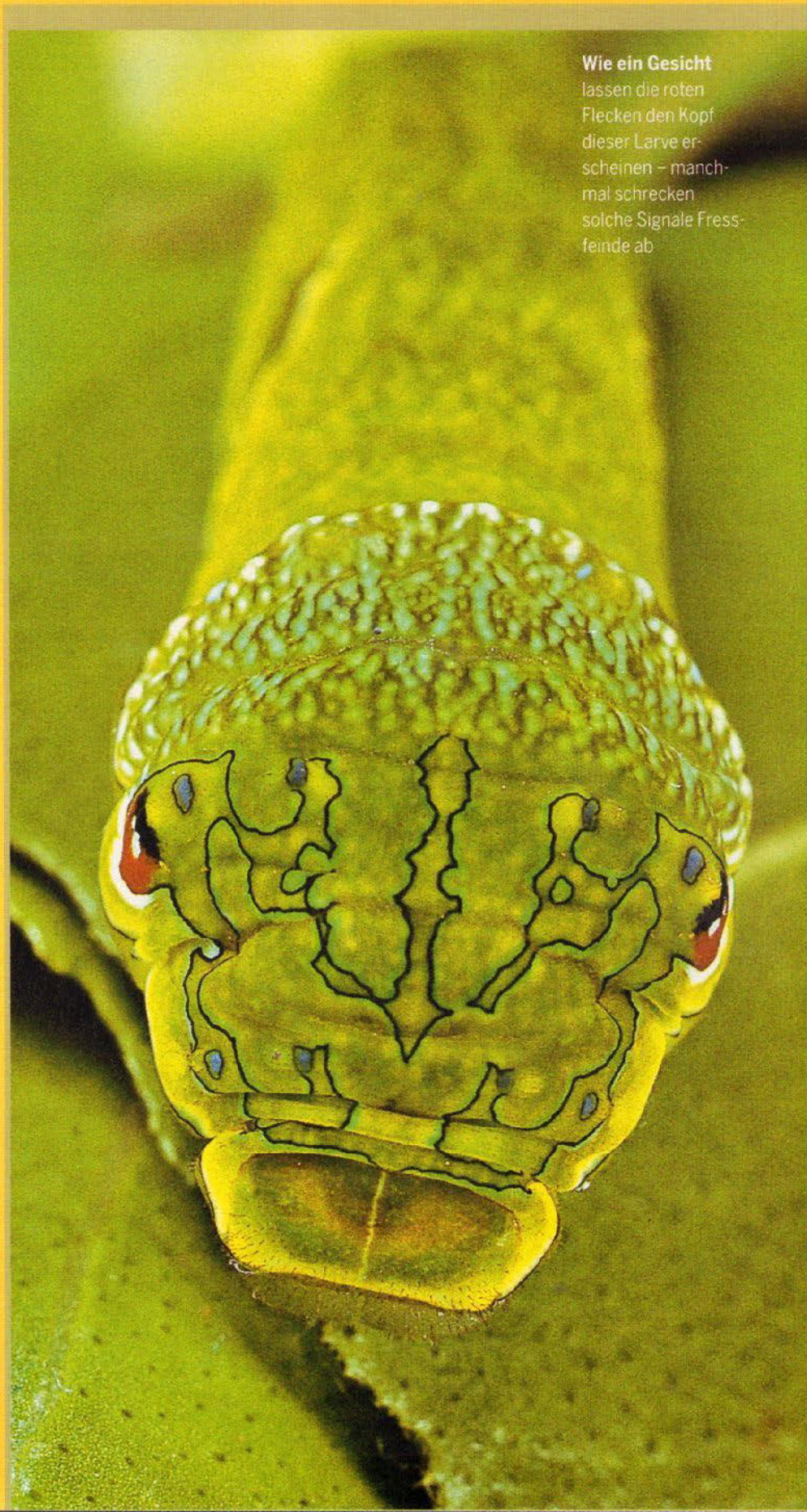
In dem dreigeteilten Raupenkörper sind bereits die Segmente des späteren Schmetterlings angelegt. Aus dem Kopf der Larve entwickelt sich der Kopf mit Mundwerkzeugen und Antennen, aus der Brust die mittlere Körperregion, die für die Fortbewegung zuständig ist, aus dem Larvenhinterleib das Abdomen, das die wichtigsten inneren Organe umschließt.

Der fertige Falter ist dann für ein ganz anderes Leben ausgestattet. Die vier Flügel mit ihren dachziegelartig übereinander liegenden Schuppen erlauben vielen Arten einen taumelnden, spielerisch erscheinenden Flug. Die Antennen am Kopf, die aus bis zu 100 Gliedern bestehen, erfassen in der Luft sogar einzelne Duftmoleküle eines Partners. Mit dem zum Teil mehrere Zentimeter langen Rüssel saugen Schmetterlinge Nektar aus Blüten, manche zapfen sogar Schweiß oder Blut bei Säugetieren ab. Die wichtigsten Körperbauteile sind jedoch die Geschlechtsorgane im Abdomen – denn die Fortpflanzung ist der Hauptzweck ihres Daseins.

Wann und wie die Umwandlung von der Raupe zum Schmetterling abläuft, steuern Hormone, die Botenstoffe des Körpers. Sie werden über Drüsen im Gehirn der Larve ausgeschüttet. Zwei Botenstofftypen sind dabei besonders wichtig: Das Metamorphose-Hormon Ecdyson und die **Juvenilhormone**.

Ecdyson löst zunächst die Häutung der Larve aus. Es aktiviert dafür Gene in der **DNS**, dem Träger der Erbinformation, in welcher der Bauplan eines Lebewesens

Wie ein Gesicht
lassen die roten
Flecken den Kopf
dieser Larve er-
scheinen – manch-
mal schrecken
solche Signale Fress-
feinde ab





Mit einem Gespinst beginnt die Raupe des Echten Seidenspinners ihre Verpuppung

gespeichert ist. Nach diesen Vorgaben wachsen neue Zellen heran – zunächst bilden sie eine neue Haut, die sich in Falten unter die alte schiebt. Die platzt schließlich auf und wird von der rapide wachsenden Larve abgestreift.

Damit die Larven nicht zu früh Organe des erwachsenen Insekts ausbilden, etwa die Flügel, verhindern die Juvenilhormone (JH), dass sie vorzeitig reifen. (In Experimenten, bei denen die Drüsen für die JH-Produktion entfernt wurden, bildeten sich bei den Häutungen schon Körperteile des erwachsenen Insekts – die Larven verendeten.) Je weiter die Larve wächst, desto weniger JH wird ausgeschüttet. Sobald die Hormone einen bestimmten Schwellenwert erreicht haben, beginnt die Raupe dann mit der Verpuppung.

Dafür baut sie, je nach Art, eine schützende Hülle oder eine einfache Aufhängvorrichtung: Eine Spinndrüse an ihrem Kopf sondert ein Sekret ab, das an der Luft

zu einem Seidenfaden aushärtet. Damit umwickelt und verankert sich die Raupe – etwa an einem Pflanzenstängel –, oder sie beginnt, sich vollständig in einen Puppenkokon einzuspinnen. Während der „Puppenruhe“, die eine Woche bis mehrere Jahre dauert, bewegt sich das Tier nicht und nimmt auch keine Nahrung auf.

Nun setzt ein kompliziertes Wechselspiel von Genen, Hormonen und Proteinen ein, das Forscher noch nicht in jeder Einzelheit verstehen. Das innere Gewebe der Raupe löst sich dabei größtenteils auf, die Imaginalscheiben und die Urkeimzellen allerdings bleiben verschont.

Körpereigene Fresszellen zersetzen die Organe zu Brei – auch die Mundwerkzeuge und die Muskulatur: Die Larve verdaut sich gewissermaßen selbst. Die meisten Stoffe aber verwendet das Tier wieder, die Energie für sämtliche Umbauprozesse stammt aus seinen Fettdepots.

Die Zellen der Imaginalscheiben und die Urkeimzellen teilen sich und wachsen zu neuen Organen und Extremitäten sowie Geschlechtszellen heran. Für einen Flügel etwa bilden die Zellen der Haut zunächst zwei Schichten. An einigen Stellen verschmelzen die, um dem Flügel Halt zu geben, an anderen Stellen lassen sie Hohlräume frei, die mit Körperflüssigkeit gefüllt werden. Von der Flügelbasis her wachsen dann Nerven in den Flügel ein, der durch Adern stabilisiert wird.

Dieses Konstrukt wird schon bei der Entstehung in der Puppe auf komplexe Weise gefaltet, sodass es möglichst wenig Platz einnimmt. Schon ein einzelnes defektes Gen, das etwa die Pläne für den genauen Bauort einer Extremität enthält, kann bei der Entwicklung fatale Wirkung haben: Fruchtfliegen etwa wuchsen bei Versuchen doppelte Flügel oder Beine anstelle der Antennen.

Wenn alles nach Plan verläuft, scheidet die Imago des Falters kurz nach dem Schlüpfen die wenigen nicht benötigten Substanzen mit ein paar Tropfen Flüssigkeit aus, dem „Puppenharn“. Die Puppe platzt auf, und ein Schmetterling mit knittrig-feuchten Flügeln kommt zum Vorschein.

Um sie entfalten zu können, pumpt er Hämolymphe, das Blut der Insekten, in die Flügeladern und zieht diese Flüssigkeit dann zurück; nach etwa 20 bis 30 Minuten sind die nun luftgefüllten Röhren ausgehärtet, und der Schmetterling ist bereit für den ersten Flug. Sein Dasein als erwachsenes Tier dauert meist nur ein paar Wochen, und die widmet er vor allem der Partnersuche. Mit der Paarung und Eiablage schließt sich der Zyklus.

In Mitteleuropa überwintern die meisten Schmetterlinge – je nach Art im Ei-, Raupen- oder Puppenstadium – an geschützten Orten, im Unterholz, unter Laub oder in Bäumen. So können sie in der nächsten Saison ihre erfolgreiche Strategie fortsetzen. Dann schlüpfen auch die Larven einer ganz besonderen Gruppe von Insekten: Diese hypermetabolen Spezies verändern nach dem Schlüpfen gleich viermal ihre Gestalt.

Die gut zwei Millimeter große, mit Klauen bewehrte Larve des Ölkäfers beispielsweise klettert im Frühjahr auf Blüten, klammert sich dort an eine Wildbiene und lässt sich in deren Nest befördern, wo sie das Ei der Biene vertilgt. Danach häutet sie sich zu einer augenlosen Made und verzehrt Nektar und Pollen, welche die Biene heranschafft. Nachdem der ungebetene Gast das Nest verlassen hat, gräbt er sich in der Nähe in den Erdboden und häutet sich dort nach einem Ruhestadium zu einer neuen madenartigen, nicht fressenden Larve. Die verpuppt sich schließlich und baut ihren Körper um – ein glänzender Käfer entsteht, der Pflanzenteile frisst und sich damit den vierten Lebensraum erschließt.

Doch diese Taktik kann gründlich scheitern: Denn die nicht allzu wahlrischen Larven besteigen häufig den falschen Transporteur – statt der Wildbiene etwa Käfer oder Fliegen.

Dann ist schon nach dem ersten Leben alles vorbei. □

Jörn Auf dem Kampe, 32, ist Redakteur von GEOkompakt. Er hat das Konzept dieses Heftes erarbeitet. Monika Rößiger ist Journalistin in Hamburg. Wissenschaftliche Beratung: Dr. Dieter Mahsberg, Biozentrum der Universität Würzburg, und Kai Schütte, Universität Hamburg.

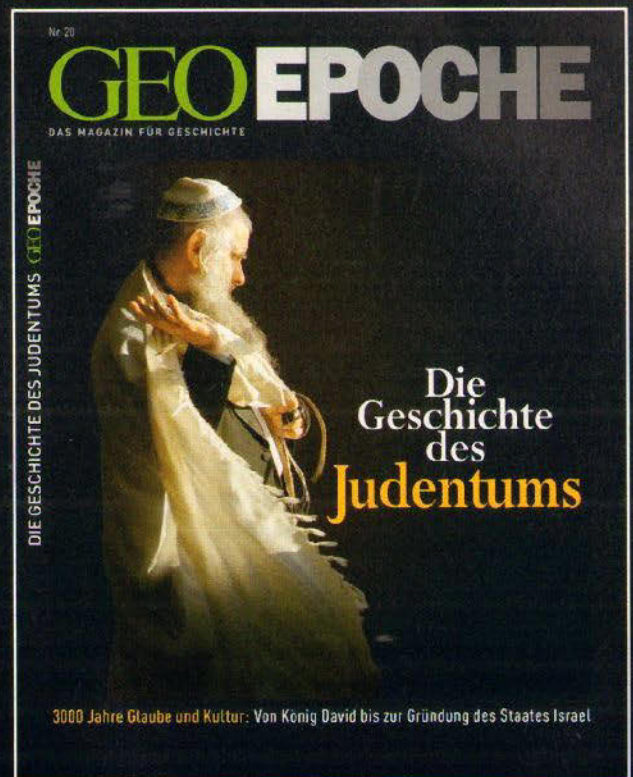
Jetzt im Handel



Sie kannten Jesus vor den Christen: die Juden.

Es kann nur einen Gott geben. Diese Erkenntnis stammt nicht von den Christen, sondern vom Volk des Königs David. Was die Juden noch mit dem christlichen Glauben verbindet und warum sie als weltweite Religionsgemeinschaft ihre eigenen Wege gingen. Jetzt in GEO EPOCHE.

Kollektive





Keine Neurosen! Pflanzen haben wirklich Glück

Die Gewächse auf Erden sind wirklich ziemlich clever. Sie locken und täuschen und kommunizieren miteinander – und das alles ohne Gehirn! Was ihnen viele lästige Intelligenznebenwirkungen erspart

Man möchte sich nicht selber loben. Man möchte sich auch nicht auf peinliche Weise anbieten. Aber: Dieses Heft hat schöne Bilder. Das ist nun mal eine Tatsache – und die hängt ebenfalls mit den Geheimnissen der Natur zusammen! Wir Menschen können nämlich verhältnismäßig gut sehen, vor allem Farben. Beim Farbsehen sind wir unter den Geschöpfen des Planeten sogar in der Spitzengruppe. Vögel sind bei Farben allerdings noch besser.

Ich beneide die Vögel übrigens nicht. Ich lege keinerlei Wert darauf, von einem Hochhaus oder aus einem Flugzeug den Urinspritzer einer auf dem Parkplatz sich erleichternden Wühlmaus sehen zu können. Der Turmfalke kann es. So gut sehen zu können, das muss eklig sein. Deswegen jedenfalls, weil wir aufgrund des Geheimnisses der Natur wahnsinnig gut Farben erkennen können, enthält dieses Heft zahlreiche farbige Bilder.

Auf Wunsch der Redaktion wurde ein naturwissenschaftlicher Laie von eher gering ausgeprägter Wissenschaftsverstehkompetenz damit beauftragt, das Heft vorab zu lesen und zu kommentieren. Diese Rolle wurde mir zugedacht. Fassen wir zusammen. Das Gefühl, das wir alle im Urlaub immer haben, ist erdhistorisch richtig: Alles Leben geht auf gespeicherte Sonnenenergie zurück.

Die Erde, in einem Satz beschrieben, ist eine Maschine, die Sonnenlicht in Wärmestrahlung verwandelt. Die Erde ist eine Art Heizung. Heizungen verwandeln immer irgendwas in Wärme.

Das wichtigste Prinzip des Lebens aber heißt: Man muss teilen können. Teilung ist die Basis von allem. Die Zellen teilen sich, so wächst der Organismus und entwickelt sich, und Dynamik kommt auf. Irritierenderweise beruht die Natur zu großen Teilen auf Verhaltensweisen, die

man im menschlichen Miteinander nicht gern mag. Täuschung und Tarnung zum Beispiel. Die ganze Zeit wird getäuscht und getarnt, sogar von den Pflanzen.

Aus der Geistesgeschichte weiß ich: Als die Menschen allmählich etwas besser über die Natur Bescheid wussten, fingen sie auch an, über sich selbst neu nachzudenken. Ihnen fiel früh auf, dass es in der Natur keine Moral oder Ethik zu geben scheint, kein Gut oder Böse, das waren offenbar menschliche Ideen. Die Natur ist sozusagen eine Intelligenz, die nicht über sich nachdenkt.

Wenn ich die Texte in diesem Heft lese, denke ich an den Schock, den diese Erkenntnis für die Philosophen bedeutet hat, im 18. Jahrhundert zum Beispiel. Alles läuft automatisch ab, obwohl es kompliziert ist. Nur wir Menschen müs-

»Manche Tiere riechen räumlich. Das mag man sich in einer voll besetzten U-Bahn nicht vorstellen«

sen uns dauernd entscheiden. Nur wir können etwas falsch oder richtig machen. Und das soll dann auch noch eine Gnade sein. Oder ist es vielleicht ein Fluch?

Noch eine andere Sache verstehe ich nicht. Wie kann die Natur so intelligente Dinge tun, ohne intelligent zu sein, ohne zentrale Steuerung? Das ist halt das

Wunder des Lebens, Evolution, heißt es immer. Deswegen sind manche Leute eben religiös.

Wenn die Natur aber von ganz allein so intelligent ist – wieso braucht man dann überhaupt ein Gehirn? Die Pflanzen haben keines. Trotzdem müssen sie in ihrer Lebensqualität auf erstaunlich wenig verzichten.

In den Texten dieses Heftes wird zum Beispiel beschrieben, dass Pflanzen sich bewegen können, wie der Informationsaustausch unter ihnen abläuft, welches Zeitgefühl sie haben, mit welchen raffinierten Manövern sie Schädlinge in die Irre führen oder zu sexuellen Zwecken die Biene und den Schmetterling anlocken.

Das sieht alles ziemlich clever aus und ist ohne Gehirn entstanden. Jeder Experte kann einem erklären, dass es sich dabei nicht um echte Intelligenz handelt – eine Definitionsfrage, klar. Aber es tut seinen Zweck, und eine Pflanze muss sich mit keiner einzigen dieser lästigen Intelligenznebenwirkungen herumärgeren. Sie hat weder Vergesslichkeitsprobleme noch Neurosen, noch streitet sie sich herum. Sie zieht in aller Ruhe ihr Ding durch.

Wenn ich mir das Geheimnis Natur anschau, stelle ich fest, dass es sich von einfachen, klaren, relativ leicht verständlichen und relativ leicht zu bedienenden Formen permanent weiterentwickelt hat zu komplizierten Formen, die dann nicht mehr leicht zu verstehen oder zu bedienen sind und die Nebenwirkungen haben wie Vergesslichkeit oder Neurosen.

Aus dem Einzeller, dem Regenwurm, dem Plattenspieler und dem Bleistift werden Turmfalke, Mensch, MP3-Player und Laptop. Es geht immer weiter und ist offenbar niemals rückgängig zu machen. Nie wird es mal einfacher und unkomplizierter.

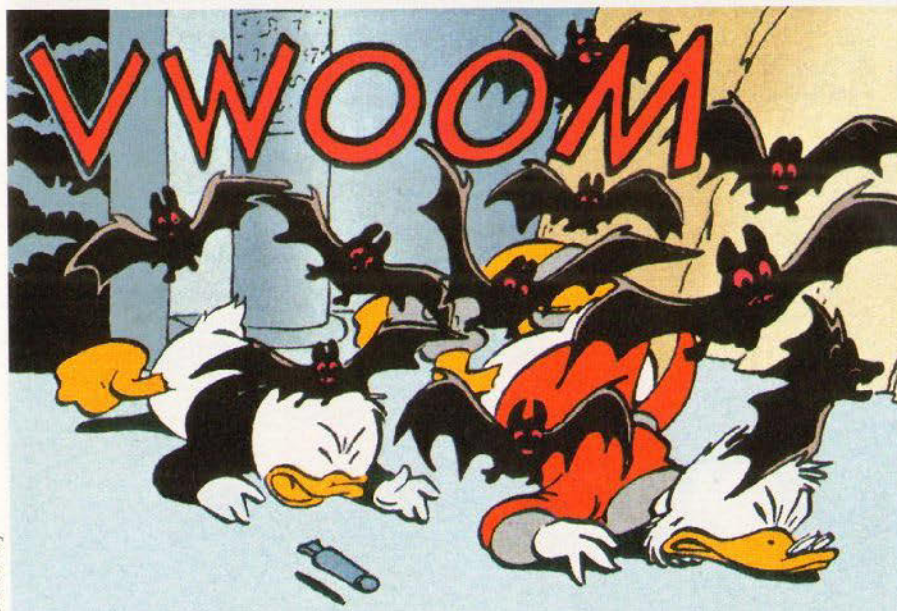
Am Ende haben wir es vermutlich mit Lebewesen und technischen Geräten zu tun, die sehr viel können, die aber nie-

mand mehr verstehen oder auch nur korrekt bedienen kann – mehr noch, sie verstehen sich selbst nicht mehr. In gewisser Weise sind sie dann wieder so dumm wie Pflanzen.

Ordnung ist das halbe Leben: Dieses altdeutsche Sprichwort scheint tatsächlich eines der zentralen Prinzipien der Natur zu beschreiben. Die Natur ist aber großzügig. Sie besteht lediglich darauf, dass Ordnung und Unordnung ungefähr im Gleichgewicht sind.

ben von der Wissenschaft wenig Ahnung. Chemie ist eh alles. Korrekt müsste es heißen: „Bei der Chemie im Essen akzeptiere ich nur Bioprodukte.“

Das Wort „eklig“ zu Beginn dieses Textes, in Bezug auf den Turmfalken und den Wühlmausurin, war vielleicht das



Ein weiteres Naturgesetz besagt, dass die Unordnung des Universums ständig zunimmt. Es muss also immer schwieriger sein, die Unordnung mit der Ordnung im Gleichgewicht zu halten, es ist genau wie bei den Kindern.

Während das Universum aber immer weiter und ununterbrochen unordentlicher wird, nimmt die Unordnung in Eigenheimen nach der Pubertät des jüngsten Kindes zum Glück wieder ab, manchmal jedenfalls.

Eines ist mir klar geworden. Menschen, die sagen: „Ich will keine Chemie im Essen! Ich lasse keine Chemie in meine Wohnung hinein!“, solche Menschen ha-

falsche Wort. Eklig ist eben auch wieder eine menschliche Kategorie. Die Natur kennt so etwas nicht.

Mit Interesse nimmt unsereins beispielsweise zur Kenntnis, dass die Verbreitung oder Vermehrung von Pflanzen weltweit zu einem hohen Prozentsatz mit Hilfe von Vogel- und Fledermausdärmen stattfindet. Die Fledermaus fliegt über eine Insel, sie muss mal ganz dringend, seriöser lässt es sich wohl nicht ausdrücken, und das auf jene Insel hinabgestürzte

Fledermausexkrement entpuppt sich als leicht glitschiger Türöffner zum Garten Eden, denn zahlreiche Samen sind in ihm enthalten. Die Schönheiten tropischer Eilande, die unsere Augen in all ihrer Farbenpracht abbilden, sind allzu oft aus Kot geboren.

Alles ist ein großes System. Alles hat seinen Sinn. Alles ist große Scheiße.

Auch die Tiere betrachte ich mit anderen Augen, seit ich mehr von ihrem Sinnenleben weiß. Fische können Musik hören. Manche Tiere riechen räumlich, das mag man sich in einer voll besetzten U-Bahn überhaupt nicht vorstellen.

Heuschrecken hören mit den Beinen. Wenn ihnen ein Lied nicht gefällt, müssten sie sich theoretisch etwas anziehen oder ihre Beine in die Erde eingraben, dazu fehlt ihnen selbstverständlich die Intelligenz. Sie hüpfen stattdessen weg. Überhaupt ist es eine Definitionsfrage, ob man sagt: „Heuschrecken hören mit den Beinen“, oder ob man sagt: „Heuschrecken besitzen Ohren, auf denen sie, wenn ihnen die Musik nicht gefällt, weghüpfen können.“

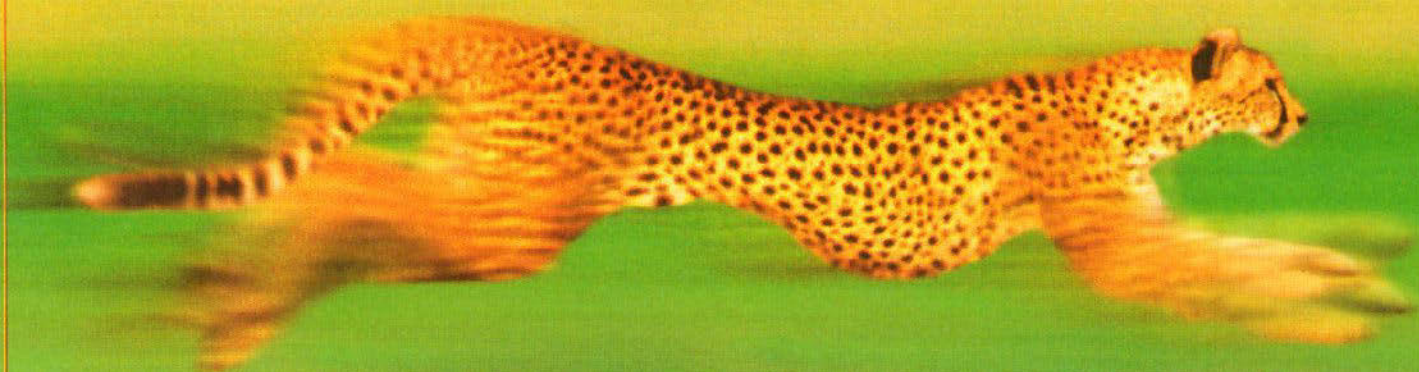
Am meisten hat man als Städter natürlich mit Hunden und Katzen zu tun. Hauskatzen sehen nur ganz schlecht Farben. Nachts sind für uns Menschen alle Katzen grau. Für die Katzen selbst wohl auch tagsüber. Hunde dagegen sehen alles blasser und dazu in Gelb-, Grün- und Blautönen. Beide sehen außerdem unscharf, verglichen mit unsereinem. Über Marilyn Monroe wurde oft gesagt, dass ihr Blick deswegen auf die Männer so sexy wirkte, weil sie kurzsichtig war und ihre Brille nicht trug. Sie blickte wahnsinnig intensiv, um überhaupt irgendwas zu sehen.

Jetzt weiß ich, dass auch der treue Blick der Hunde ein ähnliches Geheimnis birgt. Der Bernhardiner guckt gar nicht treu. Er guckt ratlos, weil er alles verschwommen sieht. □

Harald Martenstein, 52, ist Kolumnist in Berlin.

Weil Tiere im Gegensatz zu Pflanzen ihre Nahrung suchen müssen, brauchen sie ein komplexes Fortbewegungssystem. Mit Muskeln, in denen winzige molekulare Motoren arbeiten. Einem Skelett, auf das die Kraft der Muskeln übertragen wird. Und einem Nervensystem, das die Bewegungen steuert – jeweils optimiert für ein Dasein im Wasser, zu Lande oder in der Luft

Text: Rainer Harf



Mehr als 100 km/h kann ein Gepard bei der Verfolgung von Impala-Antilopen kurzfristig erreichen. Dabei helfen ihm die flexible, wie eine Feder wirkende Wirbelsäule sowie lange Gliedmaßen mit Gelenken, über welche die Muskeln hoch effizient arbeiten können.

wettlauf ums überleben



Schon einfache Formen der natürlichen Fortbewegung technisch umzusetzen, stellt Ingenieure vor große Probleme. Robotern etwa das Laufen beizubringen, ist für sie eine Herausforderung: Selbst mit enormem Aufwand lassen sich die Maschinen allenfalls vom Stolpern abhalten – graziös und schnell jedoch ist keine.

Der 1,80 Meter große Laufroboter „Johnnie“ der TU München beispielsweise braucht 17 Gelenke, die mit Gleichstrommotoren angetrieben werden; zahlreiche Sensoren, komplexe Elektronik und leistungsfähige Computer steuern seine Bewegungen. Damit erreicht „Johnnie“ eine maximale Gehgeschwindigkeit von gerade mal zwei Kilometern pro Stunde.

Im Vergleich hierzu ist die Fortbewegungsvielfalt bei Tieren eine Glanzleistung der Evolution. Geparde sprinten in schwierigstem Gelände mit einer Geschwindigkeit von 100 km/h, Fledermäuse fliegen bei völliger Dunkelheit mit extremer Wendigkeit um Hindernisse, und Haie sind so gut an ein Leben im Wasser angepasst, dass Wissenschaftler von ihrem Körperbau zu lernen versuchen: Nach dem Vorbild der Haihaut etwa haben sie Schwimmanzüge konstruiert, die den Strömungswiderstand verringern.

vögel, die in der Luft Ausschau nach Beute halten. Bewegen müssen sich Tiere auch, um Gefahren zu entkommen oder einen geeigneten Sexualpartner zu finden.

Doch wann und wie immer sich ein Tier bewegt, stets muss es drei physikalische Hindernisse überwinden: Trägheit, Reibung und Schwerkraft. Den dafür nötigen Antrieb stellen Muskeln bereit, die meist von einem komplex verschalteten Nervensystem gesteuert werden. Indem sich die Muskeln zusammenziehen, erzeugen sie Kraft, die wiederum auf bewegliche Stützen, die Skelette, übertragen wird.

Bereits vor mehr als 500 Millionen Jahren haben sich dafür zwei grundlegend verschiedene Skeletttypen entwickelt, die bis heute im Tierreich in unterschiedlichen Ausprägungen existieren: **Hydroskelette** und **Hartsubstanzskelette**.

Hydroskelette arbeiten nach dem Prinzip der Hydraulik, also der Kraftübertragung durch Flüssigkeiten. Sie finden sich etwa bei Würmern und Schnecken. Ihre Körper sind mit Flüssigkeit gefüllt und von einem Hautmuskelschlauch umgeben. Ziehen sich die Muskeln an einer bestimmten Stelle zusammen, verschiebt sich die Flüssigkeit im Körper, sodass dieser sich verformt – ähnlich wie ein mit Wasser gefüllter Ballon, der an einer Seite zusammengepresst wird und sich an der anderen Seite ausbeult. Da zum Beispiel Würmer an der Körperoberfläche Borsten

Außenskelette aus Chitin besitzen, die ihre Körper wie Ritterrüstungen umhüllen, oder ob sie wie die Wirbeltiere knöcherne und knorpelige **Innenskelette** ausbilden: Stets überspannen Muskeln die Gelenke und sind über elastische Sehnen mit den Skeletteilen verbunden. So können diese gegeneinander bewegt werden.

DIE MUSKEL-SKELETT-SYSTEME haben sich zunächst im Ozean entwickelt und den Eigenschaften des Wassers angepasst. Dessen Dichte entspricht in etwa jener des Tierkörpers, was dazu führt, dass ein schwimmendes Tier vom umgebenden Medium gestützt wird. Es schwebt förmlich im Wasser, sodass die Schwerkraft kein großes Problem ist.

Jedoch muss ein Schwimmer den Strömungswiderstand überwinden. Dieser hängt ab von der Geschwindigkeit der Fortbewegung, der Dichte und Viskosität des Wassers sowie von der so genannten „wirksamen Fläche“, die der Schwimmer dem Wasser entgegensetzt. Um den Strömungswiderstand zu minimieren, haben schnelle Schwimmer aus den unterschiedlichsten Tiergruppen – etwa Seehunde, Mako-Haie, Delfine oder Tunfische – über Jahrmillionen in einer evolutionären Parallelentwicklung (**Konvergenz**) unabhängig voneinander stromlinienförmige Körper entwickelt.

Diese laufen ähnlich wie Spindeln vorn und hinten spitz zu, sodass die Flüssigkeit dicht an ihnen entlangströmt – bremssende Wasserwirbel entstehen kaum. Daher kann ein solcher Körper ohne großen Energieverlust durchs Wasser gleiten.

Indem die Tiere mit ihren Flossen schlagen, drängen sie Wasser nach hinten und erzeugen den für die Fortbewegung nötigen Schub. Und der kann zusammen mit der passenden Stromlinienform zu beachtlichen Geschwindigkeiten führen: Der Segelfisch etwa durchschneidet, angetrieben durch den Schlag seiner großen, sichelartigen Schwanzflosse, das Wasser mit bis zu 100 km/h.

Die Schwimmer haben es zu einer Vielfalt von Bewegungsformen gebracht, die Ingenieure fasziniert: Mantarochen fliegen mit ihren weit ausladenden Flossen förmlich durch das Meer, Muränen schlängeln sich elegant durch das Wasser. Und wieder andere Tiere wie etwa

krebse tragen ihr skelett außen – wie eine rüstung

Die autonome Bewegung eines Individuums von einem bestimmten Ort zu einem anderen – die **Lokomotion** – ist ein Grundmerkmal aller Tiere. Im Gegensatz zu Pflanzen können sie das Sonnenlicht nicht zum Aufbau körpereigener Substanzen nutzen, müssen also nach Nahrung suchen. Wildschweine etwa, die den Waldboden nach nahrhaften Knollen durchstöbern; Feldmäuse, die auf Äckern nach Kräutern und Samen suchen; Greif-

ausgeprägt haben, die ihnen als Widerhaken dienen, können sie sich so über den Boden robben oder schlängeln. Schnecken nutzen Schleim anstelle von Borsten.

Ganz anders die starren Hartsubstanzskelette aus Chitin oder Knochen: Deren Einzelelemente stehen – so die Glieder eines Insektenbeins – über Gelenke miteinander in Verbindung.

Und gleichgültig, ob Tiere nun wie die Krebse, Insekten, Spinnen und Skorpione

Quallen oder Tintenfische setzen bei der Erzeugung der Schubkraft auf ein anderes Prinzip: den Rückstoß.

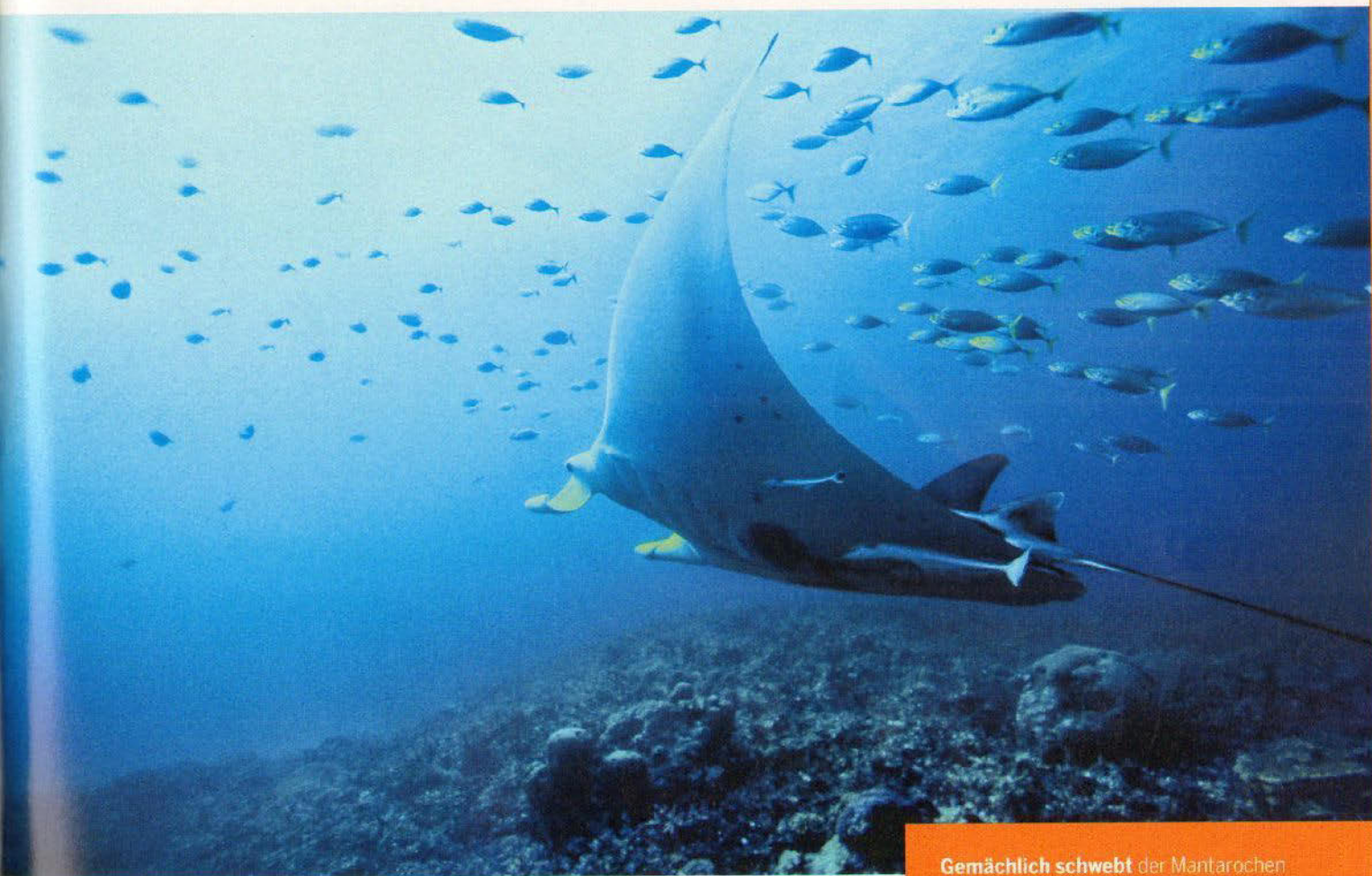
Hierfür pressen die Tintenfische mithilfe einer kräftigen Muskulatur Wasser aus ihrer Atemhöhle durch eine trichterartige Öffnung nach außen. Der entstehende Impuls katapultiert sie förmlich voran; auf diese Weise schießen Riesenkalmare mit bis zu 40 km/h durch das Wasser – elf Meter pro Sekunde schnell.

Auch die Haut des Tümmers begeistert Techniker. Sie ist elastisch und besteht aus mehreren Schichten schwammartigen Gewebes. So gibt sie Turbulenzen und Wirbeln des Wassers nach und reduziert die Bremswirkung.

IM VERGLEICH ZUM WASSER setzt die Atmosphäre auf der Erde der Bewegung wenig Trägheit und Reibungswiderstand entgegen. Als sich einige im Wasser le-

Nattern oder Vipern etwa, die die Wirbel des Rückgrats durch Muskelkraft verschieben und ihren Körper gegen die Reibung des Bodens schlängelnd oder schiebend fortbewegen.

Bei Tieren mit Beinen sind die Teile der Extremitäten stets über Gelenke miteinander verbunden: Sie dienen als Drehpunkte, um die ein Skelettteil gegen ein anderes bewegt wird. Die Entfernungen zwischen diesen Drehpunkten und den



Die Körper vieler Meerestiere sind derart strömungsoptimiert gebaut, dass Techniker sie zum Vorbild nehmen: Der Nasenbuckel eines Tümmers beispielsweise teilt das Wasser so, dass auch hohe Geschwindigkeiten mit wenig Energieaufwand möglich sind.

Der Wulst am Bug mancher Schiffe ähnelt deshalb der Schnauzenform des Tümmers und setzt den Strömungswiderstand so weit herab, dass bis zu einem Viertel des Treibstoffs eingespart werden kann.

bennde Tierarten vor rund 400 Millionen Jahren an Land begaben, mussten sie aber ein anderes Hindernis überwinden: die Schwerkraft. Die allermeisten Tiere haben zu diesem Zweck Gliedmaßen entwickelt. Diese können Kraft auf den Untergrund ausüben und damit den Tierkörper heben und in Bewegung setzen.

Tausendfüßer etwa koordinieren bis zu 700 Beine, Spinnen laufen auf acht, die meisten Insekten nutzen sechs und fast alle Säugetiere vier Beine. Manche Tiere kommen auch ganz ohne Beine aus:

Gemächlich schwebt der Mantarochen durchs Meer und filtert Kleinstlebewesen aus dem Wasser. Da dieses ihn trägt, müssen die Flossen den Körper lediglich vorantreiben

Enden der Glieder – wie etwa zwischen Ferse und Zehen – sind bei unterschiedlich schnellen Läufers verschieden groß.

Den Geschwindigkeitsrekord zu Land hält der Gepard: Dazu verhilft ihm neben seinem schlanken, leichten Körper und den langen Beinen seine biegsame Wirbelsäule, die beim Laufen wie eine Feder wirkt. Seine Krallen und harten Sohlen geben ihm

eine ausgezeichnete Bodenhaftung. Bereits nach zwei Sekunden erreicht er eine Geschwindigkeit von 60 km/h. Er beschleunigt damit schneller als beispielsweise ein Sportwagen wie der legendäre Aston Martin DB4 GT, Baujahr 63.

Kurzzeitig kann der Gepard auf über 100 km/h beschleunigen. In dieser Phase berührt jede seiner Pfoten den Boden dreimal in der Sekunde. Diese Spitzengeschwindigkeit hält er jedoch nur we-

Bedächtigkeit. Es ahmt zur Tarnung nicht nur die Form und Farbe von Laub nach, sondern auch dessen Bewegung: wenn beispielsweise der Zweig, auf dem es sitzt, erschüttert wird, wippt es wie ein Blatt hin und her und kann von der umgebenden Vegetation kaum unterschieden werden.

Tierarten wie Antilopen und Pferde wiederum versuchen, ihren Feinden zu entkommen, indem sie über einen längeren Zeitraum ausdauernd laufen. Dafür

wenig Arbeit verrichten – die Sehnen sparen dem Muskel bei jedem Sprung zwischen 60 und 96 Prozent der geleisteten Arbeit. Wissenschaftler haben versucht, das Bewegungsmodell der Kängurus technisch zu nutzen – und nach dem Prinzip „Stoßdämpfung mit nachfolgendem Katapulteffekt“ Spezialaufhängungen von Schuhsohlen konzipiert, die Sportlern ein ermüdungsarmes Laufen ermöglichen sollen.



Die gewölbte Fläche des Fledermausflügels lenkt den Luftstrom so, dass Auftrieb entsteht. Ihre Manövrierkünste erlauben den Tieren den Beutefang und sogar das Trinken während des Fluges

nige hundert Meter – sein Sprint verbraucht enorm viel Kraft.

Daneben gibt es auch Tiere, die auf Langsamkeit setzen. Die spart im Kampf ums Überleben Energie und bietet manchmal sogar einen wirkungsvollen Schutz vor Fressfeinden. Das Faultier etwa bewegt sich derart gemächlich, dass es kaum bemerkt wird und so den Angriff etwa eines Adlers vermeidet.

Auch das „Wandelnde Blatt“, eine südostasiatische Schreckenart, setzt auf

haben sie lange Sehnen entwickelt, die als elastische Zugseile dienen. Wie Gummibänder speichern die Sehnen in einer bestimmten Bewegungsphase Energie – etwa wenn sie bei einem Schritt gedehnt werden – und geben diese in einer zweiten Phase ohne großen Verlust wieder ab, indem sie elastisch zurückschwingen.

Besonders ausgeklügelt ist die Sehnenkonstruktion bei Wallabys, kleinen Känguru-Verwandten: Sobald diese Tiere hüpfen, müssen die Muskeln nur noch

Auch Affen, Hasen, Frösche und Heuschrecken hüpfen – sei es, um Hindernisse zu überwinden, Beute zu erhaschen oder sich schnell in Sicherheit zu bringen. Bemerkenswerte Leistungen vollbringen dabei Flöhe. Die etwa 1,5 Millimeter großen Tiere können das Hundertfache ihrer Körpergröße überspringen – ein durch-

schnittlich großer Mensch müsste aus dem Stand knapp 180 Meter in die Luft schießen, um das Gleiche zu erreichen.

Die enorme Beschleunigung, die für diese Leistung notwendig ist, wird nicht nur durch Muskeln erreicht. Flöhe verfügen über ein besonderes Hilfsmittel: In ihren Hinterbeinen befindet sich eine Art Katapult aus dem hoch elastischen Eiweiß Resilin. Es ist ähnlich verformbar wie Gummi. Durch relativ langsame Muskelbewegungen kann das Resilin komprimiert werden und Energie speichern. Sobald der Floh zum Sprung ansetzt, entspannen sich die Fasern und lassen ihn schlagartig in die Höhe schnellen.

EINIGE ORGANISMEN haben vor mindestens 150 Millionen Jahren sogar den Sprung in ein drittes Medium geschafft: die Luft. Flugfähige Tiere können weite Entfernungen zurücklegen, Hindernisse wie Wüsten und Ozeane überwinden und sich Nahrungsressourcen erschließen, die zu Fuß nicht erreichbar wären.

Doch um einen verhältnismäßig dichten Körper in die dünnen Lüfte zu schwingen, muss ein Tier aerodynamisch gebaut sein und vor allem wie ein Flugzeug genug Auftrieb erzeugen – nach dem Prinzip der Impulserhaltung (siehe GEO kompakt Nr. 3). Fledermäuse etwa besitzen eine elastische und muskulöse Flughaut, gehalten von den verlängerten Vorderbeinen und fünf Fingern, von denen drei extrem lang sind. Die Muskeln in dieser Haut helfen dem Fledertier beim Zusammenfallen der Flügel und bei der Einstellung der Flügelwölbung während des Fluges.

Ein hoch bewegliches Schulterskelett macht Fledermäuse zudem sehr wendig: Sie können rasch beschleunigen und abbremsen, fast senkrecht aufsteigen, auf der Stelle rütteln und mit Spitzengeschwindigkeiten von über 90 km/h durch die Luft schießen.

Während die Flügelflächen der Fledermäuse aus lebendem Gewebe aufgebaut sind, bestehen Vogelflügel zum großen Teil aus Federn – sehr leichten Gebilden aus toten Zellen, die der Bildung der Tragflächen und der Steuerung beim Flug dienen. Die Funktionsweise mancher Vogelflügel interessiert auch Flugzeugingenieure. Denn selbst bei Sturm und starken Turbulenzen vermö-

gen etwa viele Möwen sicher zu fliegen und zu landen. Ihre Schwingen sind nicht starr wie die Flügel von Passagierflugzeugen, sondern flexibel und passen sich den jeweiligen Windverhältnissen an – so richten sich bei fehlendem oder schwindendem Auftrieb Deckfedern der Flügeloberfläche auf und stabilisieren auf komplexe Weise den Flug.

Ein weiteres biologisches Konstruktionsmerkmal einiger Vogelflügel hat bereits Anwendung in der Flugzeugtechnik gefunden: Die aufgespreizten Schwingen der Geier und Adler reduzieren unter anderem große Turbulenzen, die an den Flügelenden entstehen, indem sie diese in viele kleine Wirbel zerlegen. Das inspirierte Ingenieure zu schräg nach oben angewinkelten Tragflächenenden, die den Strömungswiderstand in der Luft erheblich verringern.

Die Anpassung an ein Leben in der Luft zeigt sich bei Vögeln auch in der Leichtbauweise ihrer Knochen: Sie enthalten zahlreiche Hohlräume, die mit Luft gefüllt sind und das Gewicht der Knochen enorm reduzieren.

Die Masse eines Taubenskeletts etwa macht nur 4,4 Prozent ihres Gesamtgewichtes aus, beim Menschen sind es

als Brennstoff theoretisch bis zu 400 Kilometer weit fliegen könnte. Das entspräche einer Flugzeit von sieben Stunden.

Die stete Anpassung an das Medium Luft hat bei einer Vogelart zu erstaunlichen Leistungen geführt: Der Mauersegler verbringt beinahe sein gesamtes Leben in der Luft. Der schwalbengroße Vogel erreicht Fluggeschwindigkeiten von bis zu 180 km/h. Jedes Jahr legt er schätzungsweise 190 000 Kilometer zurück, frisst, schläft und paart sich in der Luft, landet monatelang nicht.

Lediglich zum Brüten muss der Mauersegler zurück zur Erde – und dort mit einem Nachteil leben, den die Spezialisierung mit sich gebracht hat: Laufen kann er kaum. Mit seinen winzigen, schwieligen Füßen ist er gerade noch fähig, sich an Wänden festzuklammern.

Biologen haben ihm daher den Namen *Apus apus* verliehen, „der Fußlose“.

EINES DER WENIGEN TIERE, die sich alle drei Lebensräume erschlossen haben, ist der Flugfrosch. Dieser in den Urwäldern Borneos lebende Lurch kann klettern, hüpfen und schwimmen und hat sich im Laufe der Evolution sogar in die Lüfte begeben. Mithilfe seiner riesigen Schwimmhäute,

die sehnern speichern energie – und geben sie zurück

durchschnittlich 15 Prozent. Das Skelett eines Fregattvogels wiegt nur etwas über 100 Gramm und damit weniger als sein Federkleid – bei einer Spannweite von immerhin zwei Metern.

Demgegenüber ist die Flugmuskulatur vieler Vögel verhältnismäßig massig. Die Muskeln eines durchschnittlich 540 Gramm schweren Waldkauzes wiegen über 300 Gramm, Federn und Skelett zusammen nur knapp 100 Gramm. Auch der Stoffwechsel der Vögel ist optimal ans Fliegen angepasst: Biologen haben berechnet, dass eine 400 Gramm schwere Taube mit lediglich 37 Gramm Körperfett

die er wie Fallschirme ausbreiten kann, segelt er bei Gefahr von einem Baum bis zu 50 Meter weit zu Boden. Dabei kann er wie ein Gleitschirmpilot lenken und einen flachen und sanften Landeanflug zuwege bringen.

Doch einmal auf der Erde angekommen, ist der Flugfrosch nicht in der Lage, wieder in die Höhe zu fliegen. Den beschwerlichen Aufstieg ins schützende Geäst der Urwaldbäume muss er zu Fuß erledigen. □

Rainer Harf, 29, untersucht im Rahmen seiner Doktorarbeit Kleinsäuger im südlichen Afrika. Er ist einer der wissenschaftlichen Berater dieses Heftes.

der lange marsch: weshalb tiere wandern

Jedes Jahr machen sich Abermilliarden Tiere auf, ihre angestammten Lebensräume zu verlassen: Insgesamt bis zu 10 000 Arten, so schätzen Biologen, „wandern“ und legen dabei oft mehrere tausend Kilometer zurück. Den Bewegungen liegen verschiedene Überlebensstrategien zugrunde. Manche Spezies der gemäßigten Breiten ziehen im Herbst in wärmere Zonen, um dem Frost zu entgehen. Monarchfalter fliegen etwa aus dem Osten der USA und Kanadas bis nach Kalifornien oder Mexiko in Winterquartiere.

Andere Tierarten weichen bei Überbevölkerung in neue Gebiete aus: Lemminge oder Wanderheuschrecken vermehren sich in manchen Jahren so rasant, dass sie in Massen aufbrechen, um der Konkurrenz um Nahrung auszuweichen. Aale, Lachse, viele andere Fische, Albatrosse und Meeresschildkröten dagegen wandern millionenfach und synchron zu einem Treffpunkt, um sich zu paaren und Eier zu legen.

Atlantische Lachse etwa schlüpfen in Flüssen Europas und Nordamerikas, ziehen nach Erreichen einer Größe von knapp 15 Zentimetern dann ins Meer und kehren nach einem bis drei Jahren im Meer in den Oberlauf jener Flüsse zurück, in denen sie aufgewachsen sind. Mit erstaunlicher Präzision finden sie den bis zu 4000 Kilometer langen Weg: Biologen nehmen an, dass ihnen Störungen im Erdmagnetfeld als Orientierung dienen und dass sie sich an den Geruch ihres Ursprungsflusses erinnern können; die spezifische Mischung der Moleküle ermitteln sie mit ihrem feinen Geruchssinn auch noch in geringsten Konzentrationen. Unterwegs verlieren sie etwa ein Viertel ihres Körpergewichts, nach dem Laichen sterben viele der Lachse bald an Erschöpfung.

Wie sich diese Wanderungen im Laufe der Evolution entwickelt und welche Ursachen sie haben, ist bisher kaum bekannt. Vielleicht unternehmen die Lachse die Kräfte zehrende Reise, weil sie in den Flüssen viel öfter als im Meer den kieseligen Untergrund finden, den sie zum Laichen brauchen. Flüsse bieten den Lachsen zudem mehr Ver-



Monarchfalter finden auch bei bedecktem Himmel den Weg nach Mexiko oder Kalifornien, wo sie überwintern



Küstenseeschwalben fliegen jedes Jahr von der Arktis in die Antarktis und zurück: mindestens 34 000 Kilometer



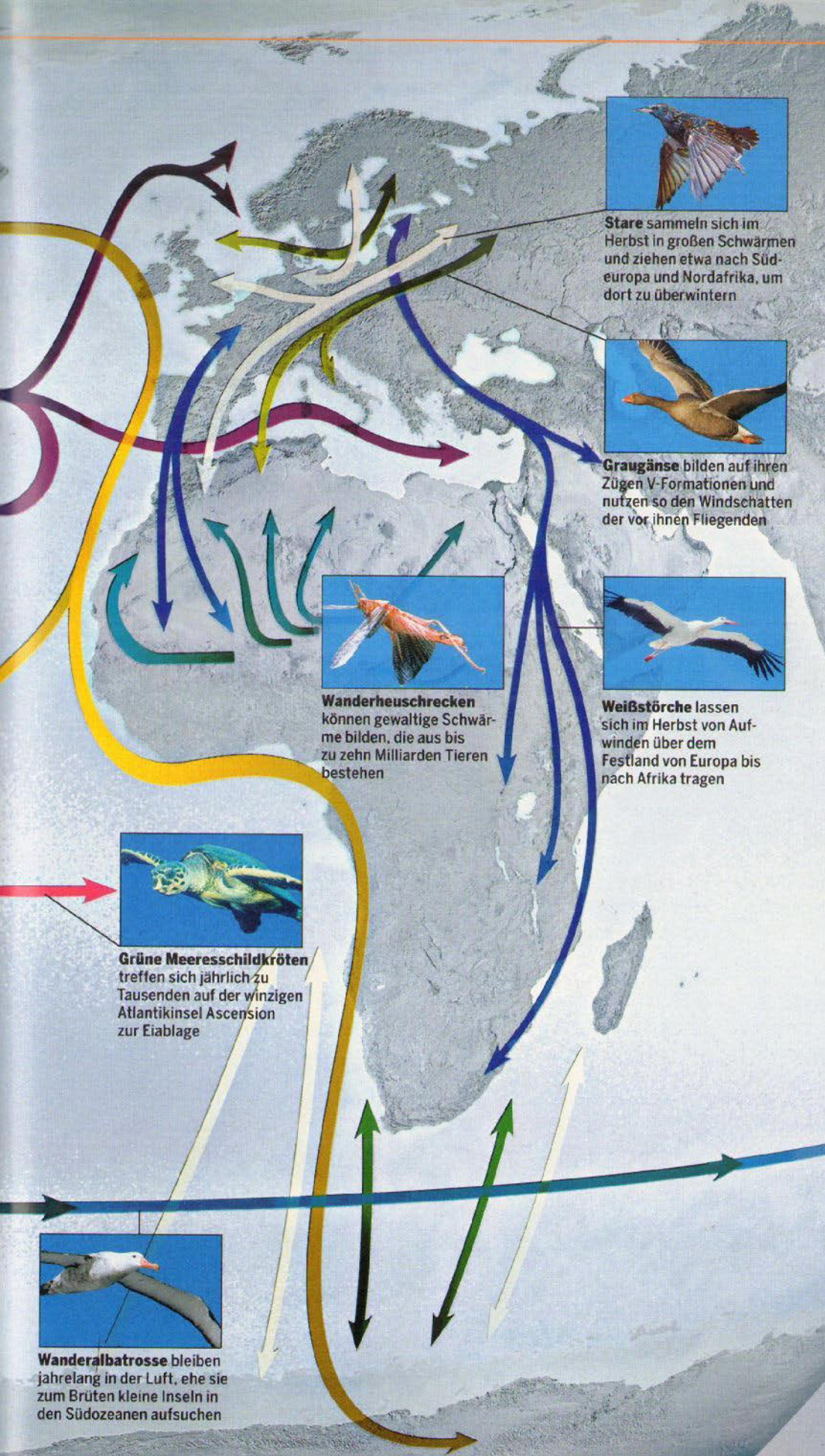
Bartenwale wie Süd- und Nordkaper (siehe auch Nordamerika und Südafrika) suchen im Sommer die fisch- und krillreichen Polarmeere auf



Europäische Aale ziehen von den Flüssen bis ins Sargasso-Meer, dort laichen sie; nur der Nachwuchs kehrt zurück



Buckelwale wandern von den nahrungsreichen Polregionen zum Kalben in die Tropen (siehe auch Südamerika und Südafrika)



Stare sammeln sich im Herbst in großen Schwärmen und ziehen etwa nach Südeuropa und Nordafrika, um dort zu überwintern



Graugänse bilden auf ihren Zügen V-Formationen und nutzen so den Windschatten der vor ihnen Fliegenden



Weißstörche lassen sich im Herbst von Aufwinden über dem Festland von Europa bis nach Afrika tragen



Wanderheuschrecken können gewaltige Schwärme bilden, die aus bis zu zehn Milliarden Tieren bestehen



Grüne Meeresschildkröten treffen sich jährlich zu Tausenden auf der winzigen Atlantikinsel Ascension zur Eiablage



Wanderalbatrosse bleiben jahrelang in der Luft, ehe sie zum Brüten kleine Inseln in den Südozeanen aufsuchen

stecke, und womöglich ist dort die Gefahr durch Fressfeinde geringer.

Viele Tiere erschließen sich durch ihre Wanderungen nicht nur Nahrungsressourcen, sondern bringen ihre Nachkommen dadurch auch unter günstigeren Bedingungen zur Welt: Bartenwale, Gnus oder Zugvögel wechseln deshalb mit den Jahreszeiten ihren Lebensraum. Am besten erforscht ist das Verhalten der Zugvögel, zu denen mehr als die Hälfte aller bekannten Vogelarten zählen. Ornithologen haben über die Beringung zigtausender Tiere viele Routen nachverfolgen können. Darüber hinaus nutzen Wissenschaftler winzige Sender, um einzelne Vögel zu markieren und mithilfe von Satelliten auf ihrem Zug über Jahre hinweg kontinuierlich zu beobachten.

So ist bisher bekannt geworden, dass bei vielen Arten die Informationen über die ungefähren Routen in den Genen gespeichert sind – dennoch probieren sie in manchen Jahren neue Wege aus und verbessern durch die Erfahrungen ihre Zugrouten. Auf ihren Wanderungen orientieren sie sich an Gebirgszügen oder Flussläufen, am Stand der Sonne oder dem Sternbild. Mit speziellen Sensoren erfassen sie sogar das Erdmagnetfeld – Rotkehlchen etwa haben dafür einen mikroskopisch kleinen Kompass im rechten Auge entwickelt.

Viele Zugvögel aus Nordeuropa fliegen in die immer gleichen Grasland- und Feuchtgebiete Afrikas, in denen sie nach der Regenzeit dann reichlich Nahrung finden. Dort verbringen sie den Winter und ziehen im Frühjahr nach Norden zurück, wo sie nisten – und über die Sommermonate genügend Futter für ihre Brut finden. Die Flüge kosten jedoch enorm viel Kraft: Zugvögel verbrauchen nicht nur ihre gesamten Fettdepots, sondern wandeln unterwegs auch bis zur Hälfte der Leber sowie 20 Prozent ihrer Muskeln in den Flügeln, den Beinen und im Herzen in Bewegungsenergie um – und verbrennen zudem bis zur Hälfte ihres Gedärms. □

Götz Froeschke, 29, ist Biologe und war auch als wissenschaftlicher Berater an dieser Ausgabe von GEO kompakt beteiligt.

Flora mobil

Sie besitzen keine Muskeln und bewegen sich doch: Pflanzen richten sich nach der Sonne aus, treiben Wurzeln durch den Boden oder schießen Pollen in die Luft – mit ihren eigenen, ganz speziellen Mechanismen

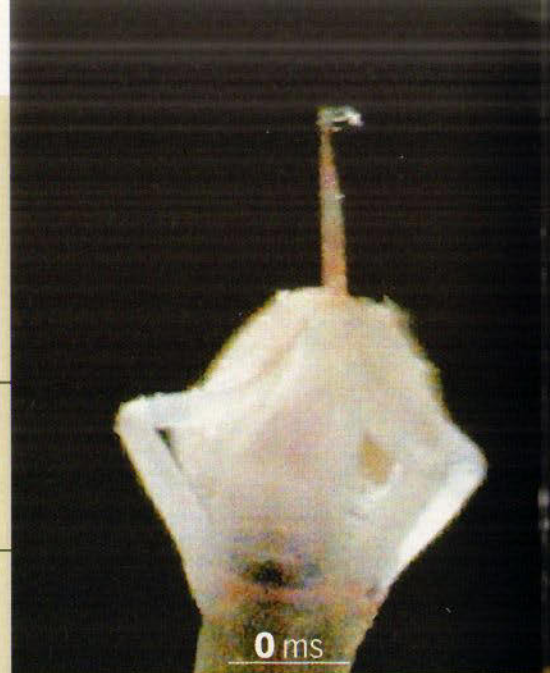
Text: Klaus Wilhelm

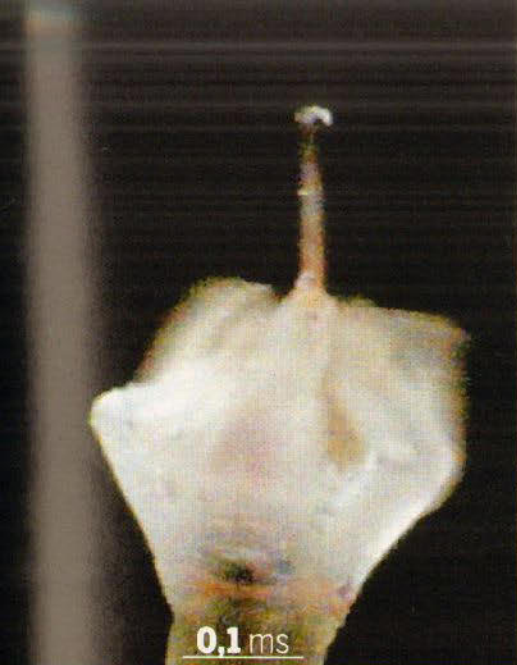
Zwei Wochen lang hielt die Bohne die Bewegungslosigkeit durch – dann ging sie zugrunde. *Sesbania exaltata* zählt zu jenen Pflanzen, die allabendlich ihre Blätter langsam senken und schließen, um sie morgens wieder anzuheben und zu öffnen. Sie gehen regelrecht schlafen. Doch genau jene biochemische Maschinerie, die diese Blattbewegungen und damit die nächtliche Ruhe steuert, hatten japanische Chemiker bei *Sesbania* in einem Versuch ausgeschaltet – mit fatalen Folgen für das Gewächs. Damit beweist der erste dokumentierte Todesfall durch Lähmung bei einer Bohne, wie lebenswichtig Bewegungen auch in der Welt der Pflanzen sind.

Tatsächlich sind Gewächse alles andere als starr und reglos. Ob Spinat, Rose oder Eiche: Pflanzen bewegen Teile ihrer Körper wie etwa Blätter, Fortpflanzungsorgane oder Samen fast immer und überall, meist langsam und unmerklich, manchmal auch schnell und spektakulär. Dazu haben sie erstaunliche Techniken entwickelt, mit denen sie sich variantenreich drehen, wenden, ausdehnen, kriechen oder etwa Samen abfeuern. Botaniker unterscheiden:

- nicht umkehrbare Wachstumsbewegungen. Sie erfolgen, indem sich das Zellvolumen durch Wasseraufnahme vergrößert und wächst oder wenn etwa im Spross oder in der Wurzel neue Zellen gebildet werden. Auch das Öffnen und Schließen von Blüten etwa der Tulpe geschieht, indem die Zellen an Blütenblattunterseite und -oberseite unterschiedlich schnell wachsen. Ebenfalls durch Wachstumsbewegungen folgen die Blütenstände junger Sonnenblumen dem Gang der Sonne.
- rein physikalische Bewegungen. Zu ihnen kommt es, ohne dass Zellen aktiv am Mechanismus beteiligt sind. Etwa wenn Farne ihre Sporen abfeuern oder die Samenkapsel des Storchschnabels regelrecht explodiert (siehe Seite 32).
- **Turgorbewegungen.** Sie entstehen, wenn im Inneren bestimmter Zellen der Druck durch Flüssigkeitsaufnahme erhöht oder durch -abnahme vermindert wird. Dieser Mechanismus ähnelt dem in einem Gartenschlauch, der sich unter hohem Druck spannt und bei niedrigem Druck erschlafft. Diese bei Pflanzen weit verbreitete Art der Bewegung ist meist reversibel und verbraucht Energie.

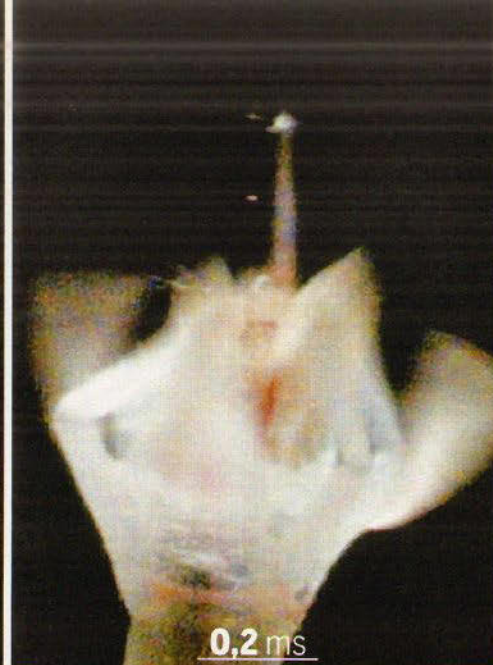
Mit Turgorbewegungen geht zum Beispiel *Sesbania exaltata* schlafen. Wie viele andere Pflanzen besitzt sie spezielle Blattgelenke (**Pulvini**), durch die sie ihre Blätter absenken kann. Diese oft verdickten und zylindrisch geformten motorischen Gewebe befinden sich etwa dort, wo das Blatt mit seinem Stiel am





0,1 ms

>>>



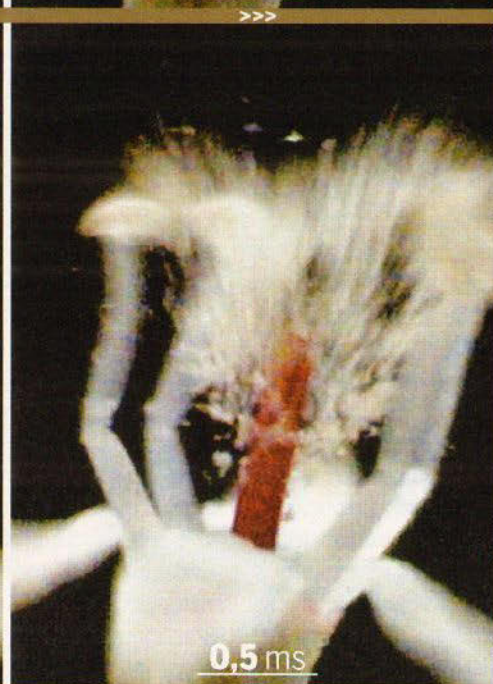
0,2 ms

>>>



0,4 ms

>>>



0,5 ms

>>>



0,8 ms

>>>



1 ms

Spross verankert ist. Sie erlauben, ähnlich wie ein Scharnier, Auf- und Abwärtsbewegungen des Blattes.

In den Pulvini sitzen „motorische Zellen“, deren **Turgordruck** die Pflanze verändern kann. Pumpt sie Wasser in die an der Unterseite eines Pulvinus befindlichen Zellen, schwillt das Gelenk an, und die Blätter heben sich. Strömt das Wasser hingegen in die oberen motorischen Zellen – während die unteren gleichzeitig erschlaffen –, dann senken sich Blattstiele und Blätter.

Der Turgordruck ist in den meisten Pflanzenzellen zu beobachten. Wenn sich dieser innere Wasserdruck nicht aufrechterhalten lässt, welkt ein Gewächs.

Wird eine Pflanzenzelle aber über die **Leitbündel** in Stängel und Blättern ausreichend mit Wasser versorgt, baut sich in ihrem Inneren Druck auf. Die Ursache dafür sind **osmotische Kräfte** (siehe Seite 104): Weil sich im Inneren der Zelle eine hohe Konzentration an gelösten Substanzen befindet – etwa an Kalium- und Chloridionen –, werden zusätzliche Was-

WIE EIN KATAPULT schleudern die Blüten des Kanadischen Hartriegels ihren Pollen in die Höhe – das zeigen diese Aufnahmen einer Hochgeschwindigkeitskamera. Innerhalb einer Tausendstelsekunde (1 ms) öffnet sich die Blüte und schnellen die eingezwängten, unter Spannung stehenden Staubblätter empor, die in 0,3 ms eine Geschwindigkeit von drei Metern pro Sekunde erreichen – das entspricht der 2400fachen Erdbeschleunigung. Der Pollen wird bis zu 22 Zentimeter weit geschossen. Ausgelöst wird diese Explosion etwa von Insekten, die sich auf der Blüte niederlassen. Sie werden dabei regelrecht mit Pollen eingestäubt und tragen ihn anschließend zu anderen Blüten

sermoleküle gleichsam ins Zellinnere gesaugt, um so den Konzentrationsunterschied zu verringern.

Dieser Konzentrationsausgleich erfolgt nach dem Prinzip der **Osmose** stets ausschließlich in eine Richtung, da nur kleinere Moleküle wie etwa Wasser frei die winzigen Öffnungen in der Zellmembran passieren können. Die gelösten Substanzen im Inneren der Zelle dagegen bleiben dort gefangen. Dadurch, dass sich die Zelle nun immer weiter mit Wasser füllt, entsteht ein Druck, der von innen auf die gleichermaßen feste wie elastische Zellwand wirkt – der Turgor.

Wie aber verändert die Pflanze den Turgordruck in den Motorzellen der Blattgelenke? In den dortigen Zellwänden können – gesteuert über komplexe biochemische Signalketten – Kanäle geöffnet werden, sodass die Chlorid- und Kaliumionen aus dem Zellinneren nach außen strömen. Das führt dazu, dass sich auch der osmotisch bedingte Konzentrationsausgleich umkehrt: Wasser fließt nun aus den Motorzellen in die umgebenden Zellen – und die Blattgelenke erschlaffen.

Umgekehrt können die Motorzellen die Ionen auch wieder aktiv aufnehmen, mit dem Effekt, dass das Wasser erneut in die Zellen strömt: Der Turgordruck nimmt wieder zu.

Doch nicht nur für die Nachtruhe nutzen die Gewächse Turgoränderungen. Fast alle Pflanzen steuern damit auch die Schließzellen ihrer **Spaltöffnungen**, die sich meist auf der Blattunterseite befinden (siehe Seite 66).

Diese wie ein Kussmund aussehenden Strukturen regulieren zum einen die Verdunstung und verhindern so unter anderem, dass die Blätter in Trockenphasen zu viel Wasser verlieren. Andererseits tritt durch sie Kohlendioxid in das Blatt ein, aus dem die Gewächse während der **Photosynthese** mithilfe von Wasser und der Energie des Sonnenlichtes Zucker herstellen.

Zudem richten Pflanzen über Turgorbewegungen ihre Blätter nach der Sonne aus, um möglichst viel Licht aufzufangen. „Sonnenverfolger“ wie die Lupine spreizen ihre Blätter wie das Rad eines Pfaus und drehen sich nach der Bahn der Sonne. Schon in der Nacht kehren sie zur morgendlichen Startposition zurück. Umgekehrt nutzt beispielsweise der am Waldboden wachsende Sauerklee, eine extreme Schattenpflanze,

wohl die Blätter als auch die Schließzellen der Spaltöffnungen bewegen sich beispielsweise abhängig vom einfallenden Sonnenlicht – biochemisch reguliert von bestimmten Molekülen, die den blauen Anteil des Lichtspektrums auffangen. Sie heißen **Phototropine** und reagieren auf die jeweilige Lichtstärke.

Meist laufen Turgorbewegungen in einigen Minuten oder Stunden ab. Doch bei manchen Pflanzen geschieht das viel schneller – die Blätter der Mimose etwa können sich von einer Sekunde auf die andere schließen.

Der Grund: In der Mimose wandern nach einem Reiz neben den biochemischen Signalen auch elektrische Ströme an den Membranen der Zellen entlang zum motorischen Gewebe. Sie beschleunigen die Reaktionszeit bis zur Turgorbewegung erheblich. Wie die elektrische Signalleitung genau funktioniert, ist allerdings noch nicht bekannt.

Möglicherweise schließt die Mimose ihre Blätter, um sich vor Fressfeinden zu schützen. Dabei reagiert sie auf einen *mechanischen* Reiz, wenn sie zum Beispiel von Tieren berührt wird. Starker Wind oder heftiger Regen können ebenfalls als Auslöser wirken.

Auch wenn die Venusfliegenfalle zuschnappt, um Insekten zu fangen, rasen elektrische Impulse durch ihre beiden fleischigen Blätter. Diese sehen aus wie zwei verkehrt aneinander gelegte Muschelhälften und sind an ihren Innenseiten mit je drei hoch empfindlichen Borsten ausgestattet. Spaziert ein Insekt darüber und berührt in kürzester Zeit zwei der Fühler, beginnt der Strom in das Motorgewebe zu wandern.

Sofort wird in den beiden Blättern über Turgormechanismen Wasser „verschoben“, um die konvexen – nach außen gewölbten – Blätter zu verformen. An einem bestimmten Punkt nun klappen sie innerhalb einer Zehntelsekunde von konvex zu konkav um – denn sie enthalten aufgestaute elastische Energie, welche die Pflanze lange zuvor beim Öffnen der Falle in den Blättern gespeichert hat.

AUSSCHLIESSLICH PHYSIKALISCHE BEWEGUNGEN nutzen Gewächse vor allem, um ihre Pollenkörner, Samen und Früchte effektiv zu verbreiten. Den Tempo-Weltrekord hält dabei der

Mithilfe von »Motorzellen« kann die Pflanze den Druck in bestimmten Gelenkbereichen verändern und so ihre Blätter nach dem Licht ausrichten

die Turgorbewegungen, um bei plötzlich einfallenden Sonnenstrahlen die Blätter einzuklappen, damit sie nicht überhitzen.

VERSCHIEDENE ÄUSSERLICHE REIZE können Bewegungen bei Pflanzen auslösen – etwa Berührungen oder Erschütterungen sowie Temperatur- und vor allem Lichtveränderungen. So-

Kanadische Hartriegel – eine winzige Pflanze in der nordamerikanischen Taiga. Innerhalb einer Tausendstelsekunde öffnet dieses Kraut seine geschlossenen Blütenblätter, gibt die männlichen Fortpflanzungsorgane (Staubblätter) explosionsartig frei und schleudert den an ihnen befestigten Pollen heraus. Dabei werden die Staubblätter auf eine Geschwindigkeit von



BEI LEICHTER BERÜHRUNG

klappen die speziellen Blätter der Venusfliegenfalle zu und halten das Opfer gefangen. Ausgelöst wird der Mechanismus über Borsten, die einen elektrischen Impuls zum »Motorgewebe« leiten; die Bewegung selbst erfolgt durch eine Veränderung des so genannten Turgordrucks. Sogar ein Froschlurch kann in die Falle geraten, doch meistens sind die Opfer Insekten. Die Beute wird von der Pflanze zersetzt und liefert ihr wichtige Nährstoffe

drei Meter pro Sekunde beschleunigt – und der Pollen kann die zehnfache Höhe der Blüte erreichen.

Der erstaunliche Mechanismus beruht auf dem Druck in den Blütenbestandteilen des Hartriegels. Wie in vielen Blumen sitzt der Pollen an den Spitzen von Fäden (siehe Seite 38). Anders als üblich, wachsen diese elastischen Fäden aber gekrümmt in der Knospe, eingezwängt durch die geschlossenen Blütenblätter.

So gewinnen sie die Spannung einer Sprungfeder, die stetig mehr Energie speichert. Je weiter sich die Fäden verlängern, desto größer wird ihre Gewebespannung – bis die reifen Blütenblätter aufplatzen, die Fäden herausspringen und sich strecken und den Pollen katapultartig fortschleudern.

Die Bewegung an sich ist rein mechanischer Natur: Selbst wenn man die Pflanze in Säure taucht und sie so abtötet, öffnen sich die Blüten. Das Wurfgeschoss startet entweder automatisch, sobald die Spannung einen kritischen Wert übersteigt; dann weht der Wind den Samen auf andere Blüten. Oder ein größeres Insekt wie eine Hummel löst mit seinem Gewicht die Schleuder aus, wobei seine Körperhaare mit Pollen bepudert werden. Damit verhindert die Pflanze, dass die Tiere den Pollen fressen, statt ihn zu verbreiten.

MIT EINEM ÄHNLICHEN MECHANISMUS sind viele Orchideen der in den Regenwäldern Lateinamerikas vorkommenden Gattung *Catasetum* zu einer Art „Boxer“ avanciert. *Catasetum* gehört zu jenen Pflanzen mit rein männlichen und rein weiblichen Blüten, die sich, für Insekten erkennbar, unterscheiden. Allerdings gibt es mehr männliche als weibliche Pflanzen. Das verschärft den Wettbewerb unter den männlichen Individuen.

Ein Trick sorgt nun dafür, dass nur der Pollen einer Pflanze – und nicht auch jener der Konkurrenz – von einem bestäubenden Insekt weitergetragen wird: Kriecht eine Biene in eine männliche Blüte, berührt sie automatisch die langen fleischigen Tastfühler. Sofort schießen die beiden in einer Tasche befestigten Pollensäcke und eine Art klebrige Platte nach oben, die das Insekt regelrecht vermöbeln und dabei die Pollenkörner auf seinem Körper verteilen. Manche der Bienen werden sogar herausgeboxt.

Das schreckt die meisten Tiere so sehr, dass sie über der nächsten Orchideenblüte so lange schweben, bis sie sicher sind, eine weibliche Pflanze zu erwischen und keine weitere Misshandlung zu erleiden. Damit hat der „Boxer“ sein Ziel erreicht: Nur sein Pollen wird weitergetragen.

Während der Sinn des Schleudermechanismus bei *Catasetum* klar ist und auch deutlich wird, weshalb viele Pflanzen ihre Blätter der Sonne nach ausrichten, sind andere Pflanzenbewegungen weniger gut verstanden. Ob zum Beispiel die Bohne *Sesbania exaltata* abends ihre Blätter schließt, um sie nächtens vor Kälte oder Wasserverlust zu schützen oder vor dem Licht des Mondes, das ihre „innere Uhr“ durcheinander bringen könnte, haben die Forscher noch nicht endgültig geklärt.

Sollte es gelingen, die Mobilität der Pflanzen zu enträtseln, könnte dies praktische Konsequenzen haben: Sobald Forscher in der Lage sind, den Bewegungsmechanismus bei „schlafenden“ Wildkräutern auf Feldern gezielt zu blockieren, lassen sich womöglich neue Unkrautvernichtungsmittel entwickeln. □

Klaus Wilhelm, 44, lebt als Wissenschaftsjournalist in Berlin.
Fachliche Beratung: **Prof. Eberhard Schäfer**, Lehrstuhl für Botanik, Universität Freiburg.

Die Kraft, die aus der Verdünnung kommt

Durch Experimente mit Schneckenspermien und Hühnerdärmen enträtselte Henri Dutrochet ein Grundphänomen der Biologie: die Osmose, die etwa in Zellen von Pflanzen Druck erzeugt und den Gewächsen ihre Mobilität ermöglicht

Text: Bettina Süsssemilch

Das Spermienpaket einer Schnecke ist an einem Tag im Sommer 1826 das Forschungsobjekt des französischen Biologen Henri Dutrochet. Mit einer Pinzette legt er das gallertartige Säckchen in eine Schale Wasser und stellt sie unter das Mikroskop.

Als er durchs Okular schaut, stutzt er: Die Samen in dem Päckchen werden plötzlich durch eine ventilartige Öffnung ausgestoßen, so als würde ein Kolben sie herauspressen. Und gleichzeitig füllt sich das Innere des Beutels mit Wasser – obwohl die Öffnung ja durch die austretende Masse verschlossen ist. Diese Bewegung hört erst auf, als alle Samen die Hülle verlassen haben.

Es drängt sich ihm der Gedanke auf, dass dieses Phänomen möglicherweise durch einen natürlichen Vorgang erklärt werden kann. Vielleicht hat der höher konzentrierte, gallertartige Inhalt in den Samenpäckchen das Wasser quasi „angesaugt“ – und ist dann durch die eindringende Flüssigkeit allmählich hinausgezwängt worden.

Um seine Hypothese zu beweisen, entwickelt Dutrochet einen Versuch. Er bindet einen Hühnerdarm an einem Ende zu, füllt ihn mit Milch und verknotet ihn auch am anderen Ende. Dann taucht er den Beutel in Wasser – und tatsächlich: Der Sack schwillt an. Es muss also auf irgendeinem Weg Flüssigkeit eingeströmt sein.

Steckt hinter dem Vorgang tatsächlich eine Gesetzmäßigkeit?

Dutrochet konstruiert eine weitere Vorrichtung: Er schließt einen umgedrehten Glastrichter mit einer Harnblase dicht ab, das schmale Rohr ist nach oben geöffnet. Füllt er das Gefäß nun durch das Rohr mit einer Zuckerlösung und taucht es anschließend unter Wasser, so strömt die Flüssigkeit durch die Harnblase in das Röhrchen, die Zuckerlösung steigt auf.

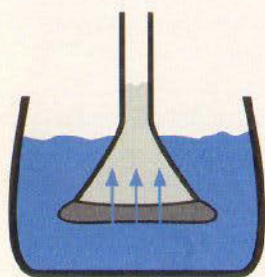
Auch bei weiteren Versuchen beobachtet er, wie die niedriger konzentrierte von zwei Flüssigkeiten, die durch eine Membran getrennt sind, stets in Richtung der höher konzentrierten Lösung fließt – und zwar selbst entgegen der Schwerkraft. Nun ist er davon überzeugt, dass die Konzentrationsunterschiede den Wasserstrom bewirken.

Dem Vorgang liegt ein Naturgesetz aus der Physik zugrunde, das besagt: Die **Entropie**, das heißt die Unordnung (oder „Gleichverteilung“) des Universums, nimmt ständig zu (siehe Seite 48). Rotwein etwa, den man in ein Glas mit Wasser tröpfelt, verteilt sich in der anderen Flüssigkeit, bis er nur noch als schwache Färbung zu sehen ist. Bei diesem **Diffusion** genannten Prozess streben die Moleküle des Weins vom relativ geordneten Zustand im Tropfen zum ungeordneten Zustand – und damit einer größtmöglichen Durchmischung zu.

In Dutrochets Versuchen mit dem Hühnerdarm stellen die hoch konzentrierte Milch im Darm und das umgebende Wasser physikalisch einen relativ geordneten Zustand dar. Das Wasser schafft nun mehr „Unordnung“, indem es durch die feinporige Darmhaut strömt und die Milch verdünnt.

Die darin gelösten Moleküle, etwa Eiweiße und Fette, passen dagegen wegen ihrer Größe nicht durch die Poren und können daher die Unterschiede in der Konzentration auf umgekehrtem Wege nicht ausgleichen. Die biologisch als Membran („Haut“) bezeichnete Barriere ist also halbdurchlässig („semipermeabel“).

Diese physikalische Erklärung findet der Arzt und Biologe Dutrochet zwar nicht – das gelingt erst etwa ein halbes Jahrhundert später dem deutschen Apotheker und Naturwissenschaftler Wilhelm Pfeffer. Dennoch schließt schon der Franzose aus seinen Beobachtungen richtig, dass bestimmte Membranen Wasser durchlassen, nicht aber die darin gelösten Substanzen.



Dutrochets Versuch

zur Osmose: Wasser (blau) wird durch eine Harnblase (dunkelgrau) von einer konzentrierten Zuckerlösung (hellgrau) getrennt. Aufgrund der Konzentrationsdifferenz strömen die kleinen Wassermoleküle (Pfeile) durch die für die großen Zuckermoleküle unpassierbare Membran, verdünnen damit die Lösung und lassen deren Pegel ansteigen. Der Franzose erkannte als Erster, dass die niedriger konzentrierte von zwei durch eine Membran getrennten Flüssigkeiten stets in Richtung der höher konzentrierten fließt, bis es zu einem Ausgleich gekommen ist



Henri Dutrochet (1776–1847) begann 1802 in Paris Medizin zu studieren und arbeitete zunächst als Militärarzt, ehe er sich mit 34 Jahren den Geheimnissen der Biologie zuwandte

Am 24. November 1826 schreibt er an die Pariser Akademie der Wissenschaften und nennt das Phänomen „Endosmose“ (später bekannt als **Osmose**, von griech. *osmos* = Stoß oder Schub). Es ist der Nachweis eines fundamentalen Naturvorgangs – und der Anfang vom Ende althergebrachter Vorstellungen.

Zunächst hat es in Dutrochets Karriere allerdings nicht danach ausgesehen, als werde er sich dereinst den Grundlagen der Biologie widmen. Der älteste Sohn einer adeligen Familie studiert nach den unruhigen Zeiten der Französischen Revolution zunächst Medizin und arbeitet als Militärarzt, ehe er mit 34 Jahren beschließt, sich künftig mit den Geheimnissen der Natur zu beschäftigen. So entdeckt er unter anderem, dass die **Spaltöffnungen** der Blätter mit Hohlräumen im tiefer gelegenen Blattgewebe in Verbindung stehen – eine wichtige Voraussetzung für den Gasaustausch mit der Außenluft. Sein größter Erfolg sind aber die Erkenntnisse aus seinen Osmoseversuchen.

Dutrochet lässt sich dabei nicht von den vorherrschenden Ansichten beirren. Unter den Wissenschaftlern jener Zeit ist eine Art Universalerklärung für alles Unerklärliche noch weit verbreitet: Allen Lebensprozessen liege ein immaterieller und verborgener Lebensfaktor zugrunde. Es ist die Lehre des Vitalismus, die auf den griechischen Philosophen Aristoteles (384–322 v. Chr.) zurückgeht und eine metaphysische Kraft als Essenz des Lebens postuliert – eine Energie, die sich nicht per Versuch im Labor nachweisen lasse.

Die Gelehrten glauben etwa, dass durch eine derartige Kraft in den Pflanzen Flüssigkeit aus dem Boden gesaugt wird, die dann für den prall gefüllten Zustand des Pflanzenkörpers sorgt. Wie

sonst ließe sich die stabile Form krautiger Gewächse begründen?

Dutrochet schließt derart mystische Erklärungen dagegen aus.

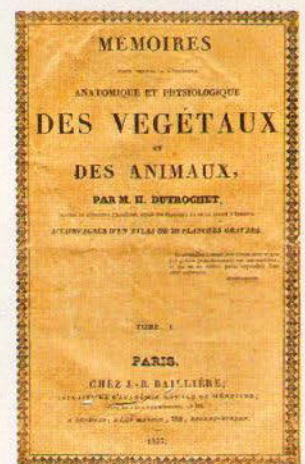
Er ist einer der eifrigsten Verfechter einer völlig gegensätzlichen Vorstellung, des Mechanismus. Seine Erkenntnisse aus der Osmoseforschung schwächen das Gedankengebäude des Vitalismus: Denn der Franzose zeigt durch seine Untersuchungen ein Prinzip auf, das vieles erklären kann – etwa die physikalische Kraft, welche den Flüssigkeitsstrom in die mikroskopisch kleinen pflanzlichen Zellen bewirkt.

So beruht die Stabilität zahlreicher Gewächse auf der Osmose, da in bestimmten Pflanzenzellen Zucker stärker konzentriert ist als im sie umgebenden Gewebe und daher Wasser durch die Membran einströmt und die Zellen füllt. Über komplexe Mechanismen kann die Pflanze diesen Strom regeln und so auch Bewegungen ihrer Organe, etwa der Blätter, auslösen (siehe Seite 100). Dutrochet erkennt in dem Mechanismus auch eine Erklärung für den Stofftransport, der bei Laubbäumen durch die Osmose im Frühjahr angeregt wird (siehe Seite 66).

Seine Forschungen spiegeln den Zeitgeist in Frankreich wider, der das Empirische dem Spekulativen vorzieht. Es ist die Epoche der großen Umbrüche – auch in der Wissenschaft. Fortan gelten Spekulationen nicht mehr als geeignetes Mittel zur Aufklärung unbekannter Phänomene. Die Akademie der Wissenschaften in Paris akzeptiert keine althergebrachten Theorien mehr.

Henri Dutrochet verkündet eine neue: Alle Erscheinungen bei Pflanzen und Tieren unterliegen den gleichen Naturgesetzen. Und so formuliert er 1837 eine radikale Überzeugung: „Das Leben ist nur ein physikalisches Phänomen.“ □

Bettina Süssmilch, 31. ist Biologin und gehört zum Verifikationsteam von GEOkompakt.



Die Ergebnisse von rund 30 Jahren Forschung an Tieren und Pflanzen fasste Dutrochet 1837 in dieser Publikation »Über Pflanzen und Tiere« zusammen. Neben der Funktion der Osmose erkannte er unter anderem auch wichtige Voraussetzungen für den Gasaustausch bei Pflanzen

DIE SPRACHE DER PFLANZEN

Gewächse sind ausgesprochen »kommunikativ«: Sie täuschen, warnen und locken. Ein ganzes Arsenal von optischen und chemischen Signalen hilft ihnen dabei und macht es möglich, dass sie sogar die Feinde ihrer Feinde herbeirufen können – und sich bei einem Angriff auch untereinander verständigen, wie Experimente nahelegen

Text: Erwin Lausch

Fotos: Stephan Elleringmann



Biologen saugen im Max-Planck-Institut für chemische Ökologie in Jena die Ausdünstungen von Tabak zur Analyse ab. Bei Raupenbefall scheiden die Pflanzen ein Gift aus, das die Schädlinge abschreckt. Spezielle Gase halten zudem Falter ab, ihre Eier in die Gewächse zu legen – so können keine weiteren Raupen schlüpfen

PFLANZEN SIND FÜR die Kommunikation scheinbar schlecht gerüstet: Sie besitzen weder Nervenfasern, die Reize weiterleiten könnten, noch ein Gehirn, das etwa Schmerzen bewusst macht, und auch kein Muskelgewebe, das Kehlkopf und Mund einen Ton entlocken könnte.

Gleichwohl sind Gewächse außerordentlich empfindungsreich und mitteilbar. Sie haben lediglich ihre ganz eigenen Methoden entwickelt, um mithilfe von Kommunikation ihre Vermehrungschancen zu steigern, auf Verletzungen zu reagieren, sich vor Feinden zu schützen oder Helfer anzulocken.

Auch sie senden Botschaften aus, die von anderen Lebewesen verstanden werden – nur sind ihre Signale optischer und chemischer Natur. Würde es sich um Töne handeln, herrschte in Wald und Flur vermutlich ein überwältigendes Stimmengewirr, ein Geflüster und Geschrei. Das wehrhafte Aussehen einer Brennnessel etwa wäre, in die menschliche Sprache übersetzt, als Warnung „Lass mich in Ruhe, oder ich pieke dich“ zu vernehmen. Oder: „Wenn du mehr von meinem Blatt frisst, wird es dir übel bekommen.“

Und zur Blütezeit würden Pflanzen, um Insekten zur Bestäubung anzulocken,

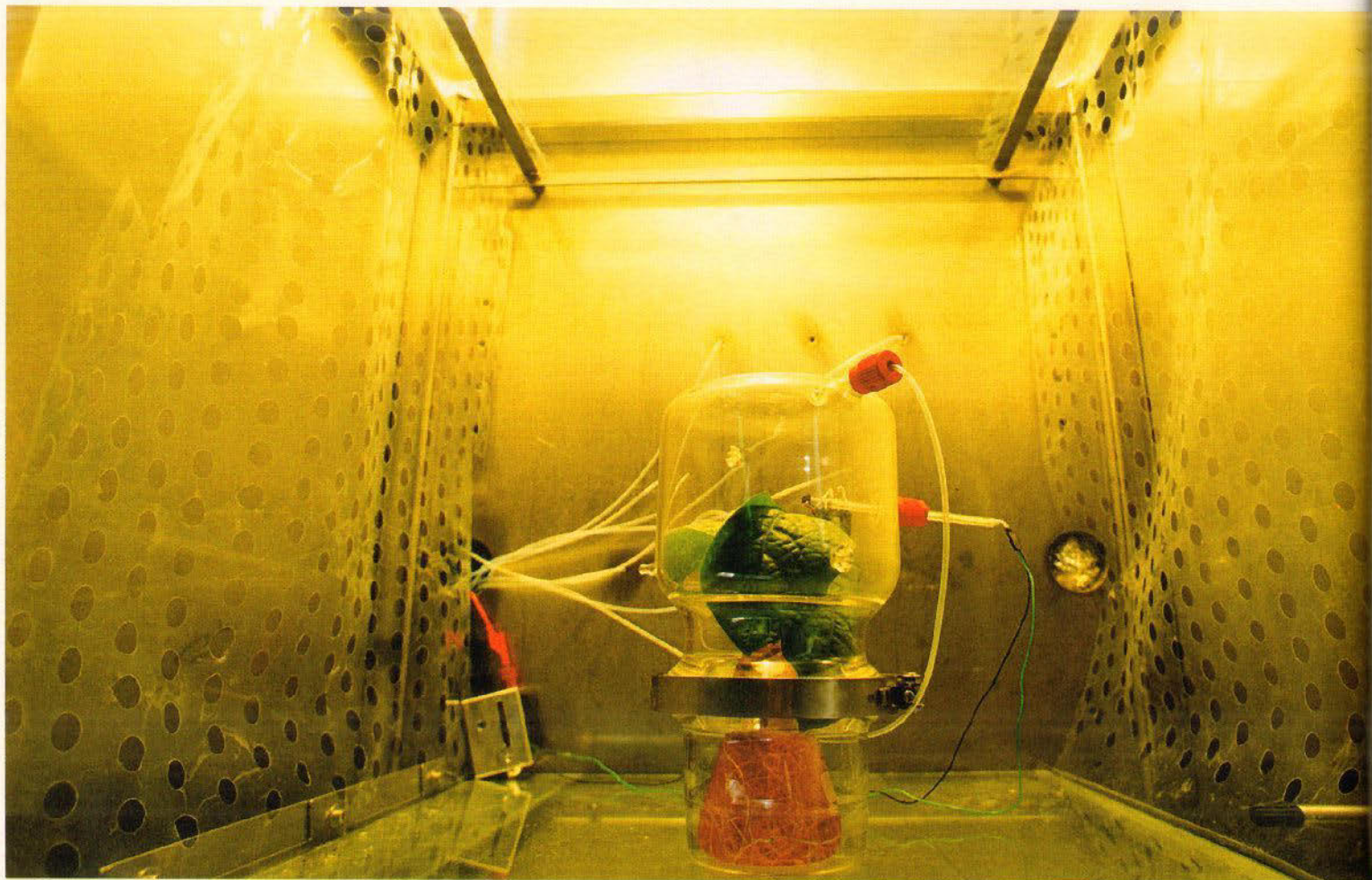
mit bunten Farben und allerlei Düften laut verkünden: „Hier gibt es Nektar, nun kommt schon her!“

Der Begriff der pflanzlichen Kommunikation ist damit sehr weit gefasst: Dazu gehört im Grunde alles, was die Pflanze ausbildet, um mit anderen Lebewesen in Kontakt zu treten.

Da die Abschreckung von Fressfeinden beispielsweise durch Dornen längst nicht immer funktioniert, wabern als chemische Signale Klagerufe durch die Luft, die sich mit „Ich werde angefressen“ übersetzen ließen. Von einigen Pflanzenarten ist bekannt, dass sie auf diese Weise außerdem noch mitteilen, wer sie attackiert. Das mobilisiert die Feinde ihrer Feinde.

Wird von einer Pflanze beispielsweise der Befall durch Raupen signalisiert, eilen sogleich Schlupfwespen herbei, die in Raupen ihre Eier abzulegen pflegen. Manche Forscher glauben gar, dass angegriffene Pflanzen ihre Nachbarn warnen.

DIE PFLANZENKOMMUNIKATION dient vor allem zwei Zielen: der Fortpflanzung und dem eigenen Schutz. Während ihres Blühens etwa senden die meisten Blütenpflanzenarten intensive Locksignale vor allem an Insekten und vereinzelt auch an Vögel



oder Fledermäuse aus. Ihre Botschaft: In den Blüten sind nahrhafte Substanzen zu finden – etwa **Pollenkörner** oder Nektar, eine zuckerreiche Lösung. Die Gegenleistung besteht in der Übertragung des **Pollens**. Um bestäubt zu werden, müssen Pflanzen somit auffallen, sofern sie als Transportmittel für den Pollen nicht Wind und Wasser nutzen (siehe Seite 32).

Die weitaus meisten Blütenpflanzenarten werden von Bienen, Schmetterlingen und Fliegen bestäubt – vor allem aber von Käfern, die sich in fast 90 Prozent aller Blüten tummeln. Farben, Düfte und auch die Form einer Blüte ziehen in vielen Fällen mehrere Insektenarten an, manchmal aber auch nur eine einzelne Art, die für die jeweilige Blüte dann meist einen exakt angepassten Körperbau entwickelt hat.

Spezielle Farbmuster auf den Blütenblättern (**Softmale**) dienen den Insekten als Wegweiser. Diese Zeichen sind oft nur im UV-Licht sichtbar und daher von Menschaugen nicht wahrzunehmen. So locken beispielsweise die für Menschen einheitlich gelb erscheinenden Blüten der

Unter Stress scheidet diese afrikanische Brunnenpflanze das gasförmige Hormon Ethylen aus – Forscher haben der Nährlösung ein Schwermetall zugesetzt, das ihr Gewebe angreift. Schon bei normalen Lebensverhältnissen sondern Gewächse 40 bis 50 flüchtige Stoffe ab, bei Verletzung oder Trockenheit sind es sehr viel mehr. Nur von wenigen dieser Substanzen aber ist bisher bekannt, welche Funktion sie haben

Sumpfdotterblume Insekten mit einem auffallend hell umrandeten „UV-Hotspot“ an, der die Sexualorgane enthält.

Nicht selten aber fällt die Belohnung fürs Bestäuben kärglicher aus, als die Signale verheißen. In den Blüten findet sich dann nur wenig oder gar kein Nektar, oder große Pollenmengen werden lediglich vorgetäuscht.

Perfekte Irreführung betreiben manche Orchideenblüten durch Geruchssignale, die männlichen Insekten scheinbar einen Konkurrenten anzeigen – der dann prompt „angegriffen“ wird – oder ihnen sogar ein Weibchen vorgaukelt. In Ex-

perimenten fanden frei fliegende Dolchwespenmännchen die offenbar ungemein aufregend riechende Blüte der Spiegelragwurz sogar verlockender als den Duft eines paarungsbereiten Weibchens.

NICHT WENIGER WICHTIG sind die Signale zum Schutz einer Pflanze. Schon durch ihre äußere Erscheinung weisen viele Gewächse auf ihre Wehrhaftigkeit hin. Dornen, Stacheln und allerlei Haare halten manchen Pflanzenfresser fern. Weidetiere verschmähen stachelige Disteln ebenso wie die dicht mit Haaren überzogenen Königskerzen.

Viele Pflanzen halten mit stängelabwärts gerichteten steifen Borstenhaaren, in deren verstärkter äußerer Membran zudem noch Kieselsäure oder Kalk eingelagert sein können, Raupen und Schnecken fern. Das Kleblabkraut etwa schützt sich gegen Tierfraß durch hakenförmige Borstenhaare.

Andere Pflanzenhaare sind glasartig spröde, sodass sie bei Berührung abbrechen, ins Fleisch der Tiere eindringen

Pflanzen sondern Hormone ab, die bei gefräßigen Raupen schwere Schäden verursachen

und Entzündungen auslösen können. Von den Brennhaaren der Brennnesseln bricht bei Berührung die Spitze ab, und die in die Haut eindringende Haarzelle injiziert ein Gemisch, von dem bereits ein zehntausendstel Gramm ausreicht, um bei Menschen Brennen und Hautrötung auszulösen. Auch das, sagen die Biologen, ist ein Kommunikationsmittel.

In manchen Fällen genügt schon das bloße Signal „Ich bin gefährlich“, und die Pflanzen werden nicht befallen. Deshalb profitieren von der abschreckenden Wirkung der Brennnesseln auch andere

duzieren ätherische Öle, die unter anderem Fressfeinde abschrecken.

Einige Pflanzen erzeugen sogar Substanzen, die Insektenhormonen ähneln. Solche Botenstoffe steuern bei den Sechsheinern etwa die Entwicklung von der Larve bis zum erwachsenen Tier (siehe Seite 84). Doch manche der von Pflanzen hergestellten Hormone sind 20-mal wirksamer als die von den Insek-

Die Abwehrstoffe stammen zumeist aus dem so genannten Sekundärstoffwechsel. Darunter verstehen Biologen Stoffwechselreaktionen, die für das Überleben der Zellen nicht unbedingt erforderlich sind, aber für den Organismus als Ganzes notwendig oder nützlich sein können. Mehr als 200 000 solcher Naturstoffe haben Forscher bisher isoliert. Doch nur von vergleichsweise wenigen sekundären Pflanzenstoffen ist bislang bekannt, welche Vorteile sie ihren Herstellern überhaupt bieten.

Einen klaren Fall von chemischer Kriegführung unter Pflanzen beschrieb schon im 1. Jahrhundert n. Chr. der römische Gelehrte Plinius der Ältere. In der Umgebung von Walnussbäumen, berichtete er, können andere Pflanzen nicht so recht gedeihen. Plinius führte das auf Ausdünstungen der Bäume zurück.

In Wirklichkeit aber gelangt eine in den Blättern gebildete Verbindung aus Alkohol und Zucker über die Wurzeln oder durch Auswaschung aus den Blättern in den Boden. Dort wird von dem zunächst harmlosen Stoff der Zucker abgespalten und in eine Substanz verwandelt, welche die Samen vieler Pflanzenarten am Keimen hindert. So schützt sich der Walnussbaum vor zu viel Konkurrenz.

Zahlreiche sekundäre Pflanzenstoffe sind flüchtige organische Verbindungen (engl. *Volatile Organic Compound* = VOC). Schon unter normalen Lebensverhältnissen dünstet eine einzelne Pflanze 40 bis 50 flüchtige Stoffe aus – und unter Stress, etwa durch Tierfraß oder Trockenheit, noch sehr viel mehr.

Nach groben Schätzungen schickt die Vegetation pro Jahr weltweit eine Milliarde Tonnen VOCs in die Luft. Bis zu 70 Millionen Tonnen jährlich beträgt allein die globale Emission des **Pflanzenhormons** Ethylen, des am längsten bekannten sekundären Pflanzenstoffes.

Ethylen löst innerhalb der Pflanze vielfältige Funktionen aus. So steuert es das Wachstum von Keimlingen, kontrolliert das Altern von Blättern und Blüten und lässt Früchte reifen. Von den Pflan-

ebenfalls behaarte, tatsächlich aber harmlose Spezies, etwa die Taubnesseln.

Wehrhaft zeigen sich Pflanzen zudem durch Blätter, die spitz und scharf, ledrig-fest oder mit versteifenden Zellen durchsetzt sind. Andere verströmen abstoßende Gerüche, schmecken unangenehm oder sind mit Giftstoffen ausgerüstet.

So enthält die Herbstzeitlose, ein Liliengewächs, in allen Pflanzenteilen das hochwirksame Zellgift Colchicin, das chemisch dem Arsen ähnelt und bei Verzehr zu schweren Durchfällen bis hin zu Schock und Herz-Kreislauf-Versagen führen kann. Viele Gewürzpflanzen wie Thymian, Rosmarin oder Majoran pro-

In Klimakammern werden Kartoffeln dem Reizgas Ozon ausgesetzt, um ihre Reaktion zu prüfen. Dass Gewächse auf Gase ansprechen, ist schon länger bekannt – vielleicht kommunizieren sie sogar untereinander mit Ausdünstungen

ten selbst gebildeten und können bei diesen schwere Entwicklungsstörungen verursachen.

Die Larven des Seidenspinners etwa sind nach der Aufnahme eines von Pflanzen erzeugten Hormons nicht mehr in der Lage, bei der **Metamorphose** ihre alte Hülle abzustoßen. Es kann sogar zur Ausbildung von zwei Köpfen kommen – mit tödlichen Folgen.



zen und insbesondere von Früchten freigesetztes Ethylen wirkt auch auf andere Arten und fördert etwa die Reifung fremder Früchte.

Daher müssen beispielsweise beim Zusammenstellen von Obst- und Gemüseladungen für längere Transporte in Containern die Ethylen-Produktionsraten der verschiedenen Produkte einerseits und die Ethylen-Empfindlichkeiten andererseits berücksichtigt werden. Äpfel und Passionsfrüchte etwa stellen besonders viel Ethylen her, reagieren aber beide auch besonders empfindlich auf das Gas.

DASS DIE VOCS bei einer besonders spektakulären Verteidigungsstrategie zum Einsatz kommen, fanden Biologen erst in jüngerer Zeit heraus. Von Schädlingen angegriffene Pflanzen rufen mit speziellen VOC-Gemischen um Hilfe – sie alarmieren die Feinde ihrer Schädlinge. So locken durch Schmetterlingsraupen geschädigte Maispflanzen parasitische Schlupfwespen an, die ihre Eier in die Maisschädlinge legen. Die geschlüpften Schlupfwespenlarven fressen die Raupen dann von innen her auf.

In Windkanal-Experimenten stellten Forscher Schlupfwespenweibchen vor die Wahl, zur Duftfahne entweder einer intakten oder einer von den Schädlingen befallenen Wirtspflanze zu fliegen. In den ersten zwei Stunden nach Befall der einen Pflanze war kein Unterschied festzustellen. Dann aber wurde diese zunehmend häufiger angefliegen als die andere.

Und die Sämlinge der Maispflanze erhöhen bei Raupenbefall durch die Zucker-rübeneule die Produktion des Alkohols Linalool sofort um das mehr als Hundertfache und düften ihn aus: um auf diese Weise Schlupfwespen anzulocken, die die Raupen vernichten.

Ähnliche SOS-Signale alarmieren Raubmilben, wenn Limabohnen von Spinnmilben heimgesucht werden, aktivieren Raubwanzen bei Attacken des Tabakschwärmers auf Wildtabak oder

mobilisieren Stinkwanzen gegen Käferlarven auf Kartoffelpflanzen.

MIT EINER GANZ ANDEREN Strategie halten Tabakpflanzen den Schaden durch Nachtschmetterlinge, deren Larven ihnen zusetzen, in Grenzen. Das nur nachts ausgesandte chemische Signal „Hier ist eine Tabakpflanze mit Raupen der Art *Heliothis virescens*“ alarmiert in diesem Fall nicht Räuber oder Parasiten, sondern weibliche Falter derselben Art, die noch auf der Suche nach einer geeigneten Tabakpflanze für ihre Brut sind.

Diese Nachtschmetterlinge bevorzugen Pflanzen, die noch nicht von Artgenossen befallen sind, und wenden sich daraufhin anderswohin. So nützt das Signal beiden: Der Tabakpflanze bleiben weitere Belastungen erspart, und die Falter finden schneller, was sie suchen.

Welchen Duftmix die Pflanzen produzieren, hängt von der Art des Schädlings ab. Damit das ausgedünstete Signal von den Empfängern verstanden wird, muss die Pflanze zunächst den Schädling registrieren – dazu reicht schon der Kontakt mit dem Speichel des Fressfeindes. Sobald eine Raupe ein Blatt anfrisst, lösen die im Speichel vorhandenen Inhaltsstoffe in den Pflanzenzellen eine Kaskade biochemischer Reaktionen aus, die Gene aktivieren und damit die Produktion eines genau auf den Schädling abgestimmten Geruchs aktivieren – der dann überwiegend über die **Spaltöffnungen** der Blätter ausdünstet und die passenden Räuber alarmiert.

Forscher haben zudem beobachtet, dass Schädlingsbefall oder Verletzungen auch bei den Nachbarn der betroffenen Pflanzen zu **Stoffwechsel**reaktionen führen. So produzieren Eichen Abwehrstoffe gegen Raupenfraß, wenn sie in Windrichtung von befallenen Bäumen stehen.

Freilich: Bis heute sind dabei grundlegende Fragen ungeklärt. In welchem Umfang kommunizieren Pflanzen miteinander? Welche Bedeutung kann eine

überwiegend vom Wind angetriebene chemische Kommunikation im Pflanzenleben haben? Handelt es sich um eine im Pflanzenreich allgemein verbreitete Erscheinung oder eher um Ausnahmen?

Uneins sind sich die Wissenschaftler vor allem wegen der umstrittenen Versuchsbedingungen. Viele Studien – so Ian Baldwin, Direktor am Max-Planck-Institut für chemische Ökologie in Jena, der an einigen Experimenten beteiligt war – hätten im Labor unter unnatürlichen Verhältnissen stattgefunden, oft an isolierten Sprossen oder einzelnen Blättern. Und die Konzentrationen der chemischen Substanzen, denen die Pflanzen ausgesetzt wurden, seien unrealistisch hoch gewesen. Die Ergebnisse von Freilandversuchen seien oft schwer zu wiederholen und die zugrunde liegenden Mechanismen schwierig zu identifizieren.

Als bislang am besten reproduzierbar erwies sich ein Experiment, bei dem eine US-Forscherguppe den Einfluss von Wüsten-Beifuß auf Wildtabak untersuchte. Sobald die Wissenschaftler den Beifuß beschnitten, gab dieser Substanzen ab, unter deren Einfluss der Tabak seinen Stoffwechsel auf Abwehr umstellte. Dadurch erlitten die Pflanzen deutlich weniger Fraßschäden durch Heuschrecken als Tabak in der Nähe von unversehrtem Beifuß. Der Abstand zwischen den Beifuß- und Tabakpflanzen betrug jeweils maximal zehn bis 15 Zentimeter.

Im Nahbereich kann also Kommunikation unter Pflanzen stattfinden: ein, wenn auch einseitiger, Informationsfluss. Ob die Botschaften auch über größere Entfernungen hinweg übermittelt werden können, ist noch unklar, weil es dabei ja zu einer Verdünnung des Signals kommt.

Mit einer Warnung im Wortsinne habe die pflanzliche Kommunikation ohnehin nichts zu tun, so Marcel Dicke von der Universität Wageningen in den Niederlanden: „Denn keine Pflanze hat ein Interesse daran, ihren Konkurrenten einen Überlebensvorteil zu verschaffen.“

Ian Baldwin stimmt dem zu: „Man sollte lieber davon sprechen, dass manche Pflanzen andere belauschen.“ □

Dr. Erwin Lausch, 76, schreibt regelmäßig für GEO kompakt. Wissenschaftliche Beratung: **Prof. Dr. Ian T. Baldwin** und **Christian Kost**, Max-Planck-Institut für chemische Ökologie, Jena.

Wer da am Blatt nagt, erkennt manche Pflanze am Speichel – und alarmiert Räuber, die sich über die Schädlinge hermachen

HEUTE POMMES MORGEN POMMES?

Die lustige, spannende und faszinierende Welt des Essens.

Alles, was richtig lecker ist und prima Laune macht, mit Kindern zu kochen, gibt's jetzt in

GEO lino essen & trinken
Das Erlebnis **Für jeden Tag**

KOCHEN MIT KINDERN

Tolle **TIPPS** und **SPANNENDE GESCHICHTEN** rund ums **ESSEN**

LECKERE REZEPTE von **TIM MÄLZER**

GEO lino • essen & trinken • Für jeden Tag • KOCHEN MIT KINDERN

Die besten **PLÄTZCHEN** • WAS ESSEN INUIT ODER INDIANER? • **TIMS LIEBLINGS-SNACKS** • Unterwegs auf dem **GROSSMARKT** • **GESCHENKIDEEN**

Nicht vergessen:
Kinder kochen
mit Tim Mälzer
VOX, 31.10.
18.45 Uhr

NEU

AB 31.10. AM KIOSK

50 Proteine und 2500 Gene wirken bei der Zeitmessung der Ackerschmalwand zusammen. Um für Versuche gleiche Bedingungen zu schaffen, werden im Kölner Max-Planck-Institut für Züchtungsforschung Pflanzen auf identischen Nährböden gezogen



Das Uhrwerk der Natur

Text: Jens Schröder

Fotos: Stephan Elleringmann

Pflanzen verfügen wie fast alle Organismen über einen lebenswichtigen Mechanismus: Sie können die Zeit exakt messen – und so bestimmen, wann es sich lohnt zu blühen, zu wachsen oder den Stoffwechsel anzukurbeln. Erst allmählich enträtseln Forscher in Laborversuchen das verblüffende Prinzip dahinter

Die Geheimnisträger sind unscheinbar: Kaum einen halben Zentimeter hoch ragen die zartgrünen Setzlinge der Ackerschmalwand aus den 96 Löchern ihrer flachen Pflanzschale, in Szene gesetzt vom blauen und roten Licht hunderter kleiner Leuchtdioden.

Eine Woche lang hat Seth Davis vom Kölner Max-Planck-Institut für Züchtungsforschung das junge Kraut an einen künstlichen Rhythmus von zwölf Stunden Licht und zwölf Stunden Dunkelheit gewöhnt. Jetzt setzt er die Pflänzchen völlig neuen Bedingungen aus: etwa einem Tag, der nicht enden will, an dem das Licht einfach nicht ausgeht; anschließend einer Nacht, in der die Temperatur plötzlich ansteigt, als sei es schon wieder Vormittag; dann wieder tagelanger Finsternis, unterbrochen von unnatürlich kurzen Pulsen weißen Lichts.

„Wir wollen herausfinden, wie der Stoffwechsel unserer Modellpflanze auf solche Veränderungen im Zeitrhythmus reagiert“, erklärt der Biologe, „um dann Stück für Stück einen bis heute rätselhaften Mechanismus der Natur zu enthüllen: die biologische Uhr.“

Fast alle Lebewesen haben im Verlauf der Evolution eine Zeitmessung entwickelt: um sich so optimal an eine Umwelt anzupassen, in der sich Licht und Temperatur im 24-Stunden-Takt verändern und Klima und Tageslänge im immergleichen Rhythmus der Jahreszeiten schwanken.

Bereits vor 3,5 Milliarden Jahren machten sich Cyanobakterien eine innere Uhr zunutze, um Funktionen wie Nahrungsaufnahme, Zellteilung und Photosynthese über die Zeitspanne eines Tages möglichst vorteilhaft zu verteilen.

Eine genetische Variante dieser Bakterien, deren innere Uhr auf einen „30-Stunden-Tag“ eingerichtet war, hat sich zwar ebenfalls als lebensfähig erwiesen. In einer gemeinsamen Laborkultur mit gesunden, besser an den natürlichen Tagesrhythmus angepassten Cyanobakterien war sie der Konkurrenz aber offenbar nicht gewachsen und ging ein.

Auch Fruchtfliegen profitieren von ihrer Fähigkeit, die Tageszeit zu messen: Ihre Puppen schlüpfen immer in den frühen Morgenstunden, wenn Feuchtigkeit und kühle Luft ein schnelles Austrocknen der empfindlichen Flügel verhindern. Selbst unter Laborbedingungen und bei ständiger Dunkelheit entpuppten sich die Jungfliegen zu einem Zeitpunkt, der in ihrem ursprünglichen Rhythmus dem Morgengrauen entspricht.

Singvögel beginnen mit ihrer zwitschernden Partnerwerbung und Revierverteidigung je nach Spezies stets zur gleichen Zeit. Erdhörnchen beenden ihren Winterschlaf nach genau sieben Monaten – selbst im immergleichen Klima eines Versuchslabors.

Und Monarchfalter, die jedes Jahr von Kanada und den USA aus zur Überwinterung etwa in die mexikanische Sierra Madre fliegen, können mithilfe ihrer biologischen Uhr sogar navigieren: Je nach Tageszeit richten die Schmetterlinge ihren

Flug in einem ganz bestimmten Winkel zur Sonne aus und halten damit einen konstanten Kurs nach Südwesten.

Um das zu beweisen, störten Forscher das Zeitgefühl der Falter mit künstlichen Licht- und Dunkelperioden, bis die einen Jet-Lag von sechs Stunden zur echten Tageszeit empfanden. Dann ließen die Wissenschaftler sie fliegen. Das Ergebnis: Tiere mit unbeeinflusstem Tagestakt wandten sich wie erwartet nach Südwesten. Die Zeitverwirrten dagegen flogen nach Südosten oder Nordwesten – je nachdem, ob ihr inneres Uhrwerk im Rahmen des Versuchs vor- oder zurückgestellt worden war.

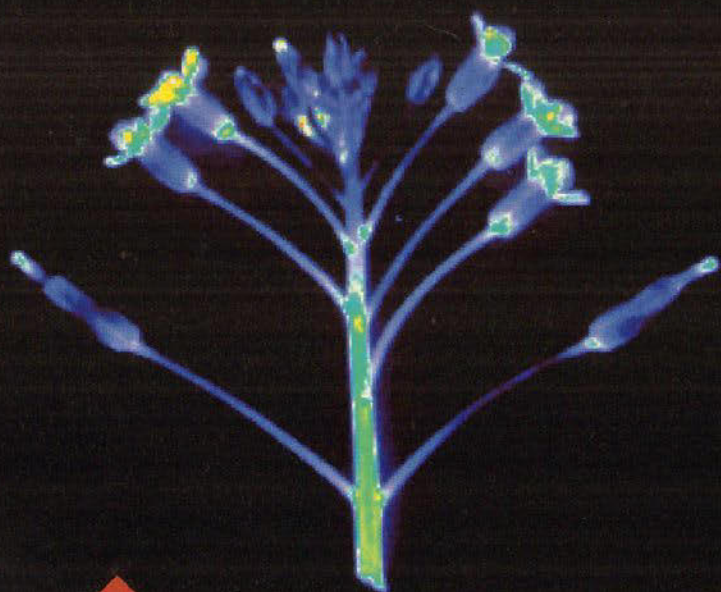
BESONDERS WICHTIG IST DIE BIOLOGISCHE UHR aber für Pflanzen: Sie können auf Umweltbedingungen und Nahrungsangebot nur wenig mit Bewegung reagieren (siehe Seite 100). Innere Uhrwerke helfen ihnen dabei, sich zumindest auf die erwartbaren Veränderungen an ihrem Standort perfekt einzustellen. Fast alle höheren Pflanzen, sogar die unscheinbare Ackerschmalwand in den Kölner Max-Planck-Labors, können beispielsweise präzise terminieren, wann der Morgen dämmern wird – und reichern schon vor dem ersten Lichtstrahl in ihren Blättern die für die Photosynthese notwendigen Enzyme an.

Doch wie genau messen sie die Zeit? Wie funktioniert der Mechanismus? Das Prinzip ist bei allen bekannten Varianten offenbar ganz ähnlich – bei Mäusen und Fliegen (zwischen denen 700 Millionen Jahre Entwicklungsgeschichte liegen) haben Forscher sogar nahezu identische Gene für die Zeitmessung gefunden.

So wie eine mechanische Uhr braucht auch eine biologische einen konstant schwingenden Taktgeber, ein „Pendel“. Diese Aufgabe übernehmen in den Zellen von Lebewesen verschiedene Eiweißmoleküle (Proteine), die eine regelmäßige chemische Schwankung im Stoffwechsel des Organismus herbeiführen, indem ihre Konzentration rhythmisch an- und wieder abschwilt. Einmal angestoßen, hält sich dieser komplizierte Prozess mithilfe einer „negativen Rückkopplung“ von selbst in Gang.

Und das geht so: Bevor ein Eiweißmolekül produziert werden kann, muss zunächst sein Bauplan, also die entsprechende Gensequenz auf dem DNS-Strang, abgelesen werden. Diese Information wird dann millionenfach kopiert und zu den „Proteinfabriken“ im Inneren der Zellen transportiert, an denen die Moleküle dann produziert werden. Daraufhin steigt die Konzentration des entsprechenden Eiweißes im Körper oder in der Pflanze an.

An diesem Punkt kommt eine besondere Eigenschaft der „Uhr-Proteine“ ins Spiel: Sie können sich an ihren eigenen Bauplan im Erbgut anheften und ein weiteres Ablesen ihrer Gensequenz damit blockieren. Mit wachsender Zahl der Proteinmoleküle wird daher die Produktion weiteren Nachschubs immer mehr gebremst – bis schließlich eine Maximalkonzentration erreicht ist und das entsprechende



▲ Dank einer Genmanipulation leuchtet dieser Setzling auf, wenn seine innere Uhr die Produktion eines bestimmten Proteins ausgelöst hat. Der Effekt wird von Sensoren aufgenommen und in einer Computeranimation dargestellt. So können Forscher bei Versuchen erkennen, ob die Uhr aus dem Takt geraten ist

Eiweiß nicht mehr weiter hergestellt werden kann, weil alle Baupläne verdeckt sind.

Erst wenn die ans Erbgut angedockten Protein-Moleküle mit der Zeit wieder abgebaut werden, geben sie ihre eigene genetische Information nach und nach wieder zum Ablesen frei: Die Produktion des Eiweißes beginnt aufs neue, seine Konzentration steigt wieder an – die nächste Pendelbewegung hat eingesetzt. Auch dieser Schwung wird wieder in einer maximalen Konzentration des Proteins gipfeln, etwa 24 Stunden nach dem letzten Höhepunkt der Produktion.

Einen „zirkadianen Rhythmus“ nennen das die Forscher, vom lateinischen *circa dies*: ungefähr ein Tag. Fast alle biologischen Tagesuhren weichen nämlich ein wenig von einem exakten 24-Stunden-Rhythmus ab und müssen daher ihre Zeitmessung – wenn sie auf genaue Angaben angewiesen sind – anhand von äußeren Reizen täglich neu justieren.

Dazu synchronisieren sie ihre „innere Uhrzeit“ etwa mit dem Zeitpunkt des nächtlichen Temperaturabfalls oder des Sonnenaufgangs (den Pflanzen über Lichtsensoren in ihren Blättern exakt bestimmen können). Durch dieses ständige Überprüfen ihres Taktes können biologische Uhren auch besser auf Schwankungen der Umweltbedingungen reagieren.

Neben diesem biochemischen „Pendel“ brauchen die Pflanzen eine Art „Mechanik“, die den erzeugten Rhythmus in nutzbare Informationen übersetzt. Manche der Uhrproteine funktionieren daher wie Zahnräder in einem Uhrwerk: Sie sind einerseits Teil jenes Mechanismus, der den Takt überhaupt erst erzeugt und hält. Gleichzeitig geben sie an bestimmten Stellen der Tagesschleife den Takt an andere

Funktionssysteme im Organismus weiter, die mit der Zeitmessung selbst gar nichts zu tun haben.

So kann eine einzige „getaktete“ Proteinart etwa zum Zeitpunkt ihrer Maximalkonzentration – also zu einer ganz bestimmten Uhrzeit – andere Stoffwechselprozesse in Gang setzen, Gene einschalten, Botenstoffe ausschütten oder bei Tieren auch bestimmte Nervenzellen aktivieren.

Über solche Bindeglieder multiplizieren sich die Einflussmöglichkeiten der Uhr-Proteine: In der Ackerschmalwand etwa sind rund 50 verschiedene Eiweißmoleküle als ineinander greifende Teile des Uhrwerks getaktet – sie kontrollieren aber nach Schätzungen der Max-Planck-Forscher die Funktionen von bis zu 2500 Genen im Tagesrhythmus, eines Zehntels des gesamten Erbguts der Pflanze.

AN DIESER »MECHANIK« setzen die Forscher des Kölner Instituts mit ihren Versuchen an. Zunächst machen sie die Uhr sichtbar: Dazu verknüpfen sie ein bereits bekanntes Uhren-Gen mit einem Enzym, das bei Glühwürmchen das Leuchten auslöst. Zur Kontrolle verbinden sie diese Luciferase oft mit einem Genabschnitt namens CAB.

Sie wissen, dass CAB die Produktion eines Proteins einleitet, das in der Pflanze gegen zehn Uhr morgens seine Maximalkonzentration erreicht. „Und immer dann, wenn dieses Eiweiß in den Zellen angereichert wird, geben die Blätter nun ein schwaches Licht ab“, sagt Seth Davis. „So können wir ablesen, wann die Pflanze glaubt, dass es zehn Uhr ist.“

Mithilfe der so veränderten Setzlinge lassen sich dann Funktionen einzelner Gene genauer untersuchen, von denen die Forscher annehmen, dass sie mit den von ihnen produzierten Proteinen das Uhrwerk steuern. Dafür züchten sie Pflänzchen, in denen das zu untersuchende, möglicherweise für die Zeitmessung wichtige Gen nicht funktioniert.

Anschließend beobachten sie, wie die Uhrwerke der Pflanzen aufgrund des Defektes aus dem Takt geraten, oder ob ihre Fähigkeit beeinträchtigt ist, sich an einen neuen Rhythmus anzupassen. „Wenn zum Beispiel das Zehn-Uhr-Protein die Pflanze erst um 13 Uhr leuchten lässt, wissen wir, dass die Uhr mit dem ausgeschalteten Gen drei Stunden nachgeht.“

Auf diese Weise ist es den Max-Planck-Forschern kürzlich gelungen, ein Gen zu bestimmen, mit dessen Hilfe die Ackerschmalwand offenbar die Information über den Sonnenaufgang in ihr Uhrwerk „einspeist“. Wenn das Gen ausgeschaltet war, vermochte die Pflanze ihre Zeitmessung beim Übergang von der dunklen in die helle Versuchsphase nicht mehr zu aktualisieren, weil sie den künstlichen Sonnenaufgang im Labor augenscheinlich nicht mehr erkannte.

In einem anderen Fall glückte es den Wissenschaftlern, jenes Gen und sein Protein zu identifizieren, die wohl für die Geschwindigkeit der Uhr verantwortlich sind: War das Gen defekt, verloren die Pflanzen zwar nicht völlig den Takt, doch am rhythmischen Leuchten der Blätter ließ sich erkennen, dass ihr „Pendel“ entweder viel zu langsam oder viel zu schnell schwang.

Die bislang größte Entdeckung der Max-Planck-Biologen: Sie haben in der Ackerschmalwand auch noch einen Kalender aufgespürt, den die Pflanze unter anderem dazu benutzt, den richtigen Zeitpunkt zum Blühen nicht zu verpassen.

Die Methode ist einfach: Die Pflanze misst die Länge der Tage. Gesteuert von der inneren Tagesuhr, wird rund zwölf

oder das Sehzentrum im Gehirn, die zusätzlich die Rolle als Taktgeber spielen.

Bei Säugetieren ist diese Funktion auf einen Dirigenten im Zwischenhirn übertragen worden: Der Suprachiasmatische Nukleus (SCN) – eine Neuronenanhäufung in zwei dicht zusammenliegenden Bündeln – liegt genau hinter den

Anders als Pflanzen besitzen Tiere einen zentralen Taktgeber – bei den meisten sitzt er im Gehirn

Stunden nach Tagesanbruch in den Zellen der Blätter ein Protein namens *CONSTANS* produziert. Wenn um diese Zeit bereits Dunkelheit herrscht, baut ein zweiter Stoff die Moleküle sofort wieder ab, sodass diese keine Wirkung haben. Erst wenn die Tage so lang geworden sind, dass die Produktion von *CONSTANS* im Abendlicht stattfindet, stabilisiert sich das Molekül und kann dann eine Kettenreaktion in Gang setzen, die mit der Bildung von Blüten endet.

SOLCHE KALENDERFUNKTIONEN gibt es auch bei Säugetieren. In deren Gehirn schüttet die Zirbeldrüse den Botenstoff Melatonin aus – und zwar nur bei Dunkelheit. In langen Winternächten wird entsprechend viel von diesem Hormon produziert, in kurzen Sommernächten wenig. Die Hormonmenge spiegelt also das Datum wider.

Die „Mechanik“, mit der diese Information umgesetzt wird, ist je nach Tier unterschiedlich: Bei Schafen etwa fördert ein winterlich hoher Melatoninspiegel die Fruchtbarkeit. Denn im Winter gezeugter Nachwuchs kommt erst nach mehreren Monaten auf die Welt und somit im wärmeren Frühjahr.

Bei Mäusen hingegen, deren Tragzeit nur wenige Wochen beträgt, hemmt das Melatonin im Winter die Empfängnisbereitschaft – mit dem Effekt, dass ihr Nachwuchs ebenfalls eher im Frühjahr oder Sommer zur Welt kommt.

Auch die Tageszeitenuhr funktioniert bei Tieren ähnlich wie bei Pflanzen – mit dem Unterschied, dass ein zentraler Taktgeber vorhanden ist, der bei den meisten Arten im Gehirn sitzt und durch chemische Botenstoffe nachgeordnete Uhrwerke überall im Körper steuert. Bei Vögeln, Reptilien, Amphibien, Schnecken und Insekten sind es meist die Augen

Augen. Bei Ratten ist die „Hauptuhr“ im Gehirn weniger als einen Millimeter lang und enthält rund 16 000 Zellen; bei Menschen umfasst das reiskorngroße Zeitzentrum hinter der Nasenwurzel durchschnittlich 45 000 Neuronen pro Kubikmillimeter.

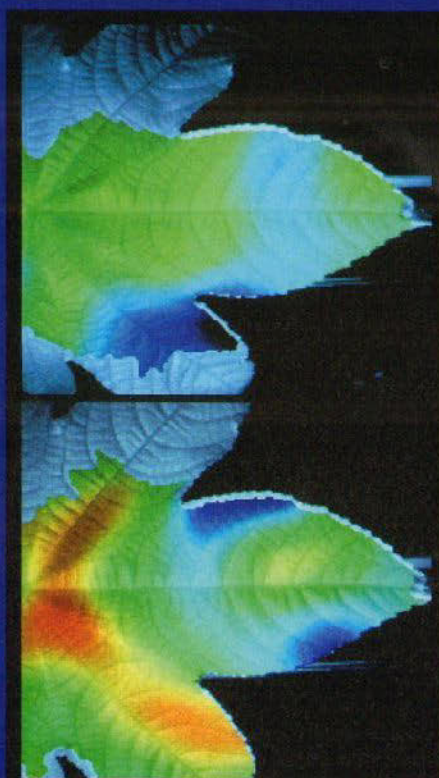
Kürzlich erst haben Forscher herausgefunden, dass die zentrale Uhr im Zwischenhirn der Säugetiere direkte Verknüpfungen mit bislang unbekannten, lichtempfindlichen Zellen der Netzhaut hat. Diese Rezeptoren dienen allein der inneren Uhr, für deren exakte Justierung sie Informationen über die Abfolge von Hell und Dunkel liefern. Der SCN lässt diese Daten einfließen in seinen Takt, der letztlich den gesamten Biorhythmus steuert.

Rätselhaft aber sind nach wie vor einige besonders langsam tickende biologische Uhren: Millionen Zikaden der Gattung *Magicicada* etwa schlüpfen fast zeitgleich nach einer exakt 17-jährigen Nymphenphase, die sie unter der Erde an den Wurzeln von Pflirsichbäumen verbringen. Forscher vermuten, dass sie den Ablauf der Jahre anhand der schwankenden Qualität der Wurzelsäfte ihres Wirtsbaums zählen.

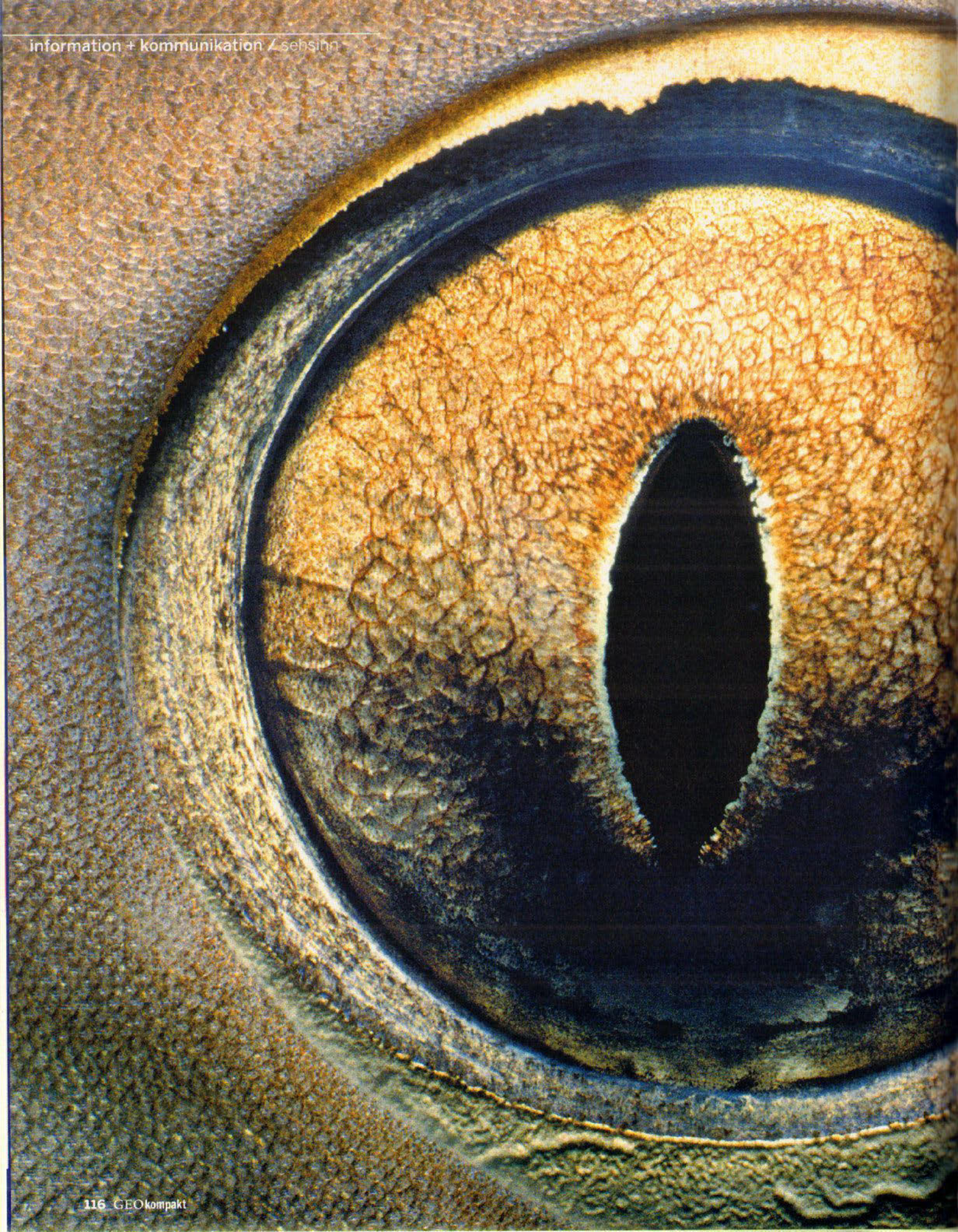
Völlig mysteriös ist bislang noch die Zeitmessung von Bambuspflanzen wie *Phyllostachys bambusoides*: Deren verholzende Stängel pflanzen sich meist durch unterirdische Triebe ungeschlechtlich fort – und blühen simultan im Energie


sparenden Langzeitrhythmus. Doch unterscheidet der sich von Land zu Land: In Indien kommt es alle 60 Jahre zur Bambusblüte, in Japan alle 120 Jahre. □

Jens Schröder, 32, ist GEO-Redakteur. Stephan Elleringmann, Fotograf in Hamburg, hat sich auf Wissenschaftsthemen spezialisiert. Wissenschaftliche Beratung: Dr. Seth Davis, Max-Planck-Institut für Züchtungsforschung, Köln.



▲ Wachstum im Takt. Diese Aufnahmen einer Infrarotkamera, die 24 Stunden lang ein Rizinusblatt filmte, zeigen: Nachmittags ruht das Blatt weitgehend (grün-blau), morgens aber erhöht es den Stoffwechsel und wächst (gelb-orange)





Haie haben wie Menschen ein Linsenauge, mit dem sie Objekte scharf und farbig sehen. Zudem aber verfügt ihr Sehorgan über eine Schicht hinter der Netzhaut, die das Licht zurückwirft und so die Sinneszellen ein zweites Mal reizt – das erhöht die Lichtausbeute

Die Erfindung des Bildes

Sie nehmen UV-Licht wahr, haben einen Rundumblick oder sehen in der Nacht wie am Tag: Tiere vollbringen mit ihren Augen erstaunliche Leistungen – und haben im Laufe der Evolution mehr als 50 Mal unterschiedliche Lichtsinnesorgane entwickelt

Text: Katharina Kramer



Geckos wie dieser Tokay können ihre Pupillen bis auf einen schmalen Schlitz verschließen. So schützen sie tagsüber ihre empfindliche Netzhaut – mit der sie als Nachtjäger bei Dunkelheit möglichst viele Informationen aufnehmen

Ganz gleich, ob Qualle oder Wirbeltier, bei allen Augenwesen funktioniert das Sehen ähnlich: Lichtempfindliche Substanzen verändern sich und lösen einen elektrischen Impuls aus

September 1978. Vor Hawaii fliegt ein Hubschrauber mit ungewöhnlicher Fracht: An seiner Unterseite hängen drei Glaskästen, und in jedem sitzt eine Taube. Der Helikopter kreist in 700 Meter Höhe. Plötzlich wird eines der Tiere unruhig und pickt mit dem Schnabel auf einen Schalter: Die Taube hat ein winziges orangefarbenes Floß ausgemacht; den Menschen an Bord dagegen ist der Farbfleck entgangen.

Bei dem Projekt wird der Einsatz von Tauben bei der Suche nach Schiffbrüchigen getestet. Und es beweist eindrucksvoll, dass der Sehsinn der Vögel dem der Menschen weit überlegen ist: Viele Vögel sehen auch dann noch scharf, wenn für uns keine Konturen mehr auszumachen sind. Und sie sehen teilweise dort noch Farben, wo uns schon alles uni erscheint.

Denn während sich in der Netzhaut von Primaten nur drei verschiedene Typen von Zapfen befinden, die auf unterschiedliche Farben spezialisiert sind, verfügen Vögel über vier bis fünf Zapfenarten, mit denen die meisten sogar ultraviolettes Licht sehen können. So erkennt ein Turmfalke noch aus großer Höhe die ultraviolett leuchtenden Urinspritzer, mit denen Wühlmäuse ihr Revier markieren.

Auch viele Insekten nehmen UV-Licht wahr. Bienen erspüren auf einer Wiese Blütenmuster, die wir nie zu Gesicht bekommen: ultraviolette Adern und Punkte – Saftmale, die das Vorhandensein von Nektar anzeigen.

So wichtig ist der Sehsinn in der Tierwelt, dass ihn die Natur gleich mehrfach erfunden hat. Über 50 Mal sind die sieben heute vorherrschenden Augentypen in verschiedenen Tiergruppen unabhängig voneinander entstanden. Etwa das

Flachauge bei Quallen, das Becherauge bei Plattwürmern, das Grubenaug bei Napfschnecken, die Lochkamera bei Tintenschnecken, das Blasenauge bei Ringelwürmern, das Facettenauge bei Krebsen und Insekten, die hoch komplizierten Linsenaugen von Vögeln und Säugetieren.

Häufig kam es dabei unter nicht verwandten Lebewesen zu einer evolutionären Parallelentwicklung (**Konvergenz**). So ähneln die Linsenaugen von Oktopussen sehr denen der Wirbeltiere – die Natur verfiel bei extrem unterschiedlichen Organismen auf die gleiche Lösung. Insgesamt haben 95 Prozent der bekannten Arten Augen entwickelt, die Bilder übermitteln. Der Selektionsvorteil, den das Sehen brachte, muss also enorm gewesen sein.

„Das Auge bietet eine genauere und beständigere Abbildung der Umwelt als irgendein anderer Sinn“, sagt der Tierphysiologe Wolfgang Schwippert. Denn was sich nicht bewegt, kann man häufig nicht hören – und Geruchseindrücke werden durch Winde ungenau. Ein weit entwickeltes Auge dagegen vermittelt zahlreiche Detailinformationen, auch über Bewegungen in der Umgebung.

Im Prinzip funktioniert Sehen wohl bei allen Lebensformen gleich: Lichtempfindliche chemische Substanzen im Sehorgan ändern ihre Struktur oder zerfallen, wenn **Licht** einer bestimmten **Wellenlänge** auf sie trifft. Eine chemische Kettenreaktion wird schließlich in einen elektrischen Impuls umgesetzt und weitergeleitet – bei höher entwickelten Lebewesen über Nervenbahnen ans Gehirn.

Eine sehr ursprüngliche Form der Lichtwahrnehmung haben die „Augentierchen“ ausgebildet, die sich seit über zwei Milliarden Jahren nicht verändert haben: Sie besitzen einen lichtempfindlichen Photorezeptor. Mit dessen Hilfe können die Einzeller in Richtung Licht schwimmen.

Etwas mehr „sehen“ können schon einfach gebaute Mehrzeller. Beim Regenwurm etwa verteilen sich lichtempfindliche Pigmente über den ganzen Körper, wodurch er hell von dunkel unterscheiden kann. Werden zu viele Rezeptoren gereizt, bewegt der Wurm sich reflexartig vom Licht fort und entfernt sich damit aus dem Blickfeld etwaiger Fressfeinde.

Bei weiter entwickelten Lebensformen konzentrieren sich die Lichtrezeptoren nur noch an wenigen Stellen, was deren Lichtempfindlichkeit steigert. Diese Sehorgane liegen zumeist in Gruben – zum Schutz und weil so ein Schattenwerfer der Rand entsteht, der es ermöglicht, die Haupteinfallrichtung des Lichts zu orten. Solche Grubenaugen finden sich zum Beispiel bei einigen Schnecken. Sie können damit auch die Bewegungsrichtung anderer Lebewesen registrieren.

Über ein bereits recht passables Bildsehen verfügt die Tintenschnecke, die seit gut 200 Millionen Jahren die Meere bewohnt. Die Öffnung ihrer Sehgrube ist zu einem kleinen Loch verengt. Dadurch kommt es zum Lochkamera-Effekt: Die von einem Objekt ausgehenden Lichtstrahlen fallen durch die Öffnung und werden auf die Rezeptoren am Grubenboden gelenkt, wo sich ein auf dem Kopf stehendes, seitenverkehrtes Bild abzeichnet. Bei geweitetem Loch ist die Abbildung hell, aber unscharf; ist es kleiner, ergibt sich eine scharfe, dunkle Darstellung.

Eine weitere Entwicklungsstufe in der Evolution war die Linse, die Licht bündelt

Die einfach gebauten Augen dieser Seeschnecke arbeiten wie eine Lochkamera: Licht fällt durch eine Öffnung in die Sehgrube und dann auf eine einfache Netzhaut. Anders als bei Linsenaugen lässt sich die Schärfe kaum regulieren.



Mit Echolot und Elektrosinn

Tiere sehen nicht nur auf ganz unterschiedliche Weise – einige von ihnen haben zur Wahrnehmung ihrer Umwelt noch andere, hoch spezialisierte Organe entwickelt: zur Orientierung bei Wanderungen, um Beute zu erfassen oder einen Partner zu finden

MAGNETSINN. Wie die Vögel auf ihren Flugwegen (siehe Seite 98), so orientieren sich beispielsweise auch Langusten am Erdmagnetfeld. Die nachts von ihren Wohnhöhlen aus bis zu 30 Kilometer weit wandernden Tiere erkennen wahrscheinlich über Magnetsensoren die Position ihres jeweiligen Standortes und können diese mit der ihres Heimatortes in Beziehung setzen. So finden sie immer wieder zurück. Forscher sind sich recht sicher, dass die sensorische Funktion im Magnetit liegt, einem Eisen-oxidkristall, das sich am Erdmagnetfeld ausrichtet. Man vermutet, dass die Langusten das Kristall selbst synthetisieren.

RIECHEN. Viele Fische sind Meister im Riechen. So können Lachse, die im Süßwasser geschlüpft und dann ins Meer gewandert sind, nach mehreren Jahren dank ihres Geruchssinns ihren Geburtsort wiederfinden, um dort abzulaichen. Auch bei Insekten spielen Gerüche eine große Rolle: Sie führen etwa zur Nahrung oder zum Partner. Die Kerbtiere riechen mit ihren Fühlern, den Antennen. Auf diesen sitzen mehrere tausend Sensoren, die Duftmoleküle aufnehmen; da Insekten über zwei Antennen verfügen, können sie im Nahbereich sogar räumlich riechen. Einen besonders feinen Geruchssinn hat das Seidenspinnermännchen: Bereits ein einziges Molekül des weiblichen Lockstoffes löst bei ihm einen Nervenimpuls aus.

HÖRSINN. Bei Fliegen und Mücken ersetzen die Antennen auch die Ohren: Schallwellen bringen die Fühler zum Vibrieren, Sinneszellen wandeln die Reize in Nervenimpulse um. Einige Insekten wie etwa Heuschrecken hören dagegen mit den Beinen: Unterhalb der Kniegelenke haben sie „Hörmembranen“, die ähnlich funktionieren wie das menschliche Trommelfell (siehe GEOkompakt Nr. 2). Vögel nehmen Schall über das Trommelfell, Amphibien zusätzlich auch über die Vorderbeine auf: Sie „hören“ buchstäblich die Schwingungen des Bodens oder des Wassers. Auch Fische können hören. Da sie kein luftgefülltes Mittelohr besitzen, übernimmt bei einigen Arten die Schwimmblase dessen Funktion.

STRÖMUNGSSINN. Wasserbewegungen und ihre eigene Geschwindigkeit „messen“ Fische unter anderem mit dem Seitenlinienorgan – einem System unzähliger Sinneszellen mit winzigen Härchen, die sich meist in einem kleinen Kanal unter der Haut an der Körperlängsseite befinden. Porenöffnungen lassen diese Sinneshaare mit dem Wasser in Berührung kommen, wodurch sie jede Bewegung registrieren – und sogar jede Veränderung der Wasserdichte. Haie etwa können mit dem Seitenlinienorgan den unregel-

mäßigen Flossenschlag verletzter Fische wahrnehmen. Auch Seehunde besitzen Strömungssensoren: An jedem ihrer etwa 100 Barthaare sitzen rund 1600 Nervenfasern (zehnmal mehr als an den Barthaaren von Katzen), mit denen sie Wirbelspuren im Wasser erfassen – etwa jene, die ein Fisch hinterlässt.

ELEKTROSINN. Nilhechte, aber auch manche Wels-, Aal- und Rochenarten erzeugen mit speziellen Organen ein (meist schwaches) elektrisches Feld, das ihren Körper umgibt. Die Spannungsquellen sind abgewandelte Muskelzellen, so genannte Elektrozyten. Geraten Gegenstände oder andere Fische in dieses Feld, verändern sie die Feldlinien und beeinflussen seine Symmetrie. Diese Änderungen registrieren die Fische mithilfe von Elektrozeporen: Sinneszellen, die auf Spannungsschwankungen reagieren. So bekommen die Fische sogar im Dunkeln einen exakten räumlichen Eindruck ihrer Umgebung. Ein Nilhecht erzeugt dabei eine Spannung von etwa einem Volt. Ein Zitteraal, der seine Elektrozyten auch als Jagdwaffe einsetzt, um Beutefische zu betäuben, bringt es auf bis zu 800 Volt. Andere Tiere wie Haie verfügen über eine passive Elektro-Ortung. Zwar können sie selbst keine Signale aussenden, Beutetiere jedoch über deren elektrische Felder finden.

ECHO-ORTUNG. Fledermäuse stoßen während des Fluges in kurzer Folge durch Mund oder Nasenlöcher meist Laute im Ultraschallbereich mit Frequenzen zwischen 20 000 und 130 000 Hertz aus, unhörbar für das menschliche Ohr. Wirft ein Hindernis das Echo zurück, erkennt die Fledermaus an der Länge der Laufzeit, der Lautstärke und der „Form“ der Reflektion die Entfernung des Objektes sowie dessen Gestalt – in manchen Fällen selbst dann, wenn es nur 0,08 Millimeter groß ist. Zahnwale, mehrere Vogelarten sowie einige Flughunde verfügen über ein ähnliches System der Echo-Ortung.

INFRAROT-ORTUNG. Grubenottern haben auf jeder Kopfseite zwischen Auge und Nasenloch das so genannte Grubenorgan: eine Vertiefung, die von einer feinen, mit Nervenfasern versehenen Membran geteilt wird. Durch sie kann die Schlange den Unterschied zwischen Umgebungstemperatur und Körpertemperatur eines Beutetieres wahrnehmen und erkennt noch Temperaturänderungen von etwa 0,002 Grad Celsius. Damit kann sie in der Nacht praktisch sehen – etwa eine Maus, die ja auch dann Wärme abstrahlt, wenn sie sich nicht bewegt. *Jürgen Bischoff*

und somit ein ebenso scharfes wie helles Bild liefert. In komplexen Linsenaugen, wie sie einige Tintenfische und auch die Wirbeltiere ausgebildet haben, regelt eine Pupille den Lichteinfall.

Obendrein enthalten komplexe Linsenaugen einen Mechanismus zum Scharfstellen unterschiedlich weit entfernter Objekte. In Ruhe sind die Augen der Säugetiere – einschließlich des Menschen – auf Fernsicht eingestellt. Die Lichtstrahlen entfernter Gegenstände treffen fast parallel auf das Auge des Betrachters. Dabei bleibt die Linse flach, sodass die Strahlen nur wenig gebrochen werden und auf der Netzhaut ein scharfes Bild entsteht.

Soll dagegen ein nahes Objekt fixiert werden, ziehen sich die Ringmuskeln um die Linse zusammen und wölben sie. Eine gekrümmte Linse bricht das Licht stärker: Dadurch erzeugen auch stärker auseinanderstrebende Lichtstrahlen naher Objekte scharfe Bilder im Auge.

Eine hohe Sehschärfe wird zudem durch die Konzentration von Sehzellen in einem Bereich der Netzhaut, der Fovea, erreicht. Beim Menschen befinden sich dort rund 200 000 Rezeptoren pro Quadratmillimeter. Dank dieser Dichte nimmt unser Auge bei optimaler Beleuchtung aus

fünf Meter Entfernung noch Punkte im Abstand von 1,5 Millimetern als getrennt wahr. Damit sehen wir zwölfmal schärfer als etwa Hauskatzen.

Allerdings: Greifvögel sehen noch deutlich besser. Ein Bussard beispielsweise hat in seiner Fovea eine Million Lichtrezeptoren pro Quadratmillimeter. Noch aus 100 Meter Höhe kann er eine grüne Heuschrecke erspähen.

Die Facettenaugen der Insekten funktionieren nach einem ganz anderen Prinzip. Sie bestehen aus winzigen, sechseckigen Seheinheiten, den **Ommatidien**, die jeweils in einem etwas anderen Winkel zum Licht stehen. Je größer die Zahl der Einzelaugen, desto mehr Bildpunkte liefern sie.

Entsprechend sieht eine Biene mit ihren 5000 Ommatidien weniger detailliert als eine Libelle, die mit 30 000 Seheinheiten wahrscheinlich Eindrücke von etwa der Qualität einer grobkörnigen Fotografie empfängt. Für den Menschen wäre ein solches Sehorgan eher unpraktisch: Ein Facettenauge mit unserer Sehschärfe hätte einen Durchmesser von einem Meter.

Verglichen mit den Augen vieler Tiere, schneidet das Lichtsinnesorgan des Men-

Für den Menschen
wäre das Insektenauge
unpraktisch – um die
gleiche Schärfe wie unser
Sehorgan zu erreichen,
müsste es einen Durchmesser
von einem Meter haben

Das Facettenauge von Insekten – etwa der Rinderbremse – besteht aus winzigen sechseckigen Seheinheiten, die je einen Bildpunkt erfassen und zusammen ein höchstens grobkörniges Bild liefern





Die Tintenschnecke nutzt das Lochkamera-Prinzip und nimmt ein seitenverkehrtes, auf dem Kopf stehendes Bild wahr. Die Stielaugenfliege kann durch Kopfbewegung ihre Facettenaugen schwenken und hat so einen besonders guten Rundumblick

schen auch bei der Farbwahrnehmung nicht schlecht ab. Das gilt für alle tagaktiven Primaten und erklärt sich vermutlich aus ihrer Entwicklungsgeschichte: Im tropischen Wald mussten sie junge Blätter von alten, reife Früchte von unreifen und giftige Nahrung von ungiftiger unterscheiden. Ein differenziertes Farbsehen brachte ihnen einen Selektionsvorteil.

Auf der menschlichen Netzhaut (Retina) befinden sich etwa sechs Millionen Zapfen für die Wahrnehmung der Farben Rot, Grün und Blau. Aus den Signalen dieser Rezeptoren errechnet das Gehirn einen Farbeindruck, der auch die Mischfarben umfasst.

Ultraviolettes Licht allerdings nicht: Da ist der Mensch den meisten Vögeln und vielen Insekten unterlegen – und einigen Fischarten. Der Goldfisch etwa kann das komplette Spektrum vom UV-Licht bis zum längerwelligen Rot wahrnehmen.

Dagegen besitzen viele Säugetiere eine eher geringe Anzahl von Zapfen – wohl wegen ihrer Abstammung von kleinen, nachtaktiven Unterholzbewohnern. Nachtaktive Tiere haben auf ihrer Retina stattdessen vor allem Stäbchen: Rezeptoren, die nicht auf die Farben des Lichts reagieren, dafür aber ausgesprochen hell-dunkel-empfindlich sind. Deshalb erkennt eine Hauskatze nur wenige, schwache Farben und der vom Wolf abstammende Hund allein Gelb-, Grün- und Blautöne.

Andererseits haben Nachttiere Vorrichtungen dafür entwickelt, so viel Licht wie möglich auf ihrer Retina zu sammeln – Hunde, Haie oder Katzen zum Beispiel das „Tapetum lucidum“: eine Schicht hinter der Netzhaut, die das eingedrungene Licht noch einmal reflektiert, sodass die Sinneszellen ein zweites Mal gereizt werden. Das steigert die Lichtausbeute – und bewirkt das Leuchten der Katzenaugen im Dunkeln.

Haus- und Raubkatzen haben zudem, wie viele Jäger, nach vorn gerichtete Augen. Um Entfernungen richtig abzuschätzen und ihre Beute gezielt packen zu können, müssen sie über ein gutes räumliches Sehen verfügen. Das aber ergibt sich nur, wenn die Blickfelder der Augen einander überlappen. Bei Eulen überschneiden sie sich sogar um nahezu 60 Grad – auf Kosten eines rückseitigen blinden Winkels

von über 180 Grad. Dieses Manko wird bei den Eulen dadurch wettgemacht, dass sie ihren Kopf um 270 Grad drehen können, ohne den Rumpf zu bewegen.

Einen fast vollkommenen Rundumblick ohne Kopfdrehung ermöglichen dagegen die Facettenaugen vieler Insekten. Das ist aber nicht der einzige Grund dafür, dass Fliegen immer schon weg sind, wenn wir mit der gefalteten Zeitung zuschlagen: Diese Insekten sehen das Niedersausen der Zeitung wie in Zeitlupe – pro Sekunde können sie bis zu 300 Bilder getrennt voneinander wahrnehmen.

Ein Mensch hingegen kann bei schlechtem Licht gerade mal zehn Bilder pro Sekunde auseinander halten. Auf diese Frequenz sind viele unserer technischen Errungenschaften abgestellt. Entsprechend würde eine Stubenfliege in einem Kino nicht etwa bewegte Bilder betrachten, sondern einen Diavortrag. Das genaue Bewegungssehen ermöglicht es den Insekten, auch bei schnellem Flugtempo ihre Umgebung exakt zu beobachten – und rechtzeitig Feinde zu bemerken.

Feinde wie das Vieraue etwa. Das ist ein lateinamerikanischer Küstenfisch, der Beute über Wasser (Insekten) und unter Wasser (etwa kleinere Fische) mit ein und demselben Blick erspäht – dank seines außergewöhnlichen Sehorgans.

Da unter Wasser das auf die Hornhaut fallende Licht schwächer gebrochen wird als in der Luft, sind die Linsen vieler Wassertiere stärker gekrümmt als jene von Landbewohnern. Menschen etwa sehen unter Wasser alles verschwommen, Robben sind an Land kurzsichtig.

Das Vieraue aber hat sich auf beide Welten eingestellt: Die Pupillen seiner Augen unterteilen sich durch miteinander verwachsene Irislappen in zwei Hälften. Die obere Hälfte der Linse ist schwach, die untere stark gekrümmt, was jeweils für die richtige Brechung der Lichtstrahlen sorgt. Und der Küstenfisch schwimmt so, dass die Trennlinie immer genau auf Höhe der Wasseroberfläche liegt.

Sein Sehorgan macht den Fisch zum Sonderfall der Natur: Das Vieraue ist das wohl einzige Lebewesen, das über und unter Wasser gleich gut sehen kann. □

Wissenschaftliche Beratung:
Dr. Wolfgang W. Schwippert, Universität Kassel,
Abteilung Neurobiologie.

Stubenfliegen sehen schnelle Bewegungen wie in Zeitlupe – sie können bis zu 300 Bilder pro Sekunde getrennt voneinander registrieren

Jetzt im Handel



Erleuchtung statt Sonnenbaden: Reisen für die Seele.

Weitere Themen

Kanada

Als Greenhorn in einer Blockhütte.

Tahiti

Südsee - Glück hoch zwei.

Nordsee-Inseln

Winterzauber vor der Küste.



Täuschen und betrügen, lernen und sogar Denksportaufgaben lösen: Zu all dem sind Tiere fähig. Doch ob sie wirklich bewusst planen oder lediglich von ihren Instinkten gesteuert werden, darüber streiten die Forscher

KÖNNEN TIERE DENKEN?

Text: Uta Henschel

Der Seelöwe Tommy reckt den Kopf aus dem Wasser und schaut zu, wie der Biologe Guido Dehnhardt von der Ruhr-Universität Bochum am Rand des Pools drei Leuchtkästen aufbaut. Die Robbe soll zeigen, wie gut sie das beherrscht, was Dehnhardt „mentale Rotation“ nennt.

Zuerst leuchtet im mittleren Kasten eine mehrarmige geometrische Form auf. Erlischt sie, erscheint in den Kästen rechts und links einmal eine Kopie des Originals, einmal dessen Spiegelbild.

Tommy soll bestimmen, welche Variante mit dem Original identisch ist. Eine schwierige Aufgabe, denn beide Bilder sind um eine zentrale Achse verdreht, sehen also anders aus als das Vorbild.

Hat der Seelöwe sich entschieden, berührt er die betreffende Form mit der Schnauze und löst einen Kontakt aus. So wird festgehalten, wie lange Tommy braucht und ob er richtig gewählt hat. Seine Trefferquote: 90 Prozent.

Je vielfältiger die Formen werden, desto länger zögert das Tier. Was da-

bei wohl in seinem Kopf vorgeht, weiß Dehnhardt aus Berichten menschlicher Testpersonen.

Sie haben genau geschildert, wie sie sich das Original einprägten und die zur Wahl stehenden Alternativen vor ihrem geistigen Auge so lange um die Zentralachse drehen – daher „mentale Rotation“ –, bis diese die gleiche Position hatten wie das verschwundene Bild. Dann verglichen sie die drei miteinander und bestimmten, welche zwei identisch waren.

Hat Tommy das passende Paar gefunden, geht ein Ruck durch seinen Leib. „Der Aha-Effekt“, sagt Dehnhardt: „Wie bei uns, wenn wir etwas begreifen.“

Soll das heißen, dass Tiere sich Vorstellungen machen? Dass sie ein Bild von der Welt haben, das sie mit der sichtbaren Wirklichkeit vergleichen? Dass sie überlegen, abwägen, bewusste Entscheidungen treffen?

„Es sieht so aus“, meint Dehnhardt.

Der Tierpsychologe Juan Delius aus Konstanz beurteilt den Scharfsinn von Haustauben. Die Vögel können zwi-

schen zwei Näpfen mit verschiedenen gefärbtem oder gekörntem Kies wählen. Nur in einem ist unter den Steinchen Futter verborgen – was die Tauben durch Picken herausfinden.

Bei Paar AB enthält der Napf A essbare Körner: Wer Napf B wählt, geht leer aus. Bei BC bietet der B-Napf Futter. Beim Durchgang CD ist wiederum C der Futternapf, beim vierten Versuch enthält D die Körner und E Kies pur.

Die Vögel durchschauen schnell, nach welchem System die Futterausgabe geregelt ist: Jeweils der zweite Topf einer neu hinzukommenden Kombination enthielt keine Körner. Als bei der Abschlussprüfung das unbekannte Paar BD an sie ausgeteilt wird, picken kluge Tauben folgerichtig in den Napf B.

Offenbar haben sie aus ihren Erfahrungen bewusst den richtigen Schluss gezogen und sind durch Nachdenken ans Ziel gelangt.

Delius aber teilt diese Interpretation nicht. Ein Bewusstsein akzeptiert er nur für Menschen. Den Vögeln gesteht der Wissenschaftler dagegen allen-

falls „neuronale Netze“ zu, die sich bei Mensch und Tier nicht unterscheiden. Die Netze reagieren auf Reize und leiten Informationen weiter – kaum anders als die Schaltkreise in einem Roboter.

Bei der Frage, was wohl in den Köpfen anderer Spezies vorgeht, geizen manche Wissenschaftler noch immer mit Anerkennung. Dass Menschen nicht nur die Bausteine der lebenden Materie mit den Tieren teilen, sondern auch eine gemeinsame Entwicklungsgeschichte des Verstandes, halten sie zwar für möglich.

Aber, so wenden sie ein, nachweisen lässt sich das nicht: Subjektive Erfahrungen könne man nicht untersuchen. Der Regelkanon der Forschung erlaube nur das Sammeln und Auswerten objektiver Daten. Bei den Anhängern dieser Schule gelten Tiere daher als von Instinkten gelenkte Automaten, als Schlafwandler des Lebens.

Von diesem negativen Dogmatismus aber hat sich eine wachsende Fraktion von Experten inzwischen verabschiedet. Sie haben zum Forschungsziel erster Ordnung erklärt, herauszufinden, wie animalische Lebewesen Probleme lösen, verschiedene Möglichkeiten geistig durchspielen und überlegen, ehe sie handeln. Einer der Wege, auf denen die Wissenschaftler in die Gedankenwelt der Tiere vordringen, ist deren Kommunikation. Sprachversuche mit Primaten haben dabei den Anfang gemacht.

Kaum hatte der Gorilla Koko im Gehege der Gorilla-Foundation in Woodside, Kalifornien, die Gestensprache der amerikanischen Taubstummten gelernt, machten seine „Mitteilungen“ zu Herzen gehende Schlagzeilen: Koko schenkte sich nach einem „Baby“ – und erhielt ein Kätzchen. Skeptiker aber taten den Vorgang als Kuriosum ab: Koko, sagten sie, sei „konditioniert“; also darauf trainiert, die gewünschten Handbewegungen zu zeigen, ohne zu wissen, was sie bedeuten.

Doch als bald darauf die erste am Computer geschulte Primatengeneration antrat, war dieser Einwand hinfällig. Die Schimpansin Lana und der Bonobo Kanzi tippten auf den Sym-

boltasten ihres Keyboards ganze Sätze und zeigten so, dass Menschenaffen durchaus die menschliche Sprache verstehen – und sich in ihr verständigen können. Fehlte auf der Tastatur beispielsweise das Zeichen für Gurke, improvisierte Lana einfach den Begriff „grüne Banane“.

Diese Ergebnisse haben zu einer Konjunktur der mentalen Forschung an Tieren geführt. Delfine des Dolphin Institute in Honolulu auf Hawaii be-



Gorillaweibchen Koko wünschte sich mittels der von ihm erlernten Taubstummensprache ein »Baby« – und bekam ein Kätzchen

kommen von ihrem Trainer ein Objekt genannt, suchen danach im Pool und drücken ein Ja- oder Nein-Paddel – je nachdem, ob sie es finden oder nicht.

Die Tiere beherrschen 50 Begriffe und verstehen Sätze mit bis zu fünf Wörtern. Dabei können sie unterscheiden zwischen: „Hol den Frisbee und bring ihn zum Surfbord!“ und „Hol das Surfbord und bring es zum Frisbee!“ Sie kennen sich demnach in syntaktischen Feinheiten aus.

Graupapagei Alex hat es darin sogar zur Meisterschaft gebracht. Jahrelang hat er zugehört, wenn sich seine Trainerin Irene Pepperberg mit anderen Menschen über das unterhielt, was Alex lernen sollte. So hat er schließlich begriffen, wovon sie sprechen.

Zeigt ihm Irene Pepperberg zwei hölzerne Dreiecke, eines blau, das andere grün, antwortet er auf die Frage „Was ist verschieden?“ mit: „Farbe“.

Auf die Frage „Was ist gleich?“ antwortet er: „Form“. Auf „Welcher Stoff?“ kommt die Antwort „Holz“.

Ersetzt die Biologin das grüne Holzdreieck durch eines aus blauem Plastik und fragt wieder „Was ist jetzt verschieden?“, antwortet Alex: „Stoff“.

Um solche Auskunft geben zu können, muss der Vogel Kategorien bilden und sogar abstrakte Konzepte kennen – wie gleich und ungleich.

Was diese ersten Einblicke so faszinierend macht: Sie lassen ahnen, wie viel mehr möglicherweise unter natürlichen Bedingungen zu ent-



Nachdenken, dann handeln: Seelöwe Tommy hat gelernt, sich eine Figur zu merken. Und erkennt sie auch in verdrehter Form wieder

decken ist. Denn in den Labors werden die tierischen Wunderkinder ja unter Versuchsbedingungen gehalten, lösen menschliche Denksportaufgaben und kommunizieren mit den Vokabeln der Menschensprache.

Daher hat eine Gruppe von Verhaltensforschern die künstlichen Umwelten verlassen und die Natur zum Versuchsfeld gemacht: Sie studieren animalisches Bewusstsein also dort, wo es sich entwickelt hat, weil es fürs Überleben vorteilhaft ist.

Oft brauchten die Biologen Jahre, ehe sie die Kommunikation von Säugetieren, Vögeln, Reptilien, Fischen und Insekten entschlüsseln konnten – diesen subtilen Strom von Mitteilungen aus Haltung, Gerüchen, Lauten, Berührungen, Schwingungen.

Aber die Mühe lohnte sich: Schon aus ersten Übersetzungen erfuhren Forscher, wie nichtmenschliche Individuen ihr Dasein subjektiv erleben und findig eigene Interessen verfolgen.

So identifizierten Biologen im Wortschatz von Meerkatzen drei Warnrufe:

die „Begriffe“ für Leopard, Adler und Python. Die Savannen-Affen reagieren darauf mit drei unterschiedlichen Fluchtstrategien. Um Leoparden zu entkommen, klettern die Meerkatzen in die Baumwipfel. Vor Adlern verstecken sie sich am Boden. Und vor Pythons rettet sie ein Sprung in die unteren Äste.

Aber nicht jeder Feind wird von den Affen automatisch gemeldet. Sie rufen beispielsweise nicht, wenn sie allein sind. Sie warnen häufiger, wenn sich

Strategien ihrer Feinde auskennen. Auch Tiere mit einem Faible für Zahlen sind keine Seltenheit.

Entdeckt etwa ein Spatz im Territorium einer Katze etwas zu fressen, ruft er Artgenossen herbei. Einige von diesen passen dann auf, während die anderen picken – geteiltes Risiko ist halbes Risiko. Aber es muss sich für die Helfer auch lohnen: Also teilt der Finder durch die Zahl der Laute pro Minute mit, dass das Futter für viele Schnäbel reicht.

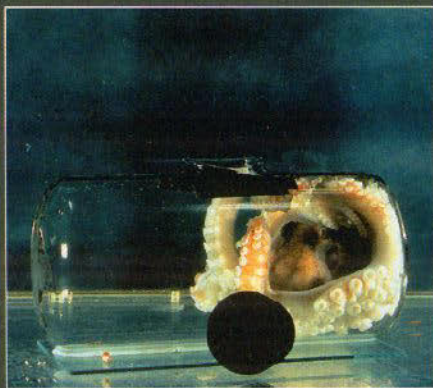
Wo die Experten dieser Fachrichtung durch Abhören nicht weiterkommen, arbeiten sie mit dem Mittel der Empathie. Sie versetzen sich in die Lage eines Tieres und fragen: „Was würde ich an dessen Stelle tun oder denken?“

Sie setzen also ihr eigenes Bewusstsein ein, um ein fremdes zu erkunden – etwa das einer *Heterodon platirhinos*.

In Indiana verfolgten Harry W. Greene und Gordon M. Burghardt die dramatischen Todeszuckungen dieser



Der Oktopus hat nach und nach herausgefunden, wie er den lose aufgesetzten Stöpsel eines Glasbehälters öffnen und sich ins Innere zwängen kann. Um bei weiteren Versuchen an eine Garnele zu kommen, hebt er den – dann tief hereingedrückten – Verschluss sogar planmäßig auf. Manche Wissenschaftler halten die findigen Kopffüßer für ähnlich intelligent wie einige Säugetiere



Verwandte in der Nähe aufhalten. Und sie schweigen hinterhältig, wenn ein Konkurrent sich dem Busch nähert, unter dem sie einen Leopard lauern sehen. Die Laute verraten also auch etwas über ihre persönlichen Beziehungen zu einzelnen Mitgliedern ihres Verbands.

Auch Schwarzkopfmeisen nehmen es gern genau, wenn sie mit „Tschika-dee“-Zetern einen Räuber melden. Vier „dee“-Silben am Ende des Rufs heißen: kleine wendige Eule, höchste Gefahr! Zwei „dee“-Silben dagegen: großer, schwerfälliger Uhu, keine Panik.

Und pazifische Seehunde können am Dialekt von unter Wasser lärmenden Orcas „harmlose“ Nachbarn von „gefährlichen“ Wanderern entlang der Westküste Nordamerikas unterscheiden: Beim vertrauten Geschnatter fischfressender Schwertwale bleiben die Robben gelassen – die Glissandi der Säugetiere jagenden Orcas dagegen schlagen sie in die Flucht.

Forscher spüren aber nicht nur animalische Arten auf, die sich mit den

Primatologen berichten seit Jahren darüber, dass Mitglieder einer Gruppe einander individuell erkennen und unterschiedlich schätzen. Nun stellt sich heraus, dass Augenring-Sperlings-

**Tiere fangen
ihre Opfer häufig
auf verblüffend
listige Weise: Orcas
etwa ködern
Möwen mit ausge-
würgtem Fisch**

papageien ihre Schwarmgenossen sogar mit „Namen“ rufen.

Die Fülle der erforschten Beispiele hat mittlerweile ausgereicht, die Begründung einer neuen Disziplin zu rechtfertigen: der Kognitiven Ethologie, der Verhaltensforschung des Denkens.

Schlange, deren Art der vor Feinden schützende Giftbiss fehlt. Bei Gefahr – in diesem Versuch durch eine (ausgestopfte) Eule simuliert – verfällt das Reptil in heftige Krämpfe, entlädt seine Kloake, dreht sich auf den Rücken und liegt da wie tot. Das Maul steht offen, die Zunge hängt heraus, Blut rinnt, die Atmung erlischt.

Greene und Burghardt aber wollten wissen, ob das Tier seinen Scheintod bewusst inszeniert oder ob die Evolution dabei Regie führt. Im zweiten Falle wäre das Verhalten genetisch vererbt und fixiert und von der Schlange nicht zu steuern.

Was wäre vorteilhafter für mich, wenn ich diese Schlange wäre, lautete die wissenschaftlich ungewöhnliche Frage der Forscher: bewusstlos dazuliegen, bis mein Kreislauf von allein wieder anspringt? Oder nur den Zeitpunkt abzuwarten, bis die Gefahr vorbei ist, und dann rasch zu verschwinden?

Offenbar, so das Ergebnis mehrerer Feldversuche, will die Schlange ihren

Feind tatsächlich bewusst täuschen. Denn sie mimte nur so lange den Kadaver, bis die Forscher die ausgestopfte Eule einkassierten.

Das nächste Experiment sollte klären, ob das Tier nur tot spielt, wenn die Biologen es anschauen, oder auch dann, wenn sie wegblicken. Und tatsächlich geschah das, was sich jeder vorstellen kann, der kurz in die Rolle der Schlange schlüpft: Richteten die Forscher ihre Augen auf das Reptil, blieb es wie tot liegen. Wendeten sie die Augen ab, kroch der eben noch starre Leichnam behende davon.

Wer Feinden etwas vormachen will, muss über deren Vorstellungen eben genau Bescheid wissen.

Das gilt ebenso für Tiere, die mit Tricks Opfer fangen. Für Reiher etwa, die Federn oder kleine Zweige auf einem Gewässer schwimmen lassen, um so Fische anzulocken. Oder für Orcas, die Möwen mit halbverdaulichem, erbrochenem Fisch ködern. Und wohl auch für manche Raubwanzen. Diese Insekten tarnen sich mit Material und Abfällen aus Termitennestern, um unerkannt im fremden Bau Beute zu machen. Gibt es nicht gute Gründe anzunehmen, dass sie vorher überlegen, was sie tun?

Kognitions-Ethologen mögen sich jedenfalls vorläufig nicht festlegen, wo in der Tierwelt die individuelle Intelligenz aufhört und der Instinkt – die Intelligenz der Evolution – beginnt.

Manchmal stoßen die Forscher auch auf Phänomene, die ihrer menschlichen Intelligenz Grenzen setzen. So wissen sie bis heute nicht, wie Huftiere der afrikanischen Savanne aus der Haltung eines zur Jagd aufbrechenden Löwenrudels „herauslesen“, wann Zebra-, Gnu- oder Büffeltag ist: ob sie also flüchten müssen oder weiter weiden können.

Und auch nach über 20 Studienjahren haben Ornithologen noch immer keine Ahnung, wie weibliche Birkhühner unter den Bewerbern um ihre Gunst unweigerlich genau den aussuchen, der am längsten leben wird. □

DÜFTE, FARBEN, SYMBOLE

Kommunikation ohne Worte

Tiere haben keine Sprache, aber unterschiedlichste Ausdrucksformen, mit denen sie Botschaften übermitteln können

Sprechen wie der Mensch kann keine Tierart. Weder ein bellender Hund noch ein Worte nachplappernder Papagei verfügt über eine „Sprache“ im engeren Sinne. Tiere kennen weder Satzbau („Du kommst“ statt „Kommst du?“) noch Regeln der Wortbildung (komme, kommst, kommt) und unterhalten sich offenbar nicht über Sachverhalte, die außerhalb ihrer aktuellen Lebenssituation liegen („Ich glaube nicht an die Relativitätstheorie“).

Was sie dagegen zweifellos beherrschen, sind diverse Formen der Kommunikation. Ameisen zum Beispiel hinterlassen eine Duftspur, die von Artgenossen aufgenommen werden kann. Wo viele Ameisen unterwegs sind, duftet es besonders stark, sodass weitere der Spur folgen, die oft zu einer ergiebigen Nahrungsquelle führt. Das heißt, Tiere können Angehörige ihrer Spezies oder andere Lebewesen durch abgestimmte Signale anregen, etwas zu tun, was ihnen selbst oder allen nutzt.

Die meisten dieser Kommunikationsformen haben sich unwillkürlich durch natürliche Auslese entwickelt. Bei der **Mimikry** des Ringel-Schlängenaals zum Beispiel suggeriert ein auffälliges Schwarzweißmuster, dieses in Wirklichkeit harmlose Wesen sei eine gefährliche Seeschlange – Fressfeinde, die gelernt haben, die giftigen Tiere zu verschmähen, verschonen so auch die „Attrappe“.

Zur artübergreifenden Kommunikation zählt auch das „gazelle stotting“: Hüpfte eine Antilope vor den Augen eines Löwen auf und ab, kann das Raubtier ermessen, ob es sich lohnt, das Tier zu verfolgen – und bei besonders behenden Exemplaren gegebenenfalls auf die Jagd verzichten.

Weitaus komplexer ist die Kommunikation der Bienen: Beim so genannten Bientanz signalisieren sie die Entfernung und den Weg zu einer Futterquelle – und zwar stets relativ zum Sonnenstand. Viele Forscher nehmen an, dass die Tiere dafür eine gedankliche Vorstellung von ihrer Umgebung benötigen. Die chemischen Signale der Bienenkönigin wiederum helfen, den Staat zu lenken.

Wenn der Hirsch röhrt, der Hund die Zähne fletscht, das Schaf blökt und die Ratte zischt, handelt es sich um Brunft-, Droh-, Beruhigungs- oder Warnsignale. Bei den meisten Spezies sind solche Äußerungen unveränderlich, das heißt genetisch programmiert, und umfassen nur ein sehr begrenztes Repertoire. Buckelwale indes variieren ihre Brautgesänge von Jahr zu Jahr, und Orcas nutzen viele unterschiedliche Kommandos beim gemeinschaftlichen Einkesseln ihrer Beute – oder schweigen bewusst, um diese nicht zu vertreiben.

Äußerst variantenreich sind die Farbmuster der Karibischen Riffkalmare: von bleich bis dunkel und gescheckt. Bei Balzritualen oder auf der Jagd kommunizieren diese Tintenfische mit über 300 verschiedenen Kombinationen aus den einzelnen Mustern. Ein Männchen etwa signalisiert einem Weibchen durch einen Längsstreifen sein Geschlecht und hält gleichzeitig Rivalen durch ein Zebromuster auf Abstand.

Nur wenige tierische Individuen haben gelernt, willkürliche Zeichen (Symbole) zu gebrauchen. Die Schimpansin Washoe zum Beispiel hat sich unter Anleitung von US-Wissenschaftlern den korrekten Umgang mit ungefähr 200 abstrakten Zeichen der amerikanischen Gebärdensprache angeeignet. Sie war das erste Tier, das kreativ von sich aus neue Ausdrücke bildete: Für den Begriff „Ente“ formte sie „Wasservogel“ aus bestehenden Ausdrücken und bewies so ein echtes Verständnis für die inhaltliche Beziehung zwischen den Symbolen. Von Washoe hat unter anderem ihr Adoptivsohn Loulis diese „Sprache“ gelernt – und damit ein echtes Beispiel kultureller Leistung erbracht.

Jürgen Broschart

Uta Henschel ist GEO-Redakteurin und verfolgt seit vielen Jahren die Forschungsergebnisse über tierische Intelligenz. Der habilitierte Linguist Dr. Jürgen Broschart, 48, ist ebenfalls Redakteur bei GEO.

VIELFALT IN DER SC

Das Leben in den Ozeanen basiert vor allem auf Algen, die in den obersten Wasserschichten schwebend das
tiere, Seesterne, Krebse und Fische. Der Körperbau der Meeresbewohner ist nur wenig von der Schwerkraft

A close-up photograph of several sea anemone tentacles. The tentacles are thick, cylindrical, and have a yellowish-orange color with a fine, wavy texture. They are arranged in a cluster, with some pointing upwards and others slightly curved. The background is dark, making the tentacles stand out.

HWERELOSIGKEIT

Licht der Sonne einfangen und Grundlage sind für ein ganzes Nahrungsnetz. Dazu gehören Quallen, Blumen-
geprägt, und so haben sie eine viel größere Formenvielfalt entwickelt als die Pflanzen und Tiere an Land

See-Anemonen
gehören zur festsitzenden
Fauna – eine Lebensweise, die
nur bei Wasserbewohnern vor-
kommt und für sie von großer Bedeu-
tung ist. Die Blumentiere ernähren
sich von Plankton, das die Strömung
heranträgt. Ihre Tentakel fangen
die Beute ein und strudeln
sie in den Körper



Der Ringmuskel

an der Oberseite der Qualle kann kontrahieren und war einst eine Fußscheibe (und ist es noch bei der Larve). Die Nahrung wird mit Gifftentakeln erbeutet. Das Mundfeld an der Unterseite dient auch als After und ist mit dem Darm verbunden, in dem die Beute verdaut wird







Korallenpolypen.

die winzige Kalkskelette
abscheiden, bauen bis zu 2000
Kilometer lange Riffe auf, deren
bizarre Oberflächen und Höhlen den
verschiedensten Organismen Le-
bensraum bieten. Rund 60 000 Riff-
Arten sind entdeckt, geschätzt
wird ihre Vielfalt aber auf
über eine Million



Mit seinen
harten Zahnplatten nagt
der Papageifisch die Skelette
alter und kranker Korallen ab,
zermalmt sie zu Sand und sorgt so
für freie Flächen. Dort können sich
Korallenlarven niederlassen, die
als winzige Wesen im Wasser
treiben, und neue Korallen-
stöcke aufbauen



Der Letzte der Universalgelehrten

Er bestieg Vulkane, kartographierte Flussläufe, skizzierte Geländeprofile. Er sammelte Tausende von Pflanzen, setzte alles daran, die Wechselbeziehungen zwischen Flora und Fauna, Boden und Klima besser zu verstehen. So wurde Alexander von Humboldt 1807 zum Begründer der Pflanzengeographie – und zum Wegbereiter moderner Ökologen

Text: Till Hein

Die blassen Fremdlinge mit dem riesigen Hund sind ein ungewohnter Anblick für die Indianer von Cumaná. Am 16. Juli 1799, kurz nach Sonnenaufgang, steigen sie in der venezolanischen Hafenstadt von Bord einer Fregatte: Alexander Freiherr von Humboldt aus Berlin in seinem preußischen Gehrock, der französische Botaniker Aimé Bonpland sowie Humboldts Dogge, groß wie ein Tiger.

Doch bald fassen die Einheimischen Vertrauen zu den seltsamen Herrschaften aus Europa, die gekommen sind, die Tier- und Pflanzenwelt Südamerikas zu erforschen. Humboldt hat etwa 50 technische Instrumente in die Wildnis geschleppt – darunter Thermometer, Sextanten, Chronometer und ein Hyetometer, mit dessen Hilfe er Niederschläge misst. Er sammelt Gesteinsproben, ermittelt an jedem Tümpel die Wassertemperatur, hält Luftdruckänderungen fest, skizziert topografische Geländeprofile und analysiert die chemische Zusammensetzung der Luft. Der Deutsche träumt davon, die Wechselbeziehungen zwischen Vegetation, Tierwelt, Boden und Klima besser verstehen zu lernen.

Humboldt ist in Schloss Tegel bei Berlin aufgewachsen. Gemeinsam mit seinem älteren Bruder Wilhelm – der als Sprachforscher und Philosoph Karriere macht – ist er von Hauslehrern unterrichtet worden. Er studierte Bergbau und wurde danach in den preußischen Staatsdienst übernommen, doch eigentlich beschäftigt er sich lieber mit Physik, Chemie, Mathematik, Zeichnen, Philosophie – und mit der Pflanzenkunde.

1796 stirbt seine Mutter, und der 27-Jährige tritt eine bedeutende Erbschaft an. Der Traum von einer botanischen Forschungsexpedition nach Lateinamerika ist nun plötzlich finanzierbar. Knapp drei Jahre später bricht Humboldt auf.

Die meisten Pflanzenkundler jener Zeit sitzen in Gewächshäusern, wo sie Staub- und Blütenblätter

zählen, um so die Pflanzen zu bestimmen. Unter welchen Voraussetzungen diese in freier Natur vorkommen, ist für sie nebensächlich.

Humboldt hingegen treiben Fragen wie: Ist das Roden von Wäldern schädlich für den Boden? Wie viel Regen vertragen Kokospalmen? Können Heuschreckenbäume überall wachsen, oder hängt das von der Höhe über dem Meeresspiegel ab?

Fünf Jahre lang durchstreift er mit Bonpland die Regenwälder, Savannen und Hochgebirge Venezuelas, Kolumbiens, Ecuadors, Perus, Mexikos und Kubas. Sie sammeln Tausende von Pflanzen, darunter 3600 in Europa unbekannte Arten. Eine gewaltige Menge, denn weltweit sind zu jener Zeit erst knapp 8000 Spezies beschrieben.

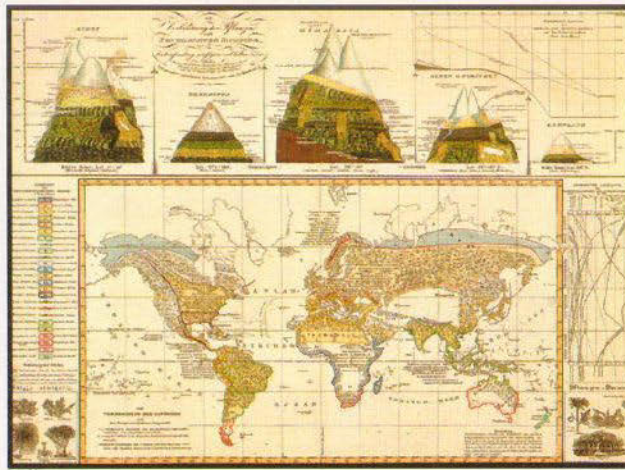
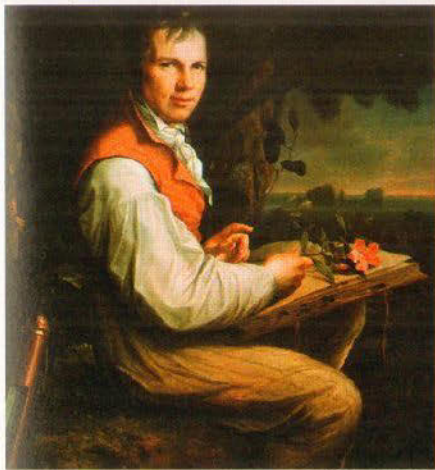
Durch seine Beobachtungen und Messungen erkennt Humboldt, wie fragil die üppige Pflanzenwelt der tropischen Regenwälder ist. Er beginnt, die Natur als ein harmonisches Zusammenspiel unterschiedlicher Kräfte zu verstehen, in der jede Pflanze und jedes Tier eine Aufgabe hat – und sei es als Nahrungsquelle für andere Lebewesen.

Die Hochgebirge am Äquator eignen sich besonders gut für seine Forschung. Hier findet er auf engem Raum das gesamte Spektrum der klimatischen Bedingungen: von Regionen mit tropischer Hitze bis zum ewigen Eis. Auf waghalsigen Bergtouren beobachtet er, wie sich die Vegetation mit der Höhe radikal verändert. In Gehrock, Poncho und Stulpenstiefeln erklimmt Humboldt im Juni 1802 den Chimborazo. Der 6310 Meter hohe erloschene Vulkan in Ecuador gilt zu jener Zeit als höchster Berg der Welt. Erst kurz vor dem Gipfel muss Humboldt die Expedition abbrechen.

In der ecuadorianischen Hafenstadt Guayaquil fasst Humboldt im Februar 1803 erstmals einen Teil der gesammelten Daten zusammen – in einem Aquarell: Er malt einen idealen Querschnitt des Andengebirges. Darin notiert er unter anderem säuberlich die Namen von Pflanzen und Tieren



Eine Weltkarte an der Wand, auf dem Boden seines Berliner Studierzimmers. Kartons mit Aufzeichnungen – so porträtierte der Maler Eduard Hildebrandt 1848 den Naturforscher Alexander Freiherr von Humboldt. Fünf Jahre hatte dieser zusammen mit dem Franzosen Aimé Bonpland die Naturlandschaften Süd- und Mittelamerikas bereist. Sie brachten 40 Kisten voller Karten, Skizzen, Gesteinsproben und getrockneter Blüten mit zurück nach Europa.



Die Darstellung von Gebirgsprofilen unter Angabe der Vegetationszonen – hier aus dem 1845 und 1848 in zwei Bänden erschienenen »Physikalischen Atlas« seines Kartographen Heinrich Berghaus – entsprach einer Idee Alexander von Humboldts (1769–1859). Auf seinen Forschungsreisen hatte er beobachtet, dass sich die Vegetation mit der Höhe über dem Meer verändert

in bestimmten Höhen sowie Luftdruck und Durchschnittstemperatur. Selbst den Sauerstoffgehalt und die Feuchtigkeit der Luft hält er fest. Das Aquarell aus Guayaquil dient ihm später als Vorlage für den Kupferstich „Geographie der Pflanzen in den Tropen-Ländern“, mit dem er 1807 die wissenschaftliche **Pflanzengeographie** begründet.

Nicht jede Pflanze kann an jedem Ort gedeihen, weist Humboldt nach. Für tropische Hochgebirge grenzt er sieben Vegetationsstufen voneinander ab. Etwa die „Region der Palmen und Pisanggewächse“, die vom Meeresspiegel bis auf 1000 Meter Höhe reicht, die „Region der Eichen“ von 1700 bis 3000 Meter oder die „Region der Alpenkräuter“ von 3300 bis 4100 Meter.

Später vergleicht er diese Befunde mit Daten aus gemäßigten Breiten und erkennt, dass die Abfolge der Schichten in dortigen Gebirgsregionen derjenigen in den Tropen entspricht – auch wenn in Europa nicht alle sieben Vegetationsstufen vorkommen und die vorhandenen aufgrund der niedrigeren Lufttemperaturen weniger hoch über dem Meeresspiegel liegen.

Humboldts Nachfolger einigen sich schließlich auf fünf Vegetationsstufen für tropische Hochgebirge. Die *Tierra caliente* (heißes Land) mit ihren immergrünen tropischen Tieflandregenwäldern und ihren Savannen reicht bis etwa 1000 Meter Höhe. Dann folgt die *Tierra templada* (gemäßigtes Land) bis rund 2200 Meter; dort finden sich immergrüne tropische Gebirgsregenwälder sowie so genannte Nebelwälder. Darüber liegen die *Tierra fría* (kühles Land) bis etwa 3300 Meter, wo lediglich Höhen- und Nebelwald vorkommt, die *Tierra helada* (gefrorenes Land) bis etwa 4400 Meter mit Zwergsträuchern und Büschelgras und zuletzt die *Tierra nevada* (Schneeregion).

Das Verblüffende: Humboldt zeigt auf, dass die Vegetationsschichten der Höhenlagen in den Anden weitgehend mit den Klimazonen der Erde übereinstimmen, die vom Äquator her gegen die Pole

aufeinander folgen. Heute unterscheidet man die tropischen Klimate (tropischer Regenwald, Savannen, Grasflure), die Trockenklimate (unter anderem Gras- und Staudenfluren, Oasenvegetation), die warmgemäßigten Klimate (etwa Laub-, Nadel- und Mischwälder), die Schneeklimate (Nadelwälder, Sträucher) sowie die Eisklimate (vereinzelte Moose und Flechten oder vegetationslos).

Der Abenteurer aus Deutschland ist der erste Wissenschaftler, der solche Zusammenhänge systematisch untersucht. Auf seiner Pionierarbeit beruhen die modernen Vegetations- und Klimakarten.

Am 3. August 1804 treffen Humboldt und Bonpland nach fünf Jahren im Hafen von Bordeaux ein. Im Gepäck 40 Kisten mit Blüten und Blättern, Gesteinsbrocken, Zeichnungen, Landkarten und Berechnungen. Die Pflanzengeographie etabliert sich schon bald in ganz Europa.

Nach seiner Amerika-Expedition lebt der Deutsche für zwei Jahrzehnte überwiegend in Paris, wo er an der Auswertung seiner umfangreichen Reiseergebnisse arbeitet. Erst nach der Veröffentlichung dieses zahlreiche Bände umfassenden Werkes und nachdem nahezu sein ganzes Vermögen verbraucht ist, kehrt er 1827 wieder nach Berlin zurück.

Dort hält er an der Universität öffentliche Lesungen und widmet sich später seinem zweiten großen Werk, dem *Kosmos* – einer Zusammenfassung der gesamten Naturwissenschaften seiner Zeit.

Am 6. Mai 1859 stirbt Alexander von Humboldt. Er hat einen unvergleichlichen wissenschaftlichen Eroberungszug hinter sich. Berge, Gewässer, Städte werden nach ihm benannt und Hunderte von Pflanzenarten – von der fleischfressenden Regenwaldpflanze *Utricularia humboldtii* bis zur Lilie *Lilium humboldtii*. Auf Landkarten ist sein Name heute viele hundert Mal vertreten. Häufiger als der jedes anderen Menschen. □

Till Hein, 36, ist freier Autor in Berlin.



Aus den Schlammvulkanen von Turbaco in Kolumbien tritt in regelmäßigen Eruptionen stickstoffhaltige Luft aus. Von Humboldt und Bonpland untersuchten das Gebiet im April 1801, nachdem sie, von Kuba kommend, bei einer stürmischen Überfahrt fast Schiffbruch erlitten hatten

DAS NETZWERK

Topräuber



Wolf

Tertiärkonsumenten



Rotkehlchen



Sperber



Fuchs

Sekundärkonsumenten



Florfliegen-larve



Haselmaus

Primärkonsumenten



Raupe



Blattlaus



Rüsselkäfer

Produzenten



Früchte



Grünes Laub

Destruenten



Regenwurm

—> bedeutet »frisst« oder »ersetzt«

Kein Blatt bleibt ungenutzt, alles wird wiederverwertet, Müll fällt so gut wie nicht an: Im Laubwald herrscht die perfekte Kreislaufwirtschaft. Der Zyklus von Wachsen und Vergehen setzt dabei in einem Hektar Buchenwald im Jahr etwa so viel Energie um, wie ein 5000-Seelen-Dorf an Strom verbraucht

Text: Ute Eberle



FRESSEN UND GEFESSEN WERDEN

Das Ökosystem Wald besteht aus einem vielschichtigen Nahrungsnetz mit zahlreichen Wechselbeziehungen. Alle Pflanzen entnehmen dem Boden Nährstoffe. Zersetzer wie Pilze und Bakterien haben diese Nährstoffe zuvor unter anderem aus abgestorbenem Holz oder Laub produziert. Grüne Blätter, Knospen und Früchte, hervorgebracht von Gewächsen, den Produzenten, dienen Pflanzenfressern, den Primärkonsumenten wie etwa Rüsselkäfern, als Nahrung. Die werden von Sekundärkonsumenten – etwa Haselmäusen – vertilgt, die ihrerseits Tertiärkonsumenten wie Füchse ernähren. An der Spitze stehen die Topräuber wie Luchs und Wolf. Das Nahrungsnetz zeigt jedoch eine hohe Dynamik: So lassen sich einige Tiere wie etwa das Rotkehlchen verschiedenen Ebenen zuordnen, da sie je nach Angebot sowohl pflanzliche als auch tierische Kost zu sich nehmen.

Ein Laubwald ist von einer Effizienz, die selbst Industriemanager begeistern müsste: Im Laufe von Jahrmillionen hat sich zwischen seinen Bäumen, deren Blättern und dem Erdboden sowie den im Wald lebenden Pflanzen, Tieren und Pilzen eine vollendete Kreislaufwirtschaft entwickelt.

Wie ein biologisches Großunternehmen produzieren der Wald und seine Bewohner ständig neue Biomasse, vernichten sie, spalten sie bis in die Moleküle und Atome, setzen alles wieder zusammen und lassen neues Leben aufgehen – ohne dabei auch nur ein Gramm an nicht wiederverwendbarem Abfall zu erzeugen.

Selbst in einem unscheinbaren Waldstück wuchert, welkt und keimt es überall. Unaufhörlich lauern sich die Bewohner gegenseitig auf, kämpfen miteinander, töten ihre Beute und vermehren sich.

Das Ökosystem des mitteleuropäischen sommergrünen Laubwaldes setzt dabei mit seinem komplexen Miteinander aus

Tieren, Pflanzen, Pilzen und unbelebter Umwelt umgerechnet pro Quadratkilometer und Jahr rund acht Millionen Kilowattstunden an Energie um – so jedenfalls in einem Buchenwald im Solling in Niedersachsen, den Wissenschaftler der Universität Göttingen rund 20 Jahre lang genau untersucht haben. Diese Energiemenge entspricht ungefähr dem, was gut 2600 Zweipersonenhaushalte pro Jahr an Strom verbrauchen.

Trotz dieses Energieumsatzes und der damit einhergehenden Aktivität verändert sich ein Wald über die Jahre nur langsam. Zwar stellt er durchaus greifbare Materie her: Blätter sprießen, Äste wachsen, Pilze schieben sich aus dem Boden, Insekten schlüpfen, Früchte reifen. Der Buchenwald im Solling etwa erzeugt pro Hektar und Jahr zwischen acht und 13 Tonnen Biomasse – abhängig von Niederschlag und Temperatur und ohne Berücksichtigung der Feinwurzeln.

Doch in einem etablierten Wald mit ausgewachsenen Bäumen wird ein Teil dieser Biomasse meist schnell wieder verbraucht – sein Leben verläuft zyklisch.

Blätter etwa werden von Raupen zernagt. Deren Kot rieselt auf den Waldboden, wo ihn Bakterien und Pilze zersetzen. Dabei scheiden sie Mineralsalze aus, die der Baum wieder aufnimmt.

Oder: Eine Spitzmaus frisst einen Käfer, wird selbst von einem Waldkauz verschlungen, der bei seinem Tod auf die Erde fällt. Aasfresser wie die Schmeißfliegen machen sich über den Kadaver her. Aus den Eiern, die sie ablegen, schlüpfen neue Insektenlarven.

Oder: Regenwasser versickert, wird aufgenommen und verdunstet. Laub fällt ab, Äste brechen, Pilze verwesen, Früchte werden verdaut.

Kurz: Ein Jahr verstreicht, und der Wald sieht im wesentlichen aus wie vorher.

BEISPIEL BUCHENWALD: An diesem Ökosystem sind bis zu 7000 Tierarten, 3000 Pilzspezies, 280 verschiedene Flechten und 130 Bakterienarten beteiligt. Rund 5000 Spezies von Insekten fliegen zwischen seinen Zweigen herum, bohren sich unter die Rinde, vergraben sich im Humus. Etwa 70 Schneckenarten kriechen über



Pilze wie der orangerote Helmschlingpilz können mit ihren Enzymen die stabilen Moleküle von Holz aufbrechen. Über den Waldboden dringt ihr Geflecht aus feinen Fäden – der Hauptteil jedes Pilzes – in das tote Holz ein. An der Oberfläche deutlich sichtbar sind nur die Fruchtkörper

Wurzeln, Stängel und Blätter der knapp 600 verschiedenen Spezies von Bäumen, Sträuchern, Kräutern, Moosen und Algen, die je nach Boden und Lage in einem Buchenwald gedeihen – vom Spitzahorn über die Himbeere bis zum Sauerklee.

Weil nur Pflanzen in der Lage sind, mittels der Photosynthese aus **anorganischen** Stoffen – dem Kohlendioxid aus der Luft, und dem Wasser aus dem Boden – den organischen Lebensbaustein Zucker zu produzieren, aus dem schließlich komplexe **Kohlenhydrate** gebildet werden, nennt man sie **Produzenten**.

Aus den Kohlenhydraten, ergänzt um Stickstoff und Mineralsalze, erzeugen die Gewächse des untersuchten Buchenwaldes im Solling pro Quadratmeter alljährlich eine Biomasse – etwa Wurzeln, Stängel, Äste, Blüten, Blätter –,

Der oberste Meter eines Waldbodens wird, statistisch gesehen, alle 50 Jahre komplett von Regenwürmern gefressen

Sie zersetzen das tote Gewebe, verwerten die darin noch gespeicherte Energie für ihre eigenen Lebensprozesse, scheiden die Reste wieder aus und speisen so die für sie unbrauchbaren, anorganischen Nährsalze und Mineralstoffe wieder in den Kreislauf des Waldes ein.

AUF DIESE WEISE verwandeln sie unter anderem die 24 bis 56 Millionen Blätter, die ein etwa 80-jähriger Buchenwald pro Hektar im Jahr produziert, in einem komplexen, viele Monate andauernden Prozess zu

Blätter-, Samen- und andere Pflanzenfresser wie Blattläuse, Raupen oder Schnecken gelten dabei als **Primärkonsumenten**. Sie werden ihrerseits von insekten- oder fleischfressenden **Sekundärkonsumenten** wie Amseln oder Schlangen verzehrt. Fleischfresser wie Marder und Fuchs sind meist Tertiärkonsumenten, die Topräuber wie Luchs, Bär und Wolf stehen an der Spitze.

Einige Tiere haben jedoch einen so vielfältigen Speisezettel, dass sie die Ebenen wechseln, beispielsweise das Rotkehlchen. Im Winter ernährt es sich hauptsächlich von Früchten und Samen und ist damit Primärkonsument. Im Sommer frisst es Raupen oder andere Insektenlarven und ist dann Sekundär- oder gar Tertiärkonsument (siehe Grafik Seite 138).

Da Nahrungsketten oft komplex verknüpft sind – ein Baumarder tötet Waldmäuse, ein Habicht Buntspechte, die ihrerseits mit Mäusen um Samen konkurrieren, die auch das Eichhörnchen frisst –, sprechen die Biologen in diesem Zusammenhang auch von **Nahrungsnetzen**.

Der rapide Umsatz der Energie darin bewirkt unter anderem, dass die großen Wirbeltiere des Waldes den Klein- und Mikroorganismen zahlenmäßig und auch in ihrer kumulierten Biomasse weit unterlegen sind.

Allerdings verbrauchen die Tiere und Pflanzen jeder Trophie-Ebene die meiste der ihnen zur Verfügung stehenden Energie für ihr eigenes Überleben und speichern nur wenig – werden sie gefressen, geben sie lediglich etwa zehn Prozent der Energie an den nächsten Konsumenten weiter.

Daher kann ein Hektar Wald zwar bis zu fünf Millionen Regenwürmer und an trockenen Standorten etwa 300 Millionen Milben ernähren – aber nur etwa 15 Rotkehlchen, ein Mauswiesel und, rein rechnerisch, ein Zehntausendstel Luchs. Der muss sich sozusagen mit dem begnügen, was übrig bleibt, wenn sich alle vor ihm bedient haben.



Ganz gleich, ob Buche oder Tanne – alle drängen sie zum Licht. Die Buchen allerdings wachsen langsamer, deshalb ist ihr Holz fester

die rund 7000 Kilokalorien Energie enthält (siehe Seite 48).

Diese Energie wird dann auf verschlungenen Nahrungsketten durch das Ökosystem weitergereicht. Dabei werden auch die **Destruenten** und **Konsumenten** aktiv.

Destruenten begnügen sich mit den toten Überresten von Pflanzen und Tieren, wie Falllaub, Totholz und Aas. Vor allem Pilze, Würmer und Mikroorganismen wie Bakterien zählen zu dieser Gruppe.

Humus. Statistisch gesehen, wird die oberste Bodenschicht eines Laubwalds bis zu ein Meter Tiefe alle 50 Jahre einmal komplett durch den Darm von Regenwürmern geschleust. Auch Kot und die herabfallenden Hautschuppen größerer Tiere bieten den Destruenten Futter.

Die Konsumenten dagegen verzehren Organismen, die noch lebendig sind, und werden je nach ihrer Stellung in der Nahrungskette verschiedenen Stufen (**Trophie-Ebenen**) zugeordnet.

Vom Sauerstoff der Bäume bleibt für die Menschen nicht viel – der Wald benötigt ihn selbst

Lange Zeit argumentierten Biologen daher, dass die Pflanzen die eigentlichen Herrscher des Waldes sind, da sie mit ihrer Reichhaltigkeit bestimmten, wie viele Pflanzen- und damit Fleischfresser in einer Region überleben könnten. Sie nannten dieses Prinzip **Bottom-up-Kontrolle**.

Seit einigen Jahren jedoch zeichnet sich die Erkenntnis ab, dass die Raubtiere entscheidenden Einfluss auf das ökologische Gleichgewicht haben, indem sie die Zahl der Pflanzenfresser kurz halten – und damit dafür sorgen, dass mehr Gewächse ungestört wachsen können.

So leiden Wälder, in denen diese **Top-down-Kontrolle** fehlt – etwa, weil die Raubtiere ausgerottet worden sind –, oft an einer Überpopulation des Rehwilds und damit an großen Verbisssschäden. Viele Raubtiere gelten daher als Schlüsseltiergruppen für die Artenvielfalt und Gesundheit eines Ökosystems.

ABER NICHT NUR DAS Nahrungsnetz ist vielschichtig, auch andere Beziehungen innerhalb des Ökosystems Laubwald gleichen einem weit verzweigten Gefüge. So lassen sich in einem naturbelassenen Wald unter anderem horizontale Etagen unterscheiden, die von der Krone über den Stamm zur Schicht der Sträucher, Kräuter und Moose reichen. Jede Region hat ihre eigenen Charakteristika.

Der Boden im Umkreis der Buchenstämme dient beispielsweise vielen dort überwinternden Blattfressern als Durchgangsstraße in die Wipfel – ein Umstand, den Insektenräuber nutzen. Ein einzelner Buchenstamm kann über 400 Spinnen Lebensraum bieten. Auch Baumwunden, an denen Saft austritt, oder Regenwasser sammelnde Astgabelungen ziehen ihre Fauna und Flora an.

In diesem Miteinander gelingt es einzelnen Spezies, sich so zu arrangieren, dass sie voneinander profitieren. So gehen Pilze und Buchen eine **Symbiose** ein. Dabei umweben die Pilze die Wurzelspitzen des Baums, dringen in die Wurzeln ein

und entnehmen ihm Kohlenhydrate. Im Gegenzug versorgen sie den Baum mit Wasser und Mineralsalzen und speichern für ihn Reserven wie **Aminosäuren**, Eiweißstoffe und Zucker, der bei Bedarf wieder mobilisiert wird (siehe Seite 66).

Regenwürmer wiederum kooperieren mit Pilzen und Bakterien. Weil sie weder kauen können noch über **Enzyme** verfügen, um die Zellulose der Pflanzen aufzulösen, saugen sie die Blätter und Halme in ihre unterirdischen Röhren, wo die Mikrohelder das organische Material für sie vorverdauen.



Ein Mantel aus Herbstlaub schützt vor Frost – den Waldboden wie die Erdkröte

Andere Arten vermeiden eine direkte Konkurrenz, indem sie sich die Ressourcen eines Lebensraums gewissermaßen aufteilen. Buchfink und Rotkehlchen etwa sammeln beide große Teile ihres Futters auf dem Waldboden. Doch während das Rotkehlchen mit seinem spitzen, dünnen Schnabel vor allem Würmer, Spinnen und andere Gliedertierchen erbeutet, pickt der Buchfink mit seinem robusten Schnabel meist Samen und Früchte auf.

In wieder anderen Fällen geht der Vorteil eines Organismus auf Kosten eines anderen. So saugen große Mengen von Blattläusen oft so viel zuckerreichen Saft aus einer Pflanze ab, dass sie deren Wachstum behindern. Gleichzeitig werden sie ihrerseits von Schlupfwespen benutzt, die ihre Eier in die Körper der Läuse legen. Nach dem Schlüpfen fressen die Larven ihre Wirte von innen auf. Solche Parasiten

von Parasiten (**Parasitoide**) stellen knapp ein Drittel der Insekten im Laubwald.

Sowohl Parasiten und ihre Wirte wie auch Räuber und deren Beute sind durch komplexe Wechselbeziehungen verknüpft, wobei sich ein Populationsboom oder -einbruch des einen verzögert in der Individuen-Dichte des anderen widerspiegelt.

Dieses **Räuber-Beute-Verhältnis** ist typisch für die Dynamik, die das Gleichgewicht auch in einem etablierten Ökosystem auszeichnet. Ein ungewöhnlich nasser Sommer oder ein plötzlicher Lichteinfall nach einem Baumbruch können einzelnen Spezies auf Zeit einen Vorteil verschaffen.

ÄHNLICHE BALANCEVERSCHIEBUNGEN

treten auch im Laufe eines Jahres auf. Nach dem langen Winter, in dem die Photosynthese sowie viele andere Stoffwechselprozesse im Wald fast zum Erliegen gekommen sind, beginnt sich das Leben zunächst im Boden erneut zu rühren. Hier sorgt das im Herbst abgeworfene Laub für eine wärmende Schicht, unter der die Temperatur teilweise um 30 Grad Celsius höher ist als in unbedeckten Erdfeldchen.

Davon profitieren in einem Buchenwald frühblühende Pflanzen wie Buschwindröschen, die den Waldboden oft bereits im März und April mit einem Flor aus Blättern und Blüten überziehen. Dazu plündern sie Energiereserven, die sie bereits im Vorjahr in unterirdischen Knollen und Wurzelstöcken angelegt haben. In diesen krautigen Gewächsen finden verschiedene Insekten Unterschlupf, die wiederum Vögeln als Nahrung dienen.

Den Bodenpflanzen bietet dieser zeitige Kraftakt die einzige Chance zur Blüte – warten sie länger, raubt ihnen die Buche mit ihrem dichten Blätterdach das nötige Sonnenlicht. Denn nebeneinander gelegt, decken die rund 40 000 bis 90 000 Blätter einer einzigen 80-jährigen Buche eine Fläche von gut 260 Quadratmetern ab. Bei dichtester Begrünung im Sommer erreichen in einem naturnahen Mischwald nur noch rund zwei Prozent des Sonnenlichts den Boden – ein winziger Bruchteil dessen, was an den fahleren Wintertagen dort an **Lichtquanten** ankommt.

Je höher die Temperaturen steigen, desto schneller wird der Kreislauf des Waldes. Neues Laub wächst, der Schwer-

punkt der Stoffwechselvorgänge in den Bäumen verlagert sich in die Kronen, wo sich nun auch viele Insekten niederlassen. Die Vogelbrut beginnt.

Am Boden dagegen bauen Kleintiere wie Asseln, Springschwänze und Milben erst jetzt konzentriert das Falllaub des vergangenen Herbstes ab. Der Grundwasserspiegel sinkt: Ein Hektar Wald mit etwa 600 80-jährigen Buchen verdunstet an einem warmen Sommertag über 50 000 Liter Wasser; das entspricht dem Verbrauch von knapp 400 Menschen.

Gleichzeitig filtert jeder Baum pro Jahr mehr als 100 Kilo Staub aus der Luft: Mit Schwebstoffen beladen, verwirbelt sie in der Kronenschicht, Schweb- und Schadstoffe setzen sich ab.

Während der Photosynthese geben die Pflanzen zudem Sauerstoff frei: Eine 100-jährige Buche etwa erzeugt durchschnittlich mehr als drei Millionen Liter O_2 pro Jahr. Doch entgegen landläufiger Meinung wird der gewonnene Sauerstoff zum großen Teil bei vielen komplexen Vorgängen im Wald gleich wieder verbraucht – zum Beispiel bei der Zersetzung von Biomasse. Anders als die Blaulagen

in den Meeren tragen die Laubwälder somit kaum zu jenem Sauerstoffüberschuss bei, der für andere Organismen, etwa uns Menschen, so lebenswichtig ist.

Der Zucker aus der Photosynthese jedoch versorgt etliche Lebewesen – nachdem er zuvor von den Pflanzen in Biomasse wie etwa Blätter oder Stängel umgewandelt worden ist (siehe Seite 54). Denn im Spätsommer beginnt die Hochzeit der frucht- und samenfressenden Tiere.

EIN BUCHENHAIN produziert in einem normalen Herbst etwa vier Kilo Eckern pro Hektar. In „Mastjahren“ – etwa alle fünf bis acht Jahre – sogar ein Vielfaches davon: bis 300 Kilo und mehr. Mit dieser plötzlichen Üppigkeit „überrascht“ die Buche das Heer der Samenfresser wie Gelbhalsmäuse und Blaumeisen und erhöht so die eigenen Chancen auf Fortpflanzung.

Sinken dann die Temperaturen und werden die Tage wieder kürzer, beginnt die Buche das Chlorophyll in den Blättern abzubauen und sich auf den Laubabwurf vorzubereiten – denn im froststarken Winter könnte der Baum seine Blätter und

Äste nicht mehr ausreichend mit Wasser und damit auch Nährstoffen versorgen. Also reduziert er seinen Stoffwechsel auf ein Minimum.

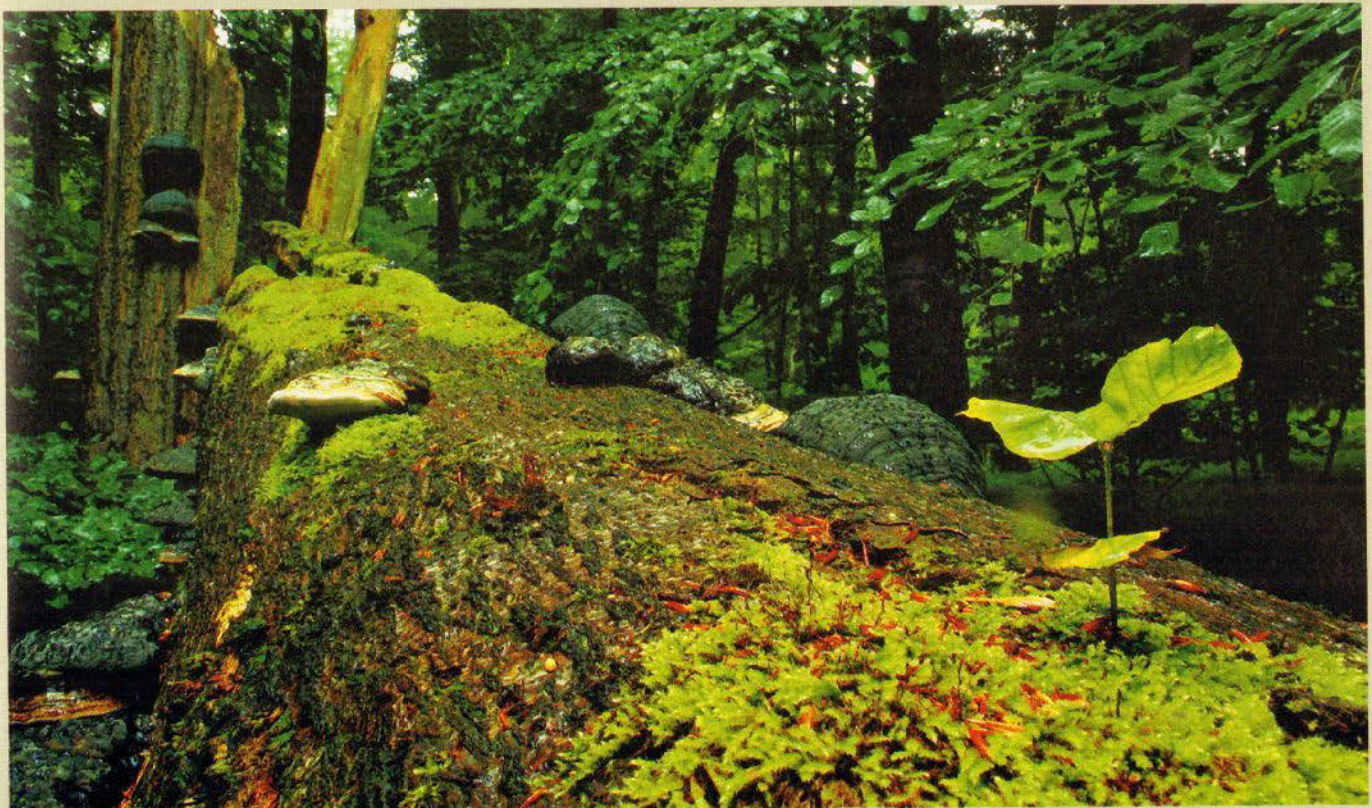
Diese Schutzmaßnahme hat sich über die Jahrtausende derart im Genom des Baumes verankert, dass es dazu selbst dann kommt, wenn man ihn in einem Gewächshaus vor Kälte schützt.

Auch andere Spezies bereiten sich nun auf den Winter vor. Vögel geben ihre Territorien auf, etliche Arten sammeln sich zum Zug in den Süden. Igel und Schlafmäuse haben sich Speckschichten für den Winterschlaf angeeignet, das Eichhörnchen versteckt Vorräte.

Doch ganz zum Erliegen kommt die Kreislaufwirtschaft des Waldes nie. Spitzmäuse, Rehe, Wildschweine, manche Spinnen und Käfer bleiben auch im Winter aktiv. Und geschützt unter den toten Blättern harren Samen und Larven, Parasiten und Wirte, Räuber und Beute auf die warmen Monate.

Darauf, dass der Zyklus des Lebens von neuem beginnt. □

Beratung: Prof. Peter Burschel, Landshut.



Ein neuer Baum keimt aus einem modernsten Buchenstamm, auf dem Zunderschwämme noch ihre Zersetzungsarbeit erledigen. Die dabei frei werdenden Mineralstoffe sind der Dünger für die junge Pflanze – so gebiert der Tod im Wald immer wieder junges Leben

WALD

Ein steter Wettkampf ums Licht

STECKBRIEF

+++ Knapp **45 Millionen** Quadratkilometer Fläche weltweit +++ Größte **Artenvielfalt** aller Ökosysteme
+++ Rund **90 Prozent** der pflanzlichen Biomasse +++



Die hohe Luftfeuchtigkeit im Regenwald bietet Epiphyten – Pflanzen, die auf Pflanzen wachsen – ideale Bedingungen

Wälder gedeihen dort, wo es nicht zu kalt wird und es genügend Wasser und Nährstoffe gibt. Konkurrieren müssen die Waldpflanzen daher nur ums Licht: Sie wachsen zumeist in die Höhe, um die volle Kraft der Sonne zur Photosynthese zu nutzen.

So haben sich vielschichtige Lebensräume gebildet: Anders als etwa im Grasland bietet ein Wald Tieren auch weit über dem Erdboden Wohn-, Versteck- und Klettermöglichkeiten. Stürzt ein Baum um, reißt er in den dichten Bewuchs zumeist eine Lücke, die



Die auffallenden Blüten des Kanonenkugelbaumes (benannt nach der Form seiner Früchte) werden unter anderem von Fledermäusen bestäubt



Faultiere leben, meist an einem Ast hängend, in den Kronen der Regenwald-bäume. Ihre langsamen Bewegungen sind eine Form der Tarnung

rasch besiedelt wird. So verjüngen sich Wälder ständig und formen Mosaiklandschaften aus Lichtungen, heranwachsenden Bäumen und altem Bestand.

Mit rund anderthalb Billionen Tonnen stellen diese Lebensräume rund 90 Prozent der pflanzlichen Biomasse an Land und haben sich in vielen Klimazonen ausgebreitet: in den Tropen etwa

als Regenwälder; an subtropischen und tropischen Küsten als Mangrovenwälder, die sich den Gezeiten und dem Salzwasser angepasst haben; in gemäßigten Breiten als Nadel- und meist sommergrüne Laubwälder.

Regenwälder sind die artenreichsten: Obwohl sie weniger als neun Prozent des Festlandes bedecken, leben hier rund 50 bis 75 Prozent aller Spezies der Erde. Auf einem Hektar Regenwald können bis zu 600 unterschiedliche Baumarten wachsen (im europäischen Laubwald meist nur fünf), mehrere tausend Käferarten einen einzigen Urwaldriesen bewohnen.

Der stockwerkartig aufgebaute Regenwald enthält mehr Kleinstlebensräume mit unterschiedlichen Bedingungen als jeder andere Wald. Möglicherweise hat zu der Artenvielfalt auch beigetragen, dass die Regenwälder, anders als etwa die Flora und Fauna Europas, während der Eiszeiten nicht zerstört wurden.

In der Enge des Regenwaldes sind raffinierte Überlebensstrategien entstanden: Viele Tiere tarnen sich, indem sie Rinde, Dornen oder Vogelkot imitieren.



Der Blaue Pfeilgiftfrosch warnt durch seine Farbe andere Tiere vor einem Angriff. Seine Haut enthält Gifte, die tödlich sein können

Giftige Tiere dagegen tragen grelle Farben, um Angreifer zu warnen.

Die gesamte Lebensgemeinschaft ist von einem wesentlichen Vorgang abhängig: Das ganzjährig feuchtwarme Klima sorgt für ununterbrochene Aktivität von



- Borealer Nadelwald
- Gemäßigter Laubwald
- Tropischer Regenwald

DIE GROSSEN WALDGEBIETE

Rund 30 Prozent des Festlandes sind von Wald bedeckt: Immergrüne Regenwälder wachsen in den Tropen, sommergrüne Laubwälder in gemäßigten, boreale Nadelwälder in kälteren Klimazonen

FORMEN DES WALDES



Laubwald wächst in den gemäßigten Zonen im Wechsel der Jahreszeiten. Verglichen mit den Tropen, gibt es hier nur wenige Baumarten



Borealer (nördlicher) Nadelwald gedeiht dort, wo Laubbäume nur schwer überleben, wie hier im Nordwesten Kanadas. Die Blätter der Nadelbäume widerstehen auch extremer Kälte



Immergrüner Lorbeerwald entstand vor über 2,5 Millionen Jahren. Er ist selten geworden, Reste gibt es etwa am Mittelmeer und, wie hier, auf Teneriffa



Jaguar sind die größten Raubkatzen Amerikas. Ihr Fell ist für diese Waldtiere im Wechselspiel von Licht und Schatten die perfekte Tarnung

Pilzen, Bakterien und anderen Bodenlebewesen. Sie zersetzen tote Pflanzen und Tiere fünf- bis zehnmal schneller als in europäischen Wäldern und stellen die Nährstoffe schnell wieder zur Verfügung. Pilze befallen absterbende Blätter noch am Baum. Tastwurzeln entnehmen Stoffe direkt aus der verrottenden Blattstreu.

Dieser zügige Kreislauf garantiert den permanenten Nachschub an Mineralstoffen für den hoch produktiven Regenwald – obwohl die Böden unfruchtbar sind.

WÄLDER IM PROFIL



Laubwälder gemäßiger Breiten werfen ihre Blätter im Herbst ab (l.). Im Frühjahr können Kräuter das Licht nutzen, um auszutreiben. Wenn die Blätter neu ausgebildet sind, ziehen sich diese „Frühblüher“ in die Erde zurück; andere Kräuter und Gräser, die weniger Licht brauchen, wachsen heran (M.). Im stets be-

laubten Regenwald (r.) haben sich Pflanzen den konstanten Lichtverhältnissen angepasst und Spezialisten für jede Sonnenintensität hervorgebracht. So sind „Stockwerke“ mit jeweils eigenen Pflanzen- und Tiergesellschaften entstanden. Da die Humusschicht oft nur wenige Zentimeter dick ist, sind die Bäume Flachwurzler.

GRASLAND

Die Heimat der großen Herden

STECKBRIEF

+++ 24 Millionen Quadratkilometer Graslandfläche weltweit +++ Größter Teil der Pflanzen liegt unter der Erde +++ Grasböden oft sehr fruchtbar



60 Millionen Bisons grasten einst in der nordamerikanischen Prärie. Heute sind es noch rund 200 000



Präriehunde, kleine Nager, verdanken den Namen ihrem Gebell. Ihre unterirdischen Kolonien erstrecken sich häufig über mehrere Quadratkilometer

Wo es für Wälder zu trocken und für Wüsten zu feucht ist, breiten sich in vielen Gebieten der Erde Gräser aus. Sie können lange Dürrezeiten überstehen und wachsen rasch nach, wenn sie von Tieren abgefressen werden. Die Wachstumszonen der Gräser sind geschützt, weil sie nahe der Erdoberfläche liegen und nicht an der Spitze des Halms. So können

sie von unten schnell Biomasse nachschieben. Selbst nach Bränden schicken sie rasch Triebe aus dem aschegedüngten Boden.

Botaniker fassen die Regionen, in denen Gräser (neben Kräutern und vereinzelt Bäumen) wachsen, als Grasländer zusammen. Sie unterscheiden die Savanne – das Grasland der Tropen und Subtropen – von der Prärie, Step-



Kanincheneulen nisten in offenen, baumlosen Landschaften unter der Erde. Beim Wache stehen vor ihrer Höhle rasseln die Vögel wie Klapperschlangen

pe und Pampa – den Grasländern der gemäßigten Zonen.

Da alle oberirdischen Pflanzenteile von Gräsern Photo-

synthese betreiben, ist der jährliche Zuwachs an Biomasse außerordentlich hoch. Nährstoffreiche Grasländer ernähren daher große Mengen wandern-



Schwarzfuß-Iltisse, in der Natur fast schon ausgestorben, werden gezielt wieder ausgewildert. Die Hauptnahrung dieser Tiere sind Präriehunde

der Pflanzenfresser wie etwa Gnus oder Bisons.

Der Nachwuchs dieser Tiere kann oft schon sofort nach der Geburt laufen, um mit der Herde Schritt zu halten. Geschwindigkeit ist in diesem Lebensraum ein wichtiger Überlebensvorteil – nirgendwo sonst haben sich so schnelle Landtiere entwickelt,

etwa Gabelbock oder Gepard (siehe Seite 92).

Den scharfkantigen Hufen der Gnus oder Bisons kann die Grasdecke aufgrund ihres dichten Wurzelwerks standhalten – so reißt der Boden nicht auf. Zudem geben ihm die Verflechtungen auch Struktur. Weil die Erde nicht gleich nachrieselt, können Wühler wie Hamster oder Mäuse ihre Höhlen und Gänge graben.

Beim Anlegen der Bauten bringen sie abgestorbene Pflanzen in den Boden ein. Regenwürmer und Mikroorganismen zersetzen sie und sorgen dafür, dass die darin enthaltenen Mineralstoffe schon bald den Pflanzen wieder zur Verfügung stehen.

Da die gesamte oberirdische Biomasse im Herbst abstirbt, werden die gebundene Energie und Minerale so schnell wieder abgebaut wie in keinem anderen Ökosystem. Zudem sind Gräser und Kräuter sehr viel rascher zersetzbar als zum Beispiel abgestorbenes Holz.

■ Gemäßigte Breiten
■ Tropen und Subtropen



DIE LAGE DER GRÜNFLÄCHEN

Grasland ist eine typische Vegetationsform in den gemäßigten, tropischen und subtropischen Klimazonen. Die größten zusammenhängenden Grasgebiete der Welt finden sich in Afrika und Asien

VERSCHIEDENARTIGE GRASLAND-FORMEN



Savanne Bäume wie die Schirmakazien besiedeln afrikanische Grasländer. Dornen und Gift schützen sie gegen Pflanzenfresser



Pampa Die patagonische Steppe erstreckt sich zu beiden Seiten der Anden im Süden Lateinamerikas. Die dort lebenden, flugunfähigen Nandus sind ausdauernde Läufer



Langgras Tussocks – Büschelgräser – sind eine in Neuseeland häufige Vegetationsform. Die größten werden bis zu 2,50 Meter hoch



Brände, etwa durch Blitzschlag, zerstören die Vegetation nur oberflächlich, erhalten aber das Grasland, indem sie die Entstehung von Wäldern verhindern

In Grasländern wie der Prärie unterbrechen starke Trockenheit und Kälte jedoch immer wieder den Abbau: Dann stellen die Bodenorganismen ihre Aktivität nahezu ein. Weil sie im nächsten Frühling vor allem frisches Material zersetzen, reichern sich die noch nicht verarbeiteten Reste als Humus im Boden an und werden erst allmählich mineralisiert.

Diese Humusdecke ist ein gigantischer Nährstoffspeicher und macht die Böden zu den fruchtbarsten der Welt. In Nordamerika sind deshalb weite Teile der Prärie in Acker- und Weideland umgewandelt worden. Statt Bisonherden grasen dort heute Rinder, wächst Weizen und Mais.

UNSICHTBARES WACHSTUM



Der größte Teil der pflanzlichen Biomasse in der Prärie (wie in jedem Grasland) steckt im Boden. Von den Gräsern, die als Langgras (links) und Kurzgras (rechts) vorkommen, wächst nur etwa 15 Prozent oberirdisch, der Rest breitet sich in der Tiefe aus – je nach Bodenbeschaffenheit oft als meterlange Wurzeln und unterirdische Sprosse. Präriehunde sammeln zudem Gras zur Auspolsterung ihres

Baus und bringen so weiteres organisches Material in den Boden ein. In den trockeneren Gebieten der Prärie bildet sich ein dichter Wurzelfilz nahe der Oberfläche, um jeden Tropfen Feuchtigkeit aufzusaugen, noch ehe er verdunstet. Ein Quadratmeter dieser Grassoden kann Wurzeln von insgesamt mehr als neun Kilometer Länge ausbilden. In den feuchteren Regionen wachsen die Wurzeln teilweise bis in acht Meter Tiefe.

WÜSTE

Vielfältiges Leben trotz Wassermangels

STECKBRIEF

+++ 42 Millionen Quadratkilometer Fläche weltweit +++
Niederschlag geringer als 200 Millimeter im Jahr +++ Meist hohe
Temperaturschwankungen zwischen Tag und Nacht +++

Die afrikanische Namib beherbergt zahlreiche Tier- und Pflanzenarten – viele leben im Sand verborgen

Wüsten gehören zu den unwirtlichsten Gebieten der Erde. Mit Niederschlägen von weniger als 200 Millimeter im Jahr sind sie vegetationsarm und trockener als jeder andere Lebensraum – und zudem einer intensiven Sonnenbestrahlung und sehr starken täglichen Temperaturschwankungen ausgesetzt.

Man unterscheidet Fels-, Geröll-, Sand-, Ton- oder Salzwüsten (sowie Eisküsten). In Vollwüsten kommt es zu weniger als 100 Millimeter Jahresniederschlag; Regen



Wüstenrennmäuse können ihren Urin so konzentrieren, dass sie damit fast nur noch Schadstoffe ausscheiden – und kaum Wasser verlieren



Oryxantilopen kühlen das Blut in den Nasenhöhlen und senken so per Wärmetausch die Temperatur des zum Gehirn strömenden Blutes

fällt dort oft über Jahre nicht – und dann nach langer Dürre in kurzen, heftigen Gewittern. Halbwüsten sind geringfügig feuchter und liegen meist in der Übergangszone zum Grasland.

Lebewesen müssen sich auf diese unsteten Umweltbedingungen einstellen und das wenige Wasser optimal nutzen. So haben Pflanzen zahlreiche Strategien entwickelt, Feuchtigkeit in ihren Geweben zu speichern oder erst dann zu keimen, wenn genügend Wasser zur Verfügung steht (siehe Seite 71). Einige Tiere wie

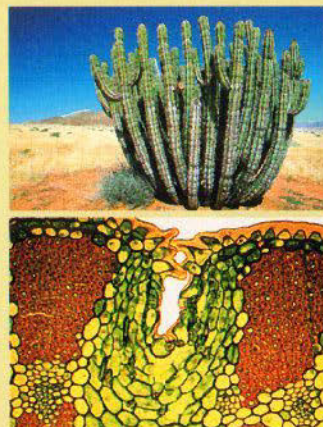
die Wüstenrennmäuse trinken nicht, sondern gewinnen das gesamte Wasser aus der Nahrung: Es entsteht beim Verdauen durch chemische Reaktionen. Um Futterknappheit vorzubeugen, legen zahlreiche Wüstennager unterirdische Samendepots an. Wanderheuschrecken dagegen leben zeitweise nomadisch und ziehen in großen Schwärmen zu immer neuen Nahrungsplätzen.

Viele Organismen passen sich an die unvorhersehbaren Schwankungen in der Wüste an, indem sie sich erst dann paaren, wenn die besten Chancen bestehen, Futter zu finden. Um der Hitze zu entkommen, bauen Kaninchen, Echsen oder Mungos Gänge; sie leben tagsüber im Untergrund und kommen erst im Dunkeln an die Oberfläche.

Die älteste Vollwüste der Welt ist die Namib – ein 100 bis 150 Kilometer breiter und etwa 1500 Kilometer langer Streifen an der Atlantikküste Südwest-Afrikas. Mit fünf bis 85 Millimeter Jahresnie-

derschlag gehört diese Wüste zu den trockensten überhaupt. Dennoch hat sich dort im Vergleich zu anderen extremen Trockengebieten eine erstaunliche Vielfalt von Organismen entwickelt.

Dazu trägt unter anderem der in der Namib regelmäßig auftretende Nebel bei. Der bildet sich über einem kühlen Meeresstrom



Wasser speichern Wüstenpflanzen wie dieses Wolfsmilchgewächs in ihren Körpern. Die Spaltöffnungen sind zum Schutz vor Verdunstung abgesenkt



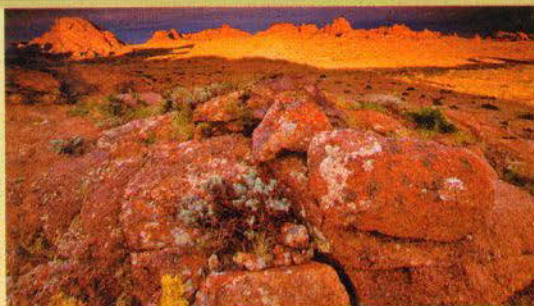
DIE WÜSTEN DER ERDE

Die Trockengebiete der Welt dehnen sich größtenteils nördlich und südlich der Tropen aus, so die Sahara im Norden und die Namib im Süden Afrikas, die Gobi im Inneren Asiens und die Atacama im Westen Südamerikas

WÜSTENTYPEN



In Halbwüsten wie der nordamerikanischen Sonora wachsen weitaus mehr Pflanzen als in den trockeneren Vollwüsten – etwa Säulenkakteen



Aus Felswüsten wie der Gobi, einer der größten der Erde, hat der Wind feines Material weggeblasen. Einige Pflanzen verankern ihre Wurzeln hier in Gesteinsrissen



Salzwüsten wie in der chilenischen Atacama entstehen, wenn Flüsse salzhaltiges Material in Ebenen schwemmen. Beim Austrocknen bleibt das Salz zurück

auf dem Atlantik und wird durch Winde bis zu 80 Kilometer landeinwärts getragen. Zahlreiche Flechtenarten decken ihren gesamten Wasserbedarf dadurch, dass sie mit ihrer verzweigten Oberfläche die winzigen Tröpfchen aus der Luft aufnehmen.

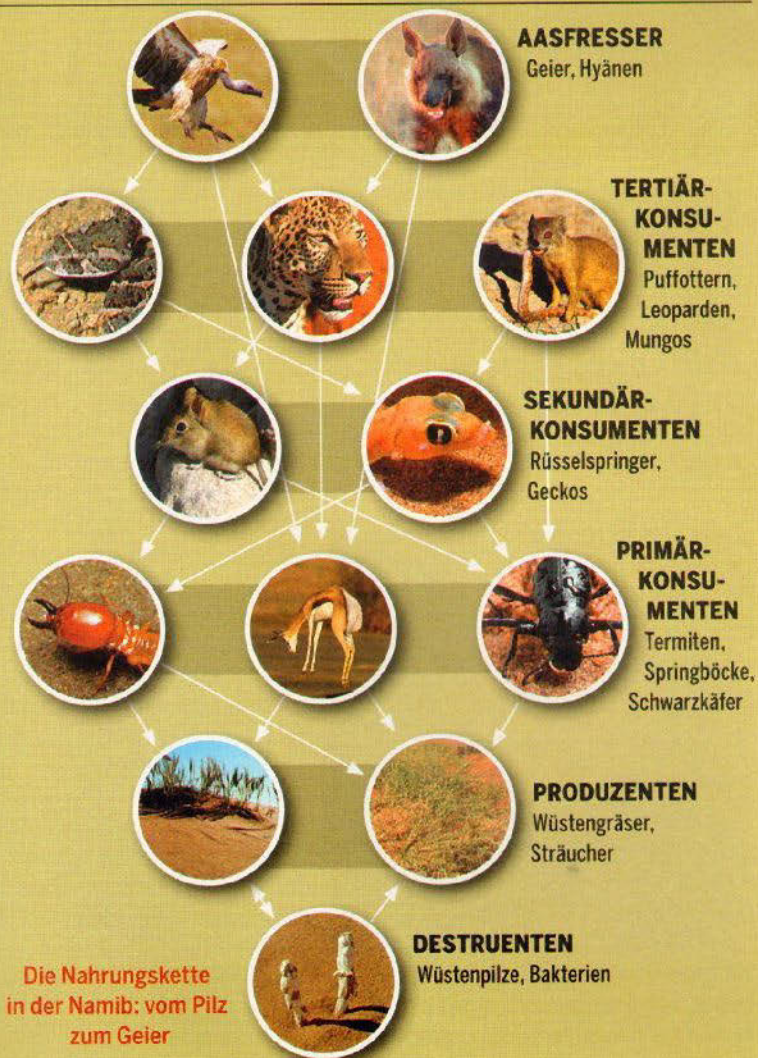
Auch Schwarzkäfer profitieren davon. Sie stellen sich morgens hochbeinig auf die dem Meer zugewandte Seite einer Sanddüne und neigen ihren Kopf zu Boden. Dann warten sie, bis Nebelwasser an ihren Flügeldecken kondensiert – und ihnen anschließend in die Mundöffnung läuft.



Auf der Flucht vor Feinden formt die Namib-Radspinne mit ihren Gliedern ein Rad und rollt die Dünen hinab. Sie selbst jagt unter anderem kleine Geckos

WER ERNÄHRT WEN?

Nahrungsnetz in der Namib: Produzenten wie etwa Gräser gehören zu den wichtigsten Energiequellen dieser Wüste. Zum einen werden sie, sobald sie sterben, von Pilzen (Destruenten) abgebaut. Zum anderen liefern sie zum Beispiel Schwarzkäfern oder Termiten (Primärkonsumenten) als Futter organisches Material. Diese Tiere wiederum ernähren als Jagdopfer mit ihren proteinreichen Körpern Geckos oder Rüsselspringer (Sekundärkonsumenten), die schließlich von Räubern – Puffottern, Leoparden, Mungos – gefressen werden (Tertiärkonsumenten). Tierische Kadaver werden meist von Aasfressern verzehrt – so von Geiern und Hyänen, die typischerweise in Afrikas Trockengebieten vorkommen.



SÜSSWASSER

Steter Kampf gegen Strömung, Dürre, Sauerstoffmangel

STECKBRIEF

+++ 2 Millionen km²: 1,35 Prozent der Landfläche weltweit +++ Oft sehr **unterschiedliche Lebensräume** im gleichen Gewässer +++

In Gebirgsbächen haben sich die Bewohner der Kälte und Kraft des Wassers angepasst

Jährlich verdunsten mehr als 400 000 Kubikkilometer Wasser aus den Meeren, kondensieren und gehen als Regen oder Schnee nieder, etwa ein Drittel davon über dem Land. Dort, wo sich das Wasser auf dem Rückweg zum Meer sammelt, entstehen fließende und stehende Gewässer – darunter Ströme, Flüsse oder Bäche sowie Seen, Teiche, Moore und

periodisch überflutete Feuchtgebiete.

Süßwasserlebewesen haben unterschiedliche Strategien zur Sauerstoffversorgung entwickelt. Fische sind bekanntlich mit Kiemen ausgestattet, aber auch viele Insektenlarven atmen mit Kiemen; andere nehmen Sauerstoff aus der Luft über einen Schnorchel auf, den sie durch den Oberflächenfilm des Wassers stechen. Wieder andere Organismen speichern Luft am Körper, so bestimmte Wanzen, oder in Vorratsbehältern – wie die Wasserspinne, die sich aus Fäden eine Art Taucherglocke spinnt.

Wenn Flüsse oder Seen trocken fallen (in heißen Regionen oft monatelang), graben sich Kaimane oder Schildkröten eine Zeit lang in den Schlamm ein. Als wechselwarme



Fischotter gehören zu den wenigen Säugetieren Europas, die ständig in Flüssen oder Seen leben. Zur Isolierung tragen sie ein wasserdichtes Fell

Tiere verbrauchen sie in Ruhe nur sehr wenig Energie.

Der afrikanische Lungenfisch hat eine andere Methode entwickelt: Er wühlt sich ebenfalls in den Schlamm, schützt sich aber mit einer schleimigen Hülle, die nach und nach verhärtet. Wahrscheinlich mithilfe seiner Schwanzspitze hält er einen schmalen Kanal vor seinem Maul frei, damit er atmen kann. Bis zu zwei Jahre übersteht der Fisch so – und baut dabei zur Energieversorgung allmählich seine Muskelmasse ab.

Kleinere Organismen wie Kiemenfußkrebse, Wasserflöhe oder

Radertierchen verenden dagegen, produzieren aber zuvor Eier, in denen ihre Nachkommen die Dürrezeit überdauern.

Viele Lebewesen haben sich im Süßwasser zudem auf bestimmte Bereiche spezialisiert: Flüsse oder Bäche zum Beispiel bieten den Bewohnern unterschiedliche Lebensräume, je nach Entfernung zur Quelle. Fließt das Wasser schnell, etwa am Oberlauf, reißt es Luft mit und reichert sich mit Sauerstoff an (siehe Grafik). Fische, die sich in der starken Strömung halten oder sogar gegen sie bewegen wollen, müssen gute Schwimmer sein und wie die Lachse eine kräftige Muskulatur ausgebildet haben – für die sie viel Sauerstoff brauchen.

An der Mündung ist das Wasser dagegen meist sauerstoffärmer. Hier siedeln Organismen wie die roten Zuckmückenlarven, in deren Körperflüssigkeit der Blutfarbstoff Hämoglobin zirkuliert, der Sauerstoff sehr effektiv bindet und transportiert.



Die Wasseramsel taucht in Bächen nach Insektenlarven, kleinen Krebsen und Fischen, im Winter vor allem nach Schnecken und Wasserasseln



DIE VERTEILUNG DES WASSERS

Rund vier Millionen Kubikkilometer Süßwasser zirkulieren in Flüssen, sind weltweit in Seen gespeichert oder – der weitaus größte Anteil – im Eis der Gletscher und Polkappen gebunden

SÜSSWASSTERTYPEN



In Seen, hier in Minnesota, USA, ist die oberste Schicht meist pflanzen- und algenreich. Deren Biomasse ernährt Bewohner tieferer Zonen



Moore wie das im polnischen Bialowieza verlanden allmählich, denn abgestorbene Pflanzen verrotten in ihrem Wasser kaum – so sammelt sich immer mehr Material an



Das Binnendelta des Okavango (Botswana) wird in der Regenzeit fast völlig überflutet – anders als bei vielen Strömen fehlt der Abfluss ins Meer

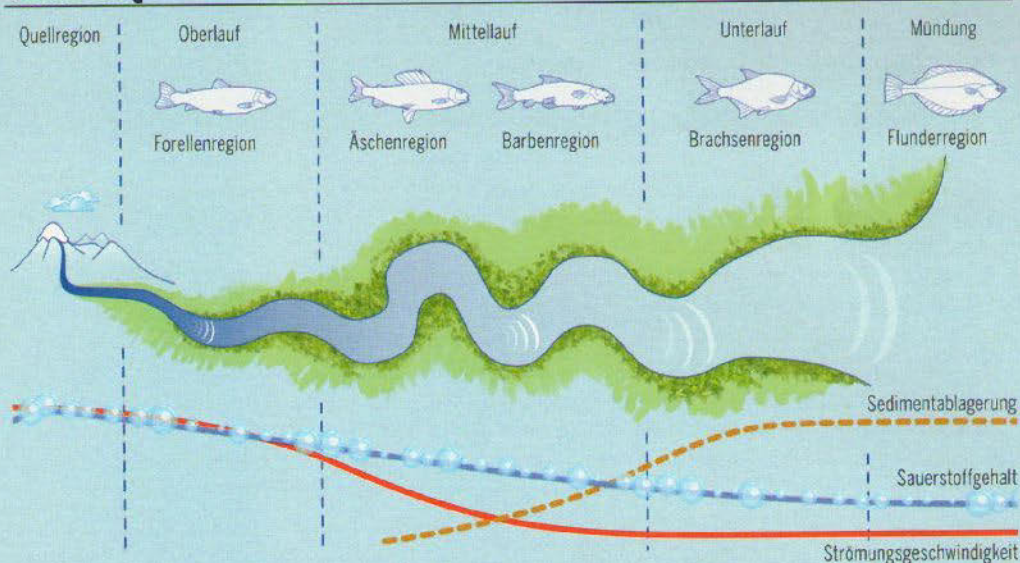


Bachforellen jagen in schnell fließenden Gewässern nach Insektenlarven, Kleinkrebsen und Fröschen – jeder größere Fisch im eigenen Revier

Auch Seen haben Zonen mit eigenen Siedlungsgemeinschaften. Daher teilen Biologen den Lebensraum See je nach Lichtverhältnissen in zwei Bereiche. In der vom Sonnenlicht durchfluteten Schicht nahe der Oberfläche gedeihen etwa Algen und liefern die Nahrungsgrundlage für Kleinstorganismen, die wiederum von Fischen oder Muscheln gefressen werden.

Im dunklen Bereich leben Bodenbewohner wie Bakterien, manche Insektenlarven und Würmer von herabsinkender organischer Substanz. Ihre Zone hat einen Vorteil: Ist der See tief genug, gefriert das Wasser dort im Winter nicht, und seine Bewohner können die kalte Jahreszeit überleben – die oberste Schicht aus Eis wirkt wie ein Isoliermantel.

VON DER QUELLE BIS ZUR MÜNDUNG



Ströme, Flüsse oder Bäche gliedern sich in fünf Regionen: Quelle, Oberlauf, Mittellauf, Unterlauf und Mündung. Strömungsgeschwindigkeit und Wasserturbulenz nehmen von der Quelle bis zur Mündung ab. Auch der Sauerstoffgehalt verringert sich, da einerseits langsam fließendes Wasser weniger durchmischt wird, andererseits die Temperatur steigt. Je ruhiger das Gewässer strömt, desto mehr mitgeschwemmtes Gestein lagert sich ab. So entstehen ganz unterschiedliche Lebensräume. Forellen etwa brauchen als sehr aktive Raubfische das sauerstoffreiche, kalte Wasser des Oberlaufs, an dessen felsigem Grund sie ihre Eier ablegen. Äschen bevorzugen weniger reißende Strömung und kühles, klares

Wasser – und kommen dort vor, wo der Bach zum Fluss wird. In diese Zone wandern die Barben nur für die Fortpflanzung. Sonst bevorzugen sie das ruhiger fließende Wasser des Mittellaufs. Im Unterlauf strömt das Wasser meist noch gemächlicher. Fische mit hohen, kaum stromlinienförmigen Körpern wie etwa die Brachsen haben sich hier etabliert; sie jagen nicht, verbrauchen so weniger Bewegungsenergie und damit weniger Sauerstoff. Pflanzenwuchs an den Ufern bietet vielen Tieren Nahrung. Verstecke und Brutzonen – die Artenvielfalt nimmt zu. Mündet ein Fluss schließlich ins Meer, mischen sich Süß- und Salzwasser. Hier leben Fische wie die Flundern, die Brackwasser vertragen.

MEER

Der Ursprung alles Lebendigen

STECKBRIEF

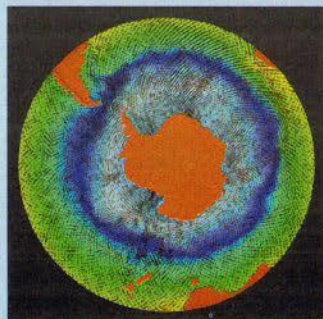
+++ 361 Millionen km² Fläche +++ 1,375 Milliarden Kubikkilometer Wasser +++ Bis zu 11 000 Meter tief +++ Stete Durchmischung durch gewaltige Ströme +++



Manche Eisberge sind so kompakt, dass einfallendes Licht bei der Brechung blau erscheint

Meere bedecken fast drei Viertel der Erdoberfläche. In ihnen ist vor über 3,5 Milliarden Jahren das Leben entstanden, und hier hat es mehr Tierstämme und Körperformen hervorgebracht als in jedem anderen Ökosystem.

Gewaltige Strömungen wälzen die Wassermassen ständig um. Dadurch werden Minerale und Organismen über größere Distanzen transportiert als in jedem Landlebensraum – teilweise über mehrere tausend Kilometer. Ob-



Der Zirkumpolarstrom (weiß/blau), getrieben vom Westwind, umspült die Antarktis und versorgt die Ozeane mit Nährstoffen und Sauerstoff

wohl alle Ozeane miteinander in Verbindung stehen, haben sich viele unterschiedliche Lebensgemeinschaften entwickelt – so in wechselhaften Gezeitenzonen, in flachen Küstengewässern, in tropischen Korallenriffen oder in den bis zu 11 000 Meter tiefen, lichtlosen Weiten der Tiefsee.

Mit wenigen Ausnahmen sind alle Meeresbewohner von einer flachen Zone pflanzlicher Produktivität kurz unter der Wasseroberfläche abhängig. Denn für den Aufbau von Biomasse mittels Photosynthese brauchen auch Meerespflanzen Licht – und das dringt nur maximal 250 Meter tief unter die Oberfläche.

In dieser Schicht entwickeln sich zahlreiche pflanzliche Organismen. Etwa winzige einzellige Algen, die als Plankton im Meer driften. Oder bis zu 60 Meter langer Tang, der in den küstennahen Kelpwäldern der gemäßigten Regionen gedeiht. Wenn Lebewesen absterben, sinken sie in die Tiefe: als Nahrung für Quallen und

Fische sowie Bodentiere wie Seesterne und Würmer.

In der Tiefsee (die nach Ansicht der meisten Meeresbiologen in 1000 Meter Tiefe beginnt) sind wahrscheinlich Millionen von Arten noch unentdeckt. Das Wasser übt dort einen gewaltigen Druck aus: Zehn Kilometer unter der Meeresoberfläche etwa ist er 1000-mal höher als oben.

Um nicht zerquetscht zu werden, haben daher zahlreiche Tiefseebewohner sehr viel Wasser in ihre Gewebe eingelagert, denn Flüssigkeiten sind kaum komprimierbar.





Eisfische haben einen körpereigenen Bio-Frostschutz, der den Gefrierpunkt ihres Blutes senkt und sie im Südpolarmeer überleben lässt



Krill ist in der Antarktis die wichtigste Nahrungsquelle der Bartenwale. Die durchsichtigen Kleinkrebse weiden winzige Algen an Eisschollen ab

In der dort herrschenden Dunkelheit verständigen sich Tiere oft mit Leuchtorganen, etwa auf der Suche nach einem Partner. Die Anziehungskraft des Lichts nutzen auch Tiefseeräuber wie der Anglerfisch: In der Spitze eines langen Fortsatzes leben Leuchtakterien, deren Schein

-  Küstenschelf
-  Tiefsee/Hadal
-  Korallen



ZONEN DER WELTMEERE

Schelfmeere reichen von den Kontinentalküsten bis in durchschnittlich 133 Meter Tiefe; unterhalb von 6000 Metern liegt das Hadal, die tiefste Zone der Meere. Korallenriffe entstehen vorwiegend im Flachwasser

MEERESFORMEN



Ebbe und Flut lassen den Wasserspiegel an den Küsten schwanken. Viele Tiere und Pflanzen haben sich dem ständigen Auf und Ab angepasst



Korallenriffe, die unzähligen Fischarten Nahrung und Schutz bieten, werden in Jahrzehntausenden von Polypen aufgebaut. Die empfindlichen Tiere brauchen klares, warmes Wasser



In der finsternen Tiefsee lockt der Anglerfisch seine Beute mit einem Leuchtorgan (über dem Maul) an, dessen Licht Bakterien erzeugen

Beutetiere direkt vor das riesige Maul des Fisches lockt.

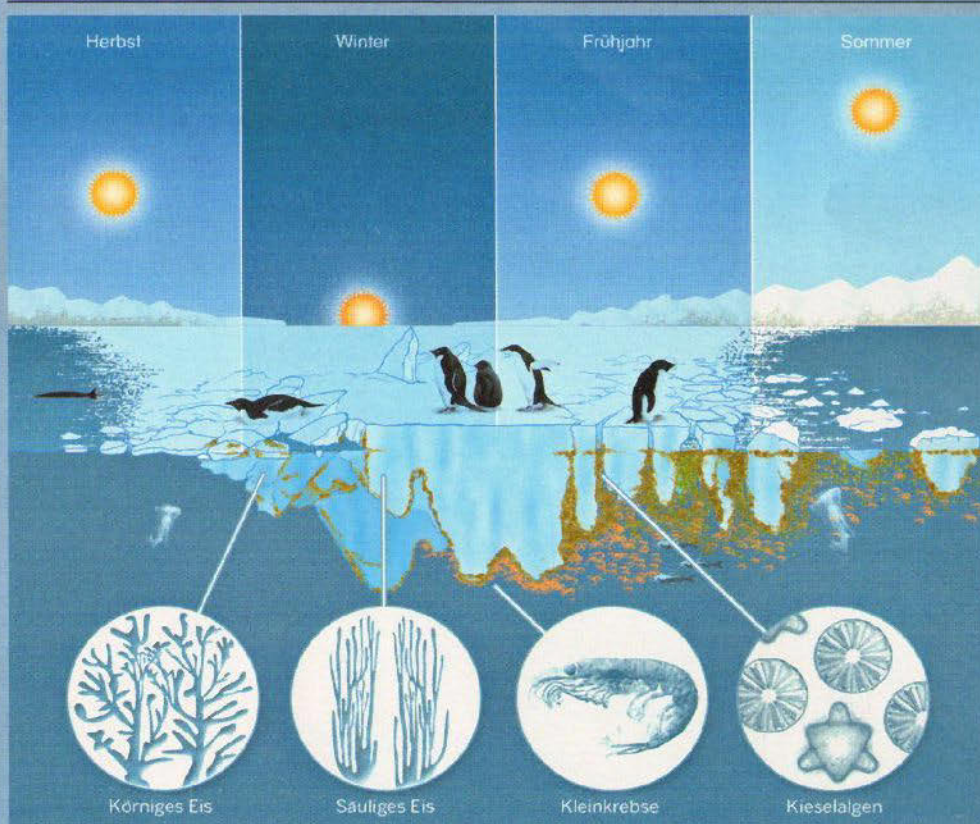
Auch in den lichtdurchfluteten tropischen Korallenriffen haben winzige Lebewesen eine zentrale Funktion: Algen im Inneren von millimetergroßen Polypen befähigen ihre Wirte durch ein komplexes chemisches Gleichgewicht dazu, Kalk auszuscheiden. Auf diese Weise haben die Polypen Riffe geschaffen – Unterwasser-Gebirge mit unzähligen Verstecken für andere Organismen.

Selbst in den eisigen Gewässern der Arktis und Antarktis können Tiere überleben: Sie halten ihr Blut mit natürlichen Frostschutzmitteln flüssig. Andere Kaltwasserbewohner fahren ihren Stoffwechsel herunter, wachsen langsam, haben lange Entwicklungszyklen – und werden dadurch sehr alt.

Antarktische Meerasseln etwa brauchen 20 Monate, bis sie aus ihren Eiern schlüpfen; bei manchen Seeigeln reifen Eizellen über zwei Jahre lang heran. Für einen Stachelhäuter besonders alt wird der in der Antarktis siedelnde Seestern *Odontaster validus*; vermutlich 100 Jahre.

Texte: Götz Froeschke, Rainer Harf, Jörn Auf dem Kampe, Dr. Stefanie Rudolph; Illustrationen: Eric Tscherne

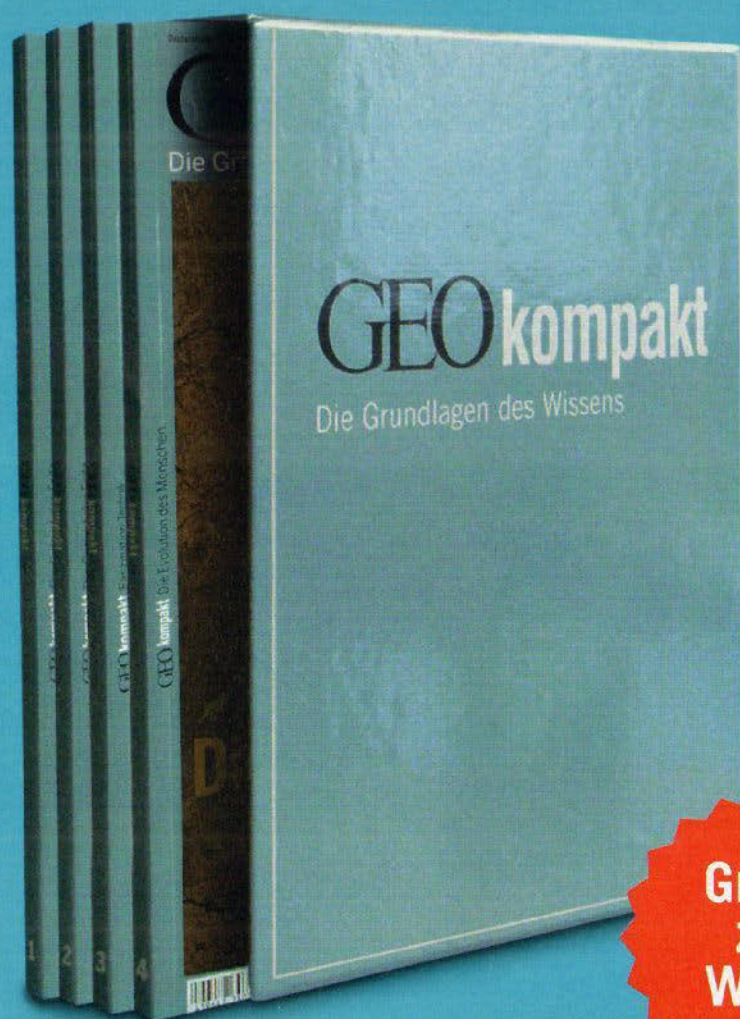
EISIGER KREISLAUF



Die wechselnden Strukturen des Eises bestimmen das Leben der Organismen im Polarmeer: In der von Herbststürmen aufgewühlten See bildet sich zunächst körniges Eis. Das wird im Winter fester; mit zunehmender Dicke entstehen feine, senkrechte Kanäle, die das Licht in tiefere Schichten dringen lassen. So können sich an der Unterseite der Schollen Kieselalgen ansiedeln, die Photosynthese betreiben. Davon ernähren sich Floh- und Ruderfußkrebse, die das Eis von unten abweiden. Bei der Frühjahrsschmelze breiten sich die Algen rasch aus, die Kleinkrebse vermehren sich schnell – und ernähren dann unter anderem Fische, Wale, Robben und Pinguine.



GEOkompakt – die Wissensbibliothek zum Sammeln.
Jetzt mit einem Dankeschön Ihrer Wahl!



Bergmann-Uhr »1955«

Edles Design und ein präzises Schweizer Quarzwerk zeichnen diese Uhr aus. Cremefarbenes Zifferblatt mit aufgesetzten Metallziffern und Datumsanzeige. Braunes PU-Lederarmband, gewölbtes Mineralglas, Einzelnummerierung. Gehäuse: ø ca. 39 mm.

**Gratis
zur
Wahl!**



GEOkompakt-Sammelbox

Die praktische Sammelbox schützt Ihre wertvolle Sammlung vor Staub und gibt bis zu 7 Heften einen sicheren Stand.



**Gratis
zur
Wahl!**

Karte schon weg?
Sichern Sie sich GEOkompakt zum Vorteilspreis!
Bestellen Sie einfach per

Tel.: 01805/861 80 03*

E-Mail: Geokompakt-Service@guj.de

Bitte Bestellnummer angeben:

zum Selbstlesen: 469021, zum Verschenken: 469022

Haben Sie die ersten Ausgaben verpasst?

Verpasste GEOkompakt-Ausgaben können unter o. g. Telefonnummer
oder im Internet unter www.geo-webshop.de nachbestellt werden.

Sie erhalten die fehlenden Hefte für je € 8,- zzgl.
Porto und Verpackung.

GEOkompakt erscheint im Verlag
Gruner+Jahr AG & Co KG, Uwe Henning, Am Baumwall 11,
20459 Hamburg. AG Hamburg HRA 102257.

*12 Cent/Min.

Tauchen Sie ein in die Grundlagen des Wissens

GEOkompakt präsentiert die großen Themen der Allgemeinbildung in außergewöhnlicher visueller Opulenz, mit anschaulichen, leicht verständlichen Texten und Erklärungen. Lesen oder verschenken Sie jetzt 4-mal jährlich GEOkompakt: zum Vorzugspreis von nur € 29,-! Sie sparen über 9% gegenüber dem Einzelkauf. Als Dankeschön erhalten Sie die praktische GEOkompakt-Sammelbox oder die Bergmann-Uhr gratis!

Ihre GEOkompakt-Vorteile

- Sie sparen über 9% gegenüber dem Einzelkauf und erhalten als Dankeschön die praktische Sammelbox oder die Bergmann-Uhr gratis!
- Lieferung frei Haus!
- Nach 4 Ausgaben jederzeit kündbar!
- Geld-zurück-Garantie für bezahlte, aber nicht gelieferte Hefte!

Gleich oben stehende Karte ausfüllen und abschicken!

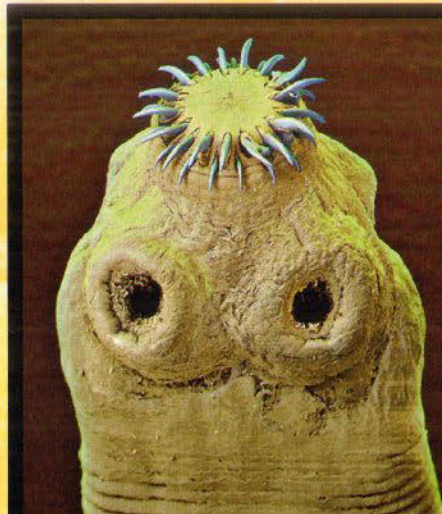
Kaum ein Organismus ist vor den saugenden, beißenden oder stechenden Schmarotzern sicher, die sich ungebeten einnisten und ihren Gastgeber mehr oder minder schwer schädigen und manchmal sogar umbringen. Parasiten (von griech. *parasitos* = „Schmarotzer“) haben in der Geschichte der Evolution eine der wohl erfolgreichsten Lebensweisen überhaupt entwickelt – und sich damit im Wettkampf der Arten behauptet. Denn meist fressen ja die Großen die Kleinen; Parasiten aber nagen in der Regel als Winzlinge an einer riesenhaften Beute – und erschließen sich damit eine ergiebige Energiequelle.

Biologen schätzen, dass wohl die Hälfte aller Arten auf Erden zumindest Phasen ihres Daseins parasitisch verbringen. Allein den Menschen befallen mehr als 300 parasitische Wurmarten. Zahlreiche Läuse, Milben und Flöhe leben auf der Oberfläche ihrer Wirtsorganismen, wo sie Blut saugen oder Hautschuppen fressen.

Auch unter Gewächsen gibt es einen Hang zum Schmarotzen. Über 3000 Pflanzenarten bilden spezielle Organe aus (**Haustorien**), mit deren Hilfe sie in andere Gewächse eindringen und ihnen Nährstoffe entziehen. So zapft die immergrüne Mistel die Versorgungsleitungen von Bäumen an, auf denen sie siedelt, um an Wasser und die darin gelösten Mineralsalze zu kommen.

Doch während die Blätter der Mistel immerhin Photosynthese betreiben und auf diese Weise lebensnotwendige Zuckerverbindungen selbst produzieren, bilden einige parasitische Pflanzen kaum noch das dafür notwendige Blattgrün Chlorophyll aus und beziehen den Zucker, den sie brauchen, einfach gleich aus der Wirtspflanze.

Die Kleeseide etwa führt auf der Suche nach einem geeigneten Wirt kreisende Wachstumsbewegungen aus



KATZENBANDWURM

Größe: bis 60 cm lang, ca. 5 mm breit

Wirt: Hauskatzen, auch Hunde; Zwischenwirte sind Mäuse und Ratten

Lebensweise: Katzen fressen Nager (Zwischenwirte), in denen Larvenstadien des Wurms leben, und scheiden Wurmeier mit dem Kot aus

Auswirkung: Würmer sind Nahrungskonkurrenten im Darm der Endwirte, die deshalb langsamer wachsen oder stark abmagern

KRIEBELMÜCKE

Größe: 2 bis 5 mm lang

Wirt: Säugetiere, z. B. Mensch, Rind

Lebensweise: Weibchen saugen Blut, legen etwa 250 Eier in Fließgewässer ab, aus denen Larven schlüpfen. Weltweit sind mehr als 1500 Arten bekannt

Auswirkung: Der Stich ist schmerzhaft, das Speichelsekret giftig; kann bei Massenbefall Immunschock auslösen

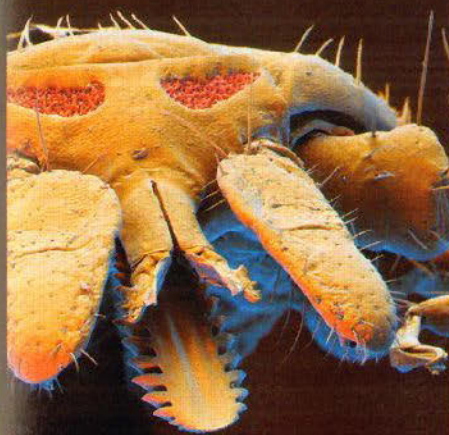


Parasiten leben von den Nährstoffen anderer Organismen. Um ihren Wirt zu finden, setzen sie auf ausgefallene Tricks – wie der Kleine Leberegel, dessen Larven Ameisen manipulieren, damit Schafe sie aufnehmen

und umschlingt diesen bei Berührung. Schließlich rankt sie als nahezu chlorophyllfreie, bleiche Windenpflanze an ihm empor, während sie zahlreiche Haustorien in das Gewebe treibt. Nicht selten hungert sie ihre Wirtspflanze dabei so aus, dass diese abstirbt.

Doch um sich nicht die Ernährungsgrundlage zu entziehen, versucht ein Parasit zumeist, seinen Versorger nicht lebensgefährlich zu schädigen. So leben manche Schmarotzer über lange Zeiträume mit ihrem Wirt zusammen – einige Bandwürmer speisen bis zu 20 Jahre lang in dessen Darm.

Die Plagege



SCHILDZECKE

Größe: 2 bis 4, vollgesogen bis 8 mm lang

Wirt: Wirbeltiere; die Gattung Ixodes befällt z. B. Kleinnager, Rotwild, aber auch Menschen und Haustiere

Lebensweise: saugt Blut – auch schon als Larve und Nymphe – und erkennt einen Wirt an Körperdüften

Auswirkung: kann gefährliche Krankheiten übertragen, z. B. Borreliose (Verursacher: Bakterien) und Hirnhautentzündung (Viren)

BLUTEGEL

Größe: 0,5 bis 50 cm; ca. 200 Arten

Wirt: vor allem Säugetiere

Lebensweise: lebt etwa in stehenden Gewässern. Nimmt Opfer durch Wellenbewegung und Geruch wahr, schwimmt darauf zu, heftet sich mit seinem Saugnapf fest und saugt Blut

Auswirkung: kann Wirt durch Blutverlust schwächen; hemmt Blutgerinnung. Medizinische Anwendungen z. B. bei Krampfadern, Rheuma, in der Chirurgie



BREMSE

Größe: bis zu 30 mm

Wirt: Säugetiere, auch Menschen

Lebensweise: Weibchen saugen Blut, legen 100 bis 1000 Eier. Larven leben im Schlamm am Uferstrand, Männchen ernähren sich von Nektar

Auswirkung: Stiche irritieren u. a. Nutzvieh, deshalb weniger Milchleistung



Für den Wirt kann jedoch auch ein Mitesser, der ihn nicht umbringt, eine schwere Belastung sein: Zusätzliche Nahrungskonkurrenz kostet Kraft. Wird etwa ein Rind von sehr vielen Blutegeln auf einmal befallen, kann es so viel Blut verlieren, dass es stirbt. Außerdem schädigen die Schmarotzer gelegentlich so sehr die Organe, in denen sie nisten, dass über die Wunden dann Bakterien und Viren einzudringen versuchen.

Diese Krankheitserreger nutzen zudem nicht selten die Parasiten selbst als Überträger – wie zum Beispiel das spiralförmige Bakterium *Borrelia burg-*

dorferi, der Erreger der Borreliose, der häufigsten durch Zecken übertragenen Krankheit in Deutschland.

Wie abhängig die Parasiten von ihren Wirten sind, zeigt sich besonders deutlich bei den **Endoparasiten**, die das Innere eines Tieres als Lebensraum nutzen. Denn spätestens mit dem Tod des Wirtes kann dieser seine Funktion als Ernährer nicht mehr erfüllen. Stirbt der Versorger, muss der Schmarotzer sicherstellen, dass entweder er selbst oder sein Nachwuchs andere Wirte erreichen.

Um die Wahrscheinlichkeit eines Fortbestehens der Art zu erhöhen, produzieren manche Parasiten so viele Nachkommen wie möglich. Der Schweinespulwurm scheidet bis zu 200 000 Eier am Tag aus, die über den Kot des Schweins ins Freie gelangen. Der Rinderbandwurm bringt es täglich sogar auf über eine Million Eier; die zwölf bis 15 randvollen, aus abgefallenen Körpergliedern bestehenden Pakete gelangen mit dem Wirtskot in die Außenwelt.

Um zusätzliche Vervielfältigung bemüht, haben viele Parasiten in ihrem Lebenszyklus zudem Stadien eingeschaltet, durch die sie ihre Nachkommenzahl nochmals extrem erhöhen können.

Viele potenzielle Wirtstiere versuchen den Schmarotzern deshalb von vornherein zu entgehen: Kühe vertreiben mit ihrem Schwanz lästige Insekten, manche Wildpferde ziehen sich in Stunden erhöhten Pferdebremsenflugs

eister

Text: Rainer Harf



KLEINER LEBEREGEL

Größe: 6 bis 10 mm lang

Wirt: Schafe, Hunde, Rinder. Die geschlechtsreifen Egel leben in den Gallengängen der Wirte; ihre Eier werden mit dem Kot der Tiere ausgeschieden

1. Zwischenwirt: Landschnecken nehmen die Eier mit der Nahrung auf. Larven entwickeln sich in zwei Zystenstadien im Gewebe der Schnecke, wandern dann in deren Atemhöhle und werden mit einem Schleimballen ausgeschieden

2. Zwischenwirt: Ameisen fressen die Schleimballen mit den Larven, die sich in ihnen einnisten und ein weiteres Zystenstadium entwickeln. Die Ameisen werden – in Grashalme verbissen – von Schafen aufgenommen, wodurch diese sich infizieren

Auswirkung: bei starkem Befall Abmagerung der Schafe. Die Leber infizierter, geschlachteter Tiere muss vernichtet werden

von ihren Wasserstellen zurück, und Grillen unterbrechen ihre abendlichen Paarungsgesänge, wenn parasitische Fliegen Jagd auf sie machen.

Hat der Schmarotzer einen Körper jedoch erst einmal befallen, bemüht sich der Wirt, den ungebetenen Gast so schnell wie möglich wieder loszuwerden. Viele Fische lassen sich an besonderen Plätzen im Riff von „Putzer-garnelen“ nach Parasiten absuchen; Schweine suhlen sich, um mit dem getrockneten Schlamm Milben und andere Hautparasiten abzureiben. Im Laufe der Evolution haben die Wirbeltiere zudem ein hochkomplexes Immunsystem entwickelt, das zahlreiche Eindringlinge erkennt und ausschaltet.

Um diese Abwehrwaffen zu überwinden, haben viele Parasiten ihrerseits aufgerüstet und versuchen das Immunsystem eines Wirtstieres mit ausgeklügelten Mechanismen auszu-

tricksen: So verändern beispielsweise die einzelligen Parasiten der *Trypanosoma-brucei*-Gruppe, die beim Menschen zur Schlafkrankheit führen, ständig die Aminosäuren-Zucker-Ketten ihrer Oberfläche, um sich dem Wirt in immer neuer Gestalt zu präsentieren.

Eine besonders geschickte Strategie hat der Pärchenegel ausgebildet: Er hält sich als geschlechtsreifer Wurm etwa in den Darmvenen seines Versorgers auf, wo er wirtseigene Moleküle abfängt und sie in seine Körperoberfläche einbaut. So täuscht er dem Immunsystem vor, er sei ein Teil des Wirtes und deshalb harmlos – setzt also gleichsam eine Tarnkappe auf.

Wissenschaftler gehen davon aus, dass sich Wirt und Parasit im Laufe der Evolution immer von neuem aufeinander eingestellt haben, um ihren wechselseitigen Krieg mit immer raf-

finierten Taktiken zu bestreiten: ein Phänomen, das die Forscher „ko-evolutionäres Wettrüsten“ nennen.

Dabei ist es zu den erstaunlichsten Spezialisierungen und teils grundlegenden Abwandlungen der Anatomie gekommen: Die Fliegenart *Drosophila carcinophila* etwa kann sich nur noch in den Gruben des dritten Kieferfußes – eines Teils des Kauapparates – einer nur auf bestimmten Karibikinseln heimischen Landkrabbe entwickeln. Und der Wurzelkrebs *Sacculina carcini* wächst in seinem Wirt, einer Strandkrabbe, in Form eines netzartigen Geflechts heran.

Oft machen sich Parasiten das Verhaltensrepertoire ihrer Wirte zunutze: Der Kuckuck ist das wohl bekannteste Beispiel eines Brutschmarotzers. Er baut kein eigenes Nest mehr, sondern legt jeweils ein Ei in die Nester anderer Vögel.

Dabei bevorzugt er die Nester seiner eigenen „Zieheltern“-Art. Da die meisten Vögel die Farbe und Größe ihrer eigenen Eier sehr genau kennen, werfen sie fremde Eier aus dem Nest. Der Kuckuck jedoch legt je nach Individuum Eier, die denen der jeweiligen Zieheltern ähneln („Ei-Mimikry“). Diese nehmen das Kuckucksei daher gar nicht als fremd wahr und brüten es aus. Nach dem Schlüpfen wirft das Kuckucksjunge die Konkurrenten aus dem Nest und wird von den Pflegeeltern allein großgezogen.

Manche Parasiten, etwa verschiedene Insekten, greifen sogar in die biochemische Trickkiste: Die Larven des in Ameisennestern lebenden Käfers *Atemeles pubicollis* scheiden zunächst Sekrete aus „Besänftigungsdrüsen“ und dann solche aus „Adoptionsdrüsen“ aus, um sich von den sonst gegenüber Eindringlingen aggressiven Ameisen umsorgen zu lassen. Offensichtlich haben die von den Käferlarven ausgeschiedenen Stoffe und ein exakt auf ihren Wirt abgestimmtes Bettelverhalten eine so überzeugende Wirkung, dass die Ameisen die Eindringlinge stärker füttern und pflegen als die eigenen Larven. Um zum Käfer heranzureifen, sind die Käferlarven völlig auf die Versorgung durch die Wirtsameisen angewiesen.

Auf welch bizarre Weise sich manche Parasiten in ihrem Lebenszyklus an unterschiedliche Wirte und deren Ver-

FILZLAUS

Größe: 1 bis 1,2 mm lang

Wirt: Mensch

Lebensweise: lebt als blutsaugender Parasit vor allem in der Schamregion, aber auch an Achsel- und Barthaaren sowie Augenbrauen. Übertragung ist nur durch direkten Körperkontakt möglich

Auswirkung: Sekrete aus den Mundwerkzeugen verursachen starken Juckreiz und graublaue Hautverfärbung



MÜCKEN

Größe: 5 bis über 20 mm, je nach Art

Wirt: vor allem Säugetiere und Vögel

Lebensweise: Weibchen saugen Blut (aber nicht bei allen Arten), um ihre bis zu 400 Eier zur Reife zu bringen und sie dann zumeist im Wasser abzulegen, wo sich die Larven entwickeln

Auswirkung: übertragen viele Krankheitserreger – so die von Malaria, Gelb- und Denguefieber

MENSCHENFLOH

Größe: bis 4 mm lang

Wirt: Mensch, seltener Haustiere, Dachs, Fuchs

Lebensweise: Erwachsene Tiere saugen Blut (können bis zu einem Jahr hungern). Weibchen legen nach und nach bis zu 450 Eier, die sich am Boden entwickeln

Auswirkung: Juckreiz und Schwellungen. Einige Arten wie der Rattenfloh übertragen Krankheiten

haltensweisen angepasst haben, macht der Kleine Leberegel deutlich: Der zirka ein Zentimeter lange Saugwurm lebt in den Gallengängen der Leber etwa von Schafen, wo er zahlreiche Eier produziert und sie mit der Gallenflüssigkeit in den Darm des Wirtes entlässt. Von dort gelangen sie mit den Fäkalien hinaus. Schnecken kriechen über den infizierten Kot und fressen die Eier.

Aus ihnen schlüpfen bewimperte Larven, die sich durch den Schneckendarm bohren und im Gewebe einnisten. Über zwei nacheinander geschaltete **Zystenstadien** reifen nun neue, mit einem Ruderschwanz ausgestattete Larven her-

an, die in die Atemhöhle der Schnecke kriechen und diese durchbohren. Das führt zu einer Reizung der Lungenschleimhaut der Schnecke, die dann von Larven bevölkerte Schleimballen „ausspuckt“.

Der Schleim zieht wiederum Ameisen an – und die nehmen beim Fressen die Ruderschwanzlarven auf. Im Inneren der Ameise nisten sich die Larven erneut ein und machen eine weitere Wandlung durch. Lediglich eine wandert in den Kopf der Ameise und bohrt sich in einen Teil ihres Nervensystems.

Dieser „Hirnwurm“ bewirkt eine folgenswerte Veränderung im Verhalten

der Ameise: Anstatt bei Einbruch der Dunkelheit in ihren Bau zurückzukehren, verbeißt sich das infizierte Tier nachts in die Spitze eines Grashalms – und wird so von weidenden Schafen gefressen. Die Ameisen werden im Darm des Schafes verdaut, die Larven kommen frei und wandern über den Gallengang in die Leber, wo sie zum nun ausgewachsenen Egel reifen. Dann beginnt der Zyklus von neuem.

Erst wenn die Wirtes im Lauf der Evolution ein Gegenmittel entwickeln, werden sie sich zur Wehr setzen können.

Sofern der Parasit nicht auch darauf mit einer neuen Strategie antwortet. □

Wirt und Parasit haben sich mit der Zeit einander angepasst



Die Sexualität – das Jammertal der Natur

Wer erst einmal erfahren hat, wie es Tiere und Pflanzen so miteinander treiben, der wird sich nie wieder über das angeblich komplizierte Geschlechtsleben von uns Menschen beklagen

Einige der größten Irrtümer des Menschengeschlechts betreffen die menschliche Sexualität. Wir Menschen sind der Ansicht, dass unsere Sexualität und die Liebe psychologisch kompliziert sind. Wir glauben, dass Männer und Frauen es nicht immer leicht miteinander haben.

Deswegen ist auch die Kunst entstanden, die Gedichte handeln praktisch fast von nichts anderem. Wie anders als für Walther von der Vogelweide, den bedeutenden Minnesänger, aber stellen sich die Dinge für eine männliche Riesenwanze dar.

Der Riesenwanzmännchen oder Wanzenbock muss, wie ich gelesen habe, seinen vielköpfigen Nachwuchs ununterbrochen umhertragen, bis dieser endlich aus den Eiern schlüpft, und wird von seiner Lebensgefährtin mit körperlicher Gewalt zur Brutpflege gezwungen. Welche Gedichte würde solch ein Wesen schreiben, wenn es denn könnte?

Was die Sexualität betrifft, kommt einem Mutter Natur geradezu böse vor. Denn einerseits wollen die Lebewesen es unbedingt tun, sie sind darauf programmiert und haben nicht wirklich die Wahl. Andererseits nützt die Natur das aus und treibt ihre liebeshungrigen Mitglieder in die absurdesten Situationen hinein.

Der Meerschweinchenmann etwa versiegelt die Vagina seiner Partnerin nach der Befruchtung mithilfe eines selbst gebastelten Keuschheitsgürtels. Und ausgerechnet der Wal, seit den 1970er Jahren das Lieblingstier der Alternativszene, unter anderem, weil er so schön singen kann, ist ein notorischer Vergewaltiger.

Und selbst bei einem Lebewesen von geringer Intelligenz und schwach ausgeprägter Sensibilität, sagen wir einem

Spinnenmännchen, muss sich ein Gefühl der Irritation oder sogar des Selbstzweifels einstellen, wenn ihm nach vollzogenem Liebesakt plötzlich die innere Stimme zu- raunt: „Brich dir dein Genitalorgan ab, auch wenn der Abschied schwer fällt. Stell keine Fragen. Tu's einfach.“

Die Tierfrauen sind aber nicht grundsätzlich besser. Sie fressen die Männer

»Der Schmetterling
ist aus der Sicht der
Blume eine Art
Penis mit Flügeln. Aber
er ist kein Macho«

auf, verlangen von ihnen entwürdigende Balzrituale oder lassen sie gegeneinander auf Leben und Tod kämpfen, während sie selbst sich einen schönen Lenz machen. Die Sexualität ist das Jammertal der Natur.

Eigentlich haben, aus männlicher Sicht, jene Skorpione die beste Lösung des Triebproblems gefunden, die ihre Samen einfach als Päckchen zur Abholung für ihre Weibchen, falls zufällig Interesse besteht, am Wegesrand bereitstellen und danach sehen, dass sie schnell wegkommen. Nachteil: Dieser Liebesakt ist extrem unpersönlich.

Eine gewissermaßen humane, weil gewaltfreie und relativ sanfte Lösung des Problems haben ausgerechnet die Pflanzen gefunden. Ein wichtiges, wenn nicht das wichtigste Geschlechtsorgan der Pflanzen ist nämlich gar nicht an der

Pflanze selbst befestigt, sondern führt sein eigenes, selbstständiges Leben. Ich finde diese Interpretation gewagt, aber zulässig: Der Schmetterling ist aus Sicht der Blume eine Art Penis mit Flügeln.

Erstaunlicherweise ist der Schmetterling aber kein völliger Macho. Schmetterlinge prügeln sich nie und sind immer sanft mit der Blume. Auf den Flügeln allerdings tragen manche von ihnen ein Muster, das an die Totenkopftätowierung eines Rockers erinnert.

Für das Tierreich wäre dieses Modell der fliegenden Penisse aber nicht praktikabel, weil Tiere viel zu temperamentvoll sind. Die Geschlechtsteile der Spinnen, der Wanzen oder der Hirsche würden aus Rivalität ununterbrochen gegeneinander kämpfen, die Tiere würden wahrscheinlich aussterben.

Was daraus folgt? Wir Menschen haben, zumal im 21. Jahrhundert, von allen Lebewesen das Sexualitätsproblem wahrscheinlich am besten gelöst. Zumindest theoretisch erwarten wir ein gewisses Maß an Sympathie und Rücksichtnahme voneinander. Zwar gibt es auch bei uns alle Arten von Verbrechen und Gewalt aus sexuellen Motiven, aber es ist, anders als bei den Wanzen, verboten und wird bestraft. Trotzdem wird über die angeblich so komplizierte Liebe unentwegt geklagt.

Bei etlichen Lebewesen geht es auch ohne Sex, enthaltsam, durch Teilung oder Ableger, Sex also muss nicht sein. Bei den Menschen vertritt offensiv diese Position fast nur der Couturier Karl Lagerfeld in seinen Interviews. Lagerfeld ist ja auch ein kreativer und intellektuell facettenreicher Mann, gegen eine Teilung oder eine Ablegerbildung von Karl Lagerfeld hätte in der Kulturszene gewiss niemand ernstlich etwas einzuwenden.

Warum überhaupt das Ganze, wozu Sexualität, wo es doch nachweislich auch schmerzfreie Methoden der Gattungserhaltung gibt? Zu den erschütterndsten Erkenntnissen dieses Heftes gehört jene, dass die Mischung des Erbgutes, die

beim geschlechtlichen Umgang zustande kommt, möglicherweise und unter anderem dem Schutz vor Parasiten dient. Die Lebewesen müssen ihr Erbgut dauernd durchmischen, um den Parasiten weniger Angriffsfläche zu bieten.

Das heißt, wir und unsere Leidensgefährten im Reich der Natur tun dies alles – diese Anstrengung, dieser Stress, auch die hohen Kosten für die Kinder! –, damit wir nicht über kurz oder lang von Schmarotzern aufgefressen werden.

Auch ein extrem missratenes, ununterbrochen das Nervenkostüm belastendes Kind oder ein rundum unerfreulicher Lebenspartner sind dennoch besser, als von einer Riesenwanze oder sonst was Krabbelbeinigem gefressen zu werden, auch wenn dieses Geschöpf sich anschließend misslaunig das Geschlechtsteil abbeißt, wen tröstet das schon.

Nicht die Insekten, sondern die Parasiten sind sowieso die heimlichen Herrscher der Erde, das wird oft gesagt, ähnlich, wie

Parasitenparasitenparasiten die Unübersichtlichkeit des Herrschaftssystems ins Unerträgliche steigern.

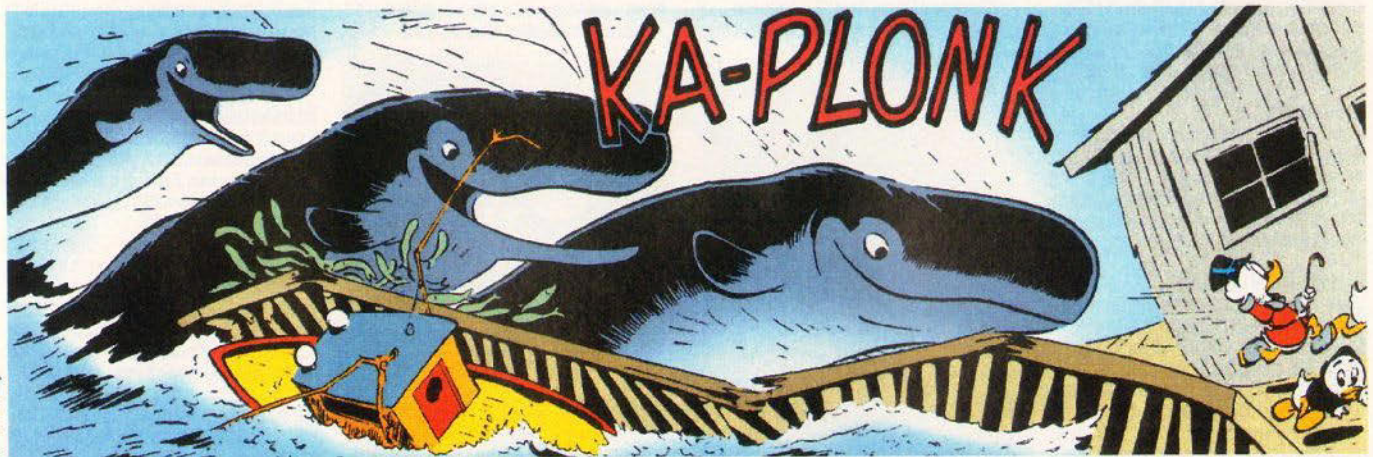
Die Macht der Parasiten finde ich deswegen beunruhigend, weil dieses Heft gleichzeitig eine Vielzahl von Informationen über außerhumane Intelligenz und außerhumanes Organisationstalent enthält. Makrelen schließen sich zusammen wie Demonstranten und jagen solidarisch Raubfische in die Flucht – warum sollte den Parasiten trotz ihres beschränkten geistigen Horizontes und wie im Horrorfilm nicht eines Tages ähnliches gelingen? Die Makrele ist ja auch nicht gerade der Einstein unter den Wasserbewohnern.

Aber die Parasiten sind zum Glück auf uns als Nahrungsquelle angewiesen, wie München auf Deutschland als Münchenbewunderer angewiesen ist und China

Wir Menschen überschätzen uns andauernd, und wir unterschätzen die anderen Lebewesen.

Früher waren wir arrogant und dachten, dass nur Menschen so richtig sensibel sind. Der Rest der Erdbewohner, dachten wir, kriegt nicht viel mit. Jetzt wissen wir, dass sogar eine Schlange sich in ihr Gegenüber hineinversetzen kann, dass Spatzen im Team arbeiten, dass ein Augenring-Sperlingspapagei sich Namen merkt, was ich persönlich zum Beispiel nicht kann, dass ein Papagei abstrakt zu denken vermag und dass Affen manche Leute sympathisch finden, andere Leute dagegen nicht, was exakt meiner eigenen Haltung entspricht.

Im Grunde sind nämlich wir, die Menschen, die unsensiblen Typen, die nichts mitkriegen! Offenbar führen wir uns in der Natur auf wie ein Chef, der sich den Geburtstag seiner Sekretärin und die Zahl



früher oft von München als heimlicher Hauptstadt Deutschlands oder von China als heimlicher Weltmacht die Rede war.

Die Parasiten sind sogar so mächtig, dass sie sich, was mir neu war, den Luxus leisten, ihrerseits auch wieder Parasiten zu haben. Und zwar so viele, dass in manchen Wäldern ein Drittel der Population aus Parasitenparasiten besteht.

Das sind dann sozusagen die heimlichen Herrscher über die heimlichen Herrscher, so lange zumindest, bis die ersten

auf den Rest der Welt als Markt. Nur deswegen funktioniert wahrscheinlich die Koexistenz.

In den letzten Jahren hat die Wissenschaft immer mehr über die Intelligenz und das psychologische Einfühlungsvermögen der Tiere herausgefunden. Zusammenfassend könnte man sagen:

ihrer Kinder nicht merken kann, von ihr aber wegen des kaputten Differenzials in seinem BMW ausgiebig getröstet werden möchte. Wir Menschen sollten im Umgang mit Schlangen und Sperlingspapageien ein bisschen bescheidener sein.

Und Bäume kriegen Schlaganfälle – Embolien, genauer gesagt. Wussten Sie das? Eine Embolie ist im Grunde eine Art Schlaganfall, oder? Nicht mal der Schlaganfall also gehört uns auf Erden ganz allein. □

Kurz und knapp

Wichtige Fachbegriffe – präzise erklärt. Die Zahlen geben an, auf welchen Seiten sie vorkommen und wo sie (blau hervorgehoben) zum Verständnis eines Textes besonders wichtig sind

Aminosäuren

Organische Verbindungen mit mindestens einer Carboxylgruppe ($-\text{COOH}$) und einer Aminogruppe ($-\text{NH}_2$). Wegen dieser Endgruppen verbinden sie sich leicht zu Ketten. Eiweißstoffe sind aus 22 verschiedenen A. aufgebaut; für den Menschen sind neun von ihnen essenziell, der Körper kann sie nicht aufbauen, sie müssen mit der Nahrung aufgenommen werden. (56, 71, 142, 168)

Anorganisch

Alle Verbindungen, die keine **Kohlenstoff-Wasserstoff-Bindungen** enthalten. Das sind nur zwei Prozent aller bekannten Stoffe, etwa Kochsalz, Ammoniak, Schwefelsäure. (51, 55, 57, 72, 73, 141)

ATP (Adenosintriphosphat)

Chemische Verbindung, die bei der Spaltung der im **Molekül** enthaltenen Phosphatbindungen **Energie** abgibt. Mit deren Hilfe werden bestimmte Energie verbrauchende Prozesse in der Zelle angetrieben, etwa die Muskelkontraktion. (55, 56)

Außenskelett

Feste Körperhülle etwa bei Gliedertieren, aber auch vielen Einzellern. Kann aus unterschiedlichen Materialien bestehen, wie **Chitin** (bei Krebsen und Insekten) oder Kalk (bei Einzellern und Schnecken). (94)

Autotroph

Bezeichnung für jene Lebewesen, die zum Aufbau ihrer Körpersubstanz Kohlendioxid als Kohlenstoffquelle nutzen. Hierzu gehören alle grünen Pflanzen, Algen sowie einige Bakteriengruppen. (53, 54)

Boten-RNS (mRNS)

Eine von drei in Zellen aktiven Arten von RNS (Ribonukleinsäure-Moleküle), die unterschiedliche Aufgaben bei der Produktion von Eiweißstoffen erfüllen. Die Boten-RNS überträgt dabei die genetische Information aus dem Zellkern an die **Ribosomen**: die **Proteinfabriken** der Zellen. Diese **Moleküle** dienen dort gewissermaßen als Matrizen für die Eiweißproduktion. (168, 169)

Botenstoffe

Hormone sowie verschiedene Substanzen des Immunsystems und Neurotransmitter. Bei Tieren Substanzen, die in bestimmten Drüsen und **Zellen** gebildet werden, von dort zu benachbarten Zellen oder über die Blutbahn zu den Zielorten transportiert werden, wo sie spezifische Reaktionen hervorrufen. Bei Pflanzen: Regulatorstoffe oder **Phytohormone**. (82, 87, 109, 114, 115)

Bottom-up-Kontrolle

Modell der Organisation von Lebensgemeinschaften, bei dem die Kon-

trolle durch das Angebot und die Begrenzung der Ressourcen „von unten her“ vollzogen wird: Die Mineralsalze und das **Licht** etwa kontrollieren das Pflanzenwachstum. Die B. kann sich fortsetzen zu den höheren **Trophie-Ebenen**, also denen der pflanzenfressenden Tiere und der Fleischfresser. (142)

Chitin

Stickstoffhaltiger Mehrfachzucker, weit verbreitet im Außenskelett der Gliederfüßer, aber auch in der Zellwand vieler Pilze. C. ist nach **Zellulose** der zweithäufigste Mehrfachzucker in der Natur. (94, 148)

Chlorophyll

Grüner Pflanzenfarbstoff, der **Licht** verschiedener **Wellenlängen** absorbiert und die Nährstoff- und Zuckersynthese in den Chloroplasten antreibt. (53, 54, 70, 71, 143, 156)

Chloroplasten

Organellen der Pflanzenzelle, in denen die **Photosynthese** stattfindet. (52, 54)

Chordatiere

Tierstamm mit den Unterstämmen Manteltiere (Urochordata), Schädellose (Acrania) und **Wirbeltiere** (Craniota oder Vertebrata). Namensgebend ist das im Rückenbereich

liegende Achsenskelett. Die Chorda ist bei den Wirbeltieren nur noch im Embryonalstadium vorhanden, erwachsene Wirbeltiere haben stattdessen eine Wirbelsäule. (43)

Dauergewebe

Fertig ausdifferenzierte pflanzliche Gewebe, die speziellen Funktionen dienen und ihre Zellteilung vorübergehend oder endgültig eingestellt haben – etwa die Leitungsgewebe. (82)

Destruenten

Vor allem Pilze und Bakterien, die organische Substanz, etwa aus Kadavern, faulenden Blättern und Exkrementen, aufnehmen und sie in **anorganische** Verbindungen umwandeln, z. B. Mineralsalze. (56, 57, 141)

Diasporen

Alle Pflanzenteile, die der Vermehrung und Ausbreitung dienen, wie Samen, Früchte, Knollen, Stolonen (= Ausläufer). (37, 39, 40)

Differenzierungsphasen

Zeiträume, in denen sich etwa in den pflanzlichen **Wachstumszonen** spezialisierte Zellen oder Gewebe herausbilden, wie etwa Schließzellen oder Wurzelhaare. (82)

Diffusion

Bewegung von kleinsten Teilchen, z. B. **Molekülen**, in Flüssigkeiten, Gasen oder durch selektiv durchlässige Membranen bis zur Gleichverteilung; diese bewegen sich dem Konzentrationsgradienten folgend aus Bereichen höherer in Bereiche niedrigerer Konzentration. Häufiger Mechanismus beim Gasaustausch. Beispiel: die Diffusion der Sauerstoff-Moleküle von den Lungenbläschen in die sie umgebenden, blutgefüllten Kapillargefäße (siehe **Osmose**). (104)

DNS (Desoxyribonukleinsäure)

Substanz, die in allen Lebewesen (Ausnahme: einige Viren) als Träger der **genetischen Information** fungiert. Das doppelsträngige Molekül besteht aus zwei Ketten, die strickleiterartig über jeweils zwei sich gegenseitig ergänzende Nukleinsäurebasen miteinander verbunden sind. Die DNS kann sich replizieren und bestimmt die ererbte Struktur der **Proteine** einer Zelle. (87, 113, 168)

Dunkelreaktion

Jene Reaktionen der **Photosynthese**, die zum Aufbau von Zucker führen. Da keine davon unmittelbar **Licht** benötigt, bezeichnet man sie als D., obwohl sie etwa von **ATP** aus den **Lichtreaktionen** abhängen und meist bei Tageslicht ablaufen. (54)

Einfachzucker

Etwa Traubenzucker (**Glukose**) oder Fruchtzucker (Fruktose). Bestehen aus nur einem Zuckerbaustein und zählen zur **Molekülklasse** der **Kohlenhydrate**. (50, 168)

Embryosack

Mehrzellige Struktur mit acht Zellkernen im Innern des **Fruchtknotens** der Blütenpflanzen. Hier findet die Befruchtung der Eizelle durch den **Spermakern** statt. (38)

Endoparasiten

Parasitische Organismen, die in anderen Lebewesen existieren. (157)

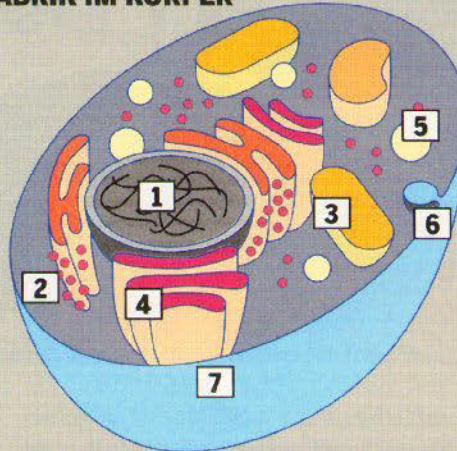
Endoplasmatisches Retikulum

Ausgedehntes Membrannetzwerk in **Eukaryoten**-Zellen. Das mit **Ribosomen** besetzte, raue E. R. dient der Produktion von **Proteinen** und Membranen; das glatte E. R. (ohne Ribosomen) ist beteiligt an **Kohlenhydrat**-Stoffwechsel und Entgiftung. (56)

Endosperm

Nährgewebe für den sich entwickelnden Pflanzenembryo. Mit zunehmender Entwicklungshöhe der bedecktsamigen Pflanzen (= Angiospermen) nimmt sein Anteil ab. Die Nähr- und Speicherefunktion übernehmen zunehmend die Keimblätter (Teile des Embryos). (38)

DIE FABRIK IM KÖRPER



Jede tierische wie pflanzliche Zelle, hier stark schematisiert, ist eine winzige weitgehend selbstständig funktionierende „Fabrik“. Der Zellkern (1) ist die Steuerzentrale, welche die Erbinformation (die Gen-Sequenzen der DNS) enthält. Dabei handelt es sich vor allem um Baupläne zur Herstellung tausender unterschiedlicher Eiweiße (Proteine). Dazu werden Kopien der Baupläne zu den Ribosomen geschickt (siehe Seite 168). Das sind kleine „Manufakturen“, die entweder frei im Zellplasma oder am Endoplasmatischen Retikulum (2) liegen und an denen Proteine hergestellt werden. Die chemische Energie dafür liefern die Mitochondrien (3), in denen Zucker mit Sauerstoff zu Kohlendioxid „verbrannt“ wird. Der Golgi-Apparat (4) ist die Umschlag- und Recyclingstation der Zelle. Lysosomen (5) bauen nicht mehr benötigte Stoffe ab. Membranbläschen (6) transportieren Moleküle, befördern Sekrete aus der Zelle hinaus oder nehmen Nährstoffe auf. Eine Zellmembran (7) umgibt die Zelle wie eine Haut und grenzt sie gegen die Umwelt ab (siehe Seite 167).

Energie

Gespeicherte Arbeitsfähigkeit eines Systems: also sein Vermögen, Arbeit zu leisten. Man unterscheidet kinetische E., Wärme-E., chemische E. und elektrische E. (24, 50, 51, 52, 53, 54, 55, 56, 57, 68, 69, 88, 96, 97, 100, 102, 103, 105, 115, 140, 141)

Entropie

Maß für die Unordnung in einem physikalischen System. Je größer die Unordnung der Objekte eines Systems, desto größer ist seine E. Materie strebt immer zur Unordnung. (52, 53, 56, 57, 104)

Enzyme

Überwiegend spezialisierte Eiweißstoffe, die als Katalysatoren für bestimmte chemische Reaktionen dienen, indem sie die Geschwindigkeit, mit der diese ablaufen, erhöhen. (56, 68, 73, 113, 114, 142)

Epiphyt

Pflanzen, die auf anderen Pflanzen, meist Bäumen, oft mithilfe besonderer Haftwurzeln festgewachsen sind. E. sind auf Wasserversorgung durch Niederschläge angewiesen (epiphytische Algen, Flechten und Moose). (71, 82)

Eukaryoten

Alle Lebewesen, deren Zellen einen Zellkern mit Doppelmembranhülle besitzen, der bei Bakterien und Archaeobakterien fehlt. E. sind die Protocysten, Pilze, Pflanzen und Tiere. (21, 43)

Fettsäuren

Organische Verbindungen aus längeren Kohlenwasserstoffketten mit einer endständigen Säuregruppe. Sie sind Bausteine etwa von Fetten sowie am Aufbau biologischer Membranen beteiligt. Fungieren auch als „Brennstoff“. (53, 55, 168)

Filament

Staubfaden der Blüte. (38)

Fruchtblatt

Weibliches Fortpflanzungsorgan der Blüte, bestehend aus Narbe, Griffel und Fruchtknoten. (38, 40, 42)

Fruchtknoten

Teil des weiblichen Fortpflanzungsorgans der Pflanzenblüte (siehe Fruchtblatt), in dem sich die Samenanlagen entwickeln. Aus dem Fruchtknoten entsteht die Frucht. (38)

Gen

Einheit der Erbinformation, die aus definierten Abschnitten des DNS-Moleküls besteht. Beispiel: Gene für die Augenfarbe. Der Mensch etwa hat 20 000 bis 25 000 verschiedene Gene, in denen die Erbanlagen festgelegt sind. (24, 25, 30, 38, 87, 88, 110, 113, 114)

Genetische Information

Gesamtheit aller vererbaren Merkmale und Eigenschaften, enthalten in der DNS. (38, 114)

Geschlechtliche (sexuelle)

Fortpflanzung

Hierbei bringen zwei Elternorganismen durch sexuelle Vereinigung Nachkommen hervor, von denen jeder eine einzigartige Kombination von Genen beider Eltern vorweist (siehe auch Meiose). (26, 87)

Glukose

Traubenzucker (Summenformel: $C_6H_{12}O_6$). Wichtigster Einfachzucker in der Natur. Vorkommen in freier Form: süße Früchte, Honig, Holz, Wurzel und Rinde vieler Laubbäume, Getreideähren und Blutzucker. Von zentraler Bedeutung als Endprodukt der Photosynthese sowie als Baustein von Mehrfachzuckern (Glykogen, Stärke, Zellulose). (53, 68, 168)

Hartsubstanzskelett

Ausgeprägt als Außen- (bei Insekten und Krebsen: aus Chitin) oder Innenskelett (bei Wirbeltieren: aus Knochen oder Knorpel). Tiere mit einem H. haben erhöhte Autonomie und Fähigkeiten in der Fortbewegung. Muskeln überspannen die Gelenke und sind über Sehnen mit den Skelettelementen verbunden, und es gibt art- oder gruppenspezifische Anpassungen von Skelett und Muskulatur an Bewegungsanforderungen. (94)

Haustorien

Einerseits Saugorgane verschiedenster Art, mit denen parasitische Pflanzen die Gewebe der Wirtspflanzen anzapfen. Andererseits nährstoffabsorbierende Hyphenspitzen parasitischer Pilze, die in das Gewebe des Wirtes eindringen. (156)

Hemimetabolie

Unvollständige Umwandlung; eine Form der Entwicklung bei vielen Insekten, etwa Heuschrecken, bei der die Larven den erwachsenen Tieren ähneln, aber kleiner sind und andere Proportionen haben. Über eine Reihe von Häutungen wächst die Larve zur vollen Größe heran und wird dabei der Form der Imago immer ähnlicher. (86)

Heterotroph

Bezeichnung für Lebewesen, die organische Verbindungen als Kohlenstoffquelle nutzen: sie ernähren sich von anderen Organismen (Pflanzen, Tieren) oder deren Abfallprodukten. (53, 55)

Holometabolie

Vollständige Umwandlung von einer Larve in ihre Adultform, die völlig anders aussieht und in der Umwelt oft eine ganz andere Funktion erfüllt als die Larve. Die Umkonstruktion erfolgt im Puppenstadium, in dem keine Nahrung aufgenommen wird und das Wochen bis Jahre dauern kann. (86)

Hydroskelett

Skelett, bei dem anstelle eines Hartsubstanzskeletts (etwa Knochen), ein Flüssigkeitspolster als Gegenspieler zur Muskulatur dient. Beispiel: Regenwurm. (94)

Imaginalscheiben

Bereich aus undifferenzierten Zellen in einer Insektenlarve, die bestimmt sind, während der Metamorphose zu erwachsenen Insekt bestimmte Organe zu bilden. (87, 88)

Imago

Erwachsenes, fertiges Insekt. (85, 88)

Innenskelett

Kommt vor allem bei Stachelhäutern und Chordatiern vor, aber auch bei einigen Einzellern. Meist besteht das I. aus spezialisiertem Bindegewebe wie Knorpel oder Knochen oder aus Hartsubstanzplatten, etwa aus Kalk; manchmal auch aus Flüssigkeit (siehe Hydroskelett). (94)

Juvenilhormone

Botenstoffe von Insekten, die bei Insektenlarven deren Häutung fördern, die Entwicklung zur Imago jedoch hemmen. (87, 88)

Keimwurzel (Radikula)

Wurzel, die schon im Pflanzensamen angelegt ist und bei der Keimung als Erste aus dem Samen wächst. (80)

Keimzellen

Samen- und Eizellen, die bei der sexuellen Vermehrung verschmelzen. (38)

Kelchblätter

Modifizierte Blätter bei Blütenpflanzen, welche die Blütenknospe umschließen und schützen. (38, 42)

Kilojoule (kJ)

= 1000 Joule. International gültige Maßeinheit für Energie. Ein Joule ist die Energiemenge, die man benötigt, um rund 100 Gramm einen Meter hoch zu heben. Wird heute auch für den Energiebedarf des Menschen verwendet, statt Kilokalorien (kcal). Umrechnung: 1 kJ = 0,239 kcal. In kJ wird die bei der Verbrennung (= Verdauung) von Nährstoffen im Organismus frei werdende Energie gemessen. Daraus lässt sich deren Energiegehalt berechnen. (50, 51, 53, 56, 57)

Kohäsionskraft

Der durch Molekularkräfte bewirkte Zusammenhalt der Moleküle eines Stoffes resultiert in der K.; sie ist die Ursache der Oberflächenspannung. Beispiel: Ein Tropfen, der auf einer Glasplatte nicht auseinander läuft, erweckt den Eindruck, er sei von einer dünnen Haut umgeben. (69)

Kohlenhydrate

Sammelbegriff für Einfachzucker, sowie Zweifachzucker und Mehrfachzucker. (55, 70, 141, 142)

Kohlenstoff

Chemisches Element mit dem Symbol C (für Carboneum nach lat. *carbo* = Kohle). In elementarer Form kommt K. in drei Modifikationen vor: Graphit, Diamant und Fullere-

ne (selten). Die größten Vorkommen sind in Karbonaten ($CaCO_3$), die ganze Gebirgsketten bilden. In Verbindungen ist der K. auf der Erde weit verbreitet; ohne diese wäre ein Leben hier nicht möglich, könnten etwa die Pflanzen keine Photosynthese betreiben. Der K.-Anteil an der obersten Erdkruste beträgt 0,087 Prozent, der am menschlichen Körper etwa 18 Gewichtsprozent. (50, 68, 72, 73)

Kohlenstoff-Verbindungen

Substanzen, die Kohlenstoff neben anderen chemischen Elementen enthalten. Es sind heute viele Millionen unterschiedlicher K.-V. bekannt – z. B. Kohlendioxid, Eiweißstoffe, Cholesterin, Kohlenwasserstoffe, Alkohole. Die Gewebe von Tieren und Pflanzen, wie Muskeln, Knochen und Blattgewebe, setzen sich überwiegend aus K.-V. und Wasser zusammen. (72)

Kohlenwasserstoffe

Chemische Verbindungen, die ausschließlich aus Kohlenstoff und Wasserstoff bestehen; sie stellen das Gerüst aller organischen Kohlenstoff-Verbindungen dar. (73)

Konsumenten

Lebewesen, die von anderen Organismen leben. (141)

Konvergenz

Die voneinander unabhängige Evolution ähnlicher struktureller, physiologischer oder verhaltensbiologischer Merkmale bei verschiedenen Arten, die auf gleicher Funktion beruht. Beispiel: strömungsgünstige Torpedoform der Körper bei Pinguinen, Tunfischen und Delfinen. (94, 119)

Kronblätter

Oft farbenprächtige Blätter der Blüte, deren Funktion es ist, Blütenbestäuber anzulocken. (38, 42)

Larve

Frei lebende, nicht geschlechtsreife Form im Entwicklungszyklus vieler Tiere. Sie kann sich von den erwachsenen Tieren in Aussehen, Ernährungsweise und Lebensraum unterscheiden. Ein Larvenstadium gibt es bei den meisten Wirbellosen – wie etwa Schnecken, Krebsen, Insekten – und manchen Wirbeltieren (bei Amphibien und den meisten Fischen). (85, 86, 87, 88, 109, 110, 142, 143, 158, 159)

Leitbündel

Strang von Leitgefäßen, bestehend aus Xylem und Phloem, im Spross von Pflanzen. (101)

Lichtquant

Elementarteilchen der elektromagnetischen Strahlung mit der Wellenlänge von Licht. Es gehört zu den Photonen, wie die Röntgen- und Gammaquanten. (50, 52, 57, 142)

Licht

Von der Sonne abgestrahlte elektromagnetische Wellen. Am wich-

tigsten für das Leben ist ein sehr schmales Band im **Wellenlängenbereich** zwischen 380 und 750 nm (genannt „sichtbares Licht“, da es vom menschlichen Auge wahrgenommen wird). Die Pflanzenfarbstoffe, etwa **Chlorophyll**, absorbieren Licht verschiedener sichtbarer Wellenlängen, etwa blaues und rotes Licht, nicht aber grünes Licht, weshalb Pflanzen grün erscheinen. (21, 37, 50, 53, 57, 68, 69, 71, 81, 82, 102, 103, 113, 118–122, 119)

Lichtreaktion

Der lichtabhängige Teil der **Photosynthese**. Während der L. wird die **Energie** des Sonnenlichts in chemische Energie umgewandelt, Wasser gespalten und dadurch Sauerstoff produziert, den die Pflanze wieder abgibt (siehe **Dunkelreaktion**). (54)

Lokomotion

Autonome Bewegungen von Lebewesen, die mit einem Ortswechsel verbunden sind, wie etwa gehen, laufen, fliegen, schwimmen. Sie beruhen auf der Umwandlung von chemischer in mechanische **Energie** – bei Tieren durch Muskeln, bei Einzellern durch Cilien, Geißeln oder amöboid bewegliche Zellen (amöboid = durch Zellplasmaströmung hervorgerufene Kriech- und Fließbewegung). (94)

Mammalia

Klasse der Säugetiere. **Wirbeltiere** mit regulierter Körpertemperatur, Milchdrüsen und Haaren. (43)

Meiose

Spezielle Form der Zellteilung, auch Reifeteilung oder Reduktionsteilung genannt, die nur bei der **Keimzellenentwicklung** von Lebewesen mit **geschlechtlicher (sexueller) Fortpflanzung** erfolgt. Deren „haploid“ genannte Spermien oder Eizellen besitzen nur einen Satz von Chromosomen (zum Beispiel Mensch: 23 Chromosomen) – im Gegensatz zu allen anderen Zellen des Körpers (Mensch: 46). Durch die M. wird die Zahl der Chromosomen bei der Bildung von Keimzellen also halbiert, um ihre spätere Verdopplung bei der Befruchtung zu kompensieren. Denn bei der Verschmelzung von einem haploiden Ei mit einem haploiden Spermium entsteht eine diploide Zygote (= befruchtete Eizelle), die einen doppelten, das heißt je einen mütterlichen und väterlichen Chromosomensatz besitzt. Die M. erfolgt in zwei hintereinander ablaufenden Teilungen: Bei der ersten kommt es nach der Verdopplung des Erbmateri als zu einer engen Aneinanderlagerung der entstandenen homologen Chromosomenpaare. Dabei können Teilstücke ausgetauscht und so **Gene** umverteilt werden („crossing over“), wodurch es zu einer Durchmischung des Erbguts kommt. Anschließend werden die väterlichen und mütterlichen Chromosomen gleichmäßig auf die beiden Tochterkerne verteilt. Die zweite Teilung ähnelt in ihrem Ablauf der **Mitose**. (26)

Metamorphose

Gestalts- und Funktionswechsel in der Individualentwicklung, etwa bei Insekten beim Übergang von der **Larve** zur **Imago**. (85, 86, 89, 109)

Mimikry

Durch Selektion entstandene täuschende Ähnlichkeit wehrloser, genießbarer Tiere oder Pflanzen in Gestalt, Färbung und Verhalten mit wehrhaften oder widerwärtig schmeckenden Arten. Etwa bei Taubnesseln, Witwenvögeln und Schmetterlingen. (127)

Mitose

Reguläre Kernteilung im Rahmen der Zellteilung der **Eukaryoten**. Hierbei werden die Chromosomen der sich teilenden Zelle zunächst dupliziert und dann zur Hälfte auf die beiden Tochterkerne verteilt. Bei der M. bleibt also anders als bei der **Meiose** die Chromosomenzahl erhalten und die Tochterkerne enthalten das gleiche Erbgut. (26)

Mitochondrien

Die so genannten „Kraftwerke“ der Zelle. In ihnen findet die **Zellatmung** statt, durch die aus Zuckern, Fetten und anderen Nährstoffen mithilfe von Sauerstoff **Energie** gewonnen und in **ATP** umgesetzt wird. Fast alle Zellen von **Eukaryoten** besitzen M. (53, 55, 56)

Moleküle

Aus zwei oder mehr gleichartigen oder verschiedenen Atomen aufgebaute Verbindungen. (50, 51, 52, 53, 54, 55, 56, 57, 68, 72, 73, 102, 104, 113, 115, 120, 140, 158)

Nahrungsnetz

Das komplexe Gefüge der Nahrungsbeziehungen in einer Lebensgemeinschaft, etwa der eines Laubwaldes oder Korallenriffs. (141, 142)

Narbe

Oberer, oft klebriger Teil des weiblichen Sexualorgans von Pflanzen (siehe **Fruchtblatt**), auf dem die **Pollenkörner** landen. (38)

Nitrate

Wasserlösliche Salze der Salpetersäure, im Boden durch Bakterien aus stickstoffhaltigen Stoffen, wie etwa Ammonium, gebildet. N. sind die wichtigsten Stickstofflieferanten der Pflanzen. (52)

Ommatidium

Eine Baueinheit (Facette) des Komplexauges der Gliederfüßer und einiger Borstentwürmer. (121)

Organellen

Membransumgeschlossene Körperchen mit spezialisierter Funktion in **Eukaryoten**-Zellen: etwa **Mitochondrien**, **Zellkern** oder **Chloroplasten**. (21)

Organische Kohlenstoff-Verbindungen

Etwa 90 Prozent dieser chemischen Substanzen bestehen aus **Kohlenstoff**, Wasserstoff und Sauerstoff; die übrigen enthalten zusätzlich

Stickstoff oder andere Elemente wie Schwefel oder Phosphor. 1997 wurde geschätzt, dass es mehr als 15 Millionen o. K.-V. gibt. Zum Beispiel **Aminosäuren** (Bausteine der **Eiweiße**), Ascorbinsäure (Vitamin C) sowie **Chitin** und **Zellulose** als Gerüstsubstanzen. (72)

Osmose

Diffusion von gelösten Teilchen und dem Lösungsmittel Wasser durch eine Membran. Biologisch bedeutsam ist O. bei selektiv durchlässigen („semipermeablen“) Membranen, die das reine Wasser vollständig, die gelöste Substanz jedoch nicht oder nur unvollständig passieren lassen. Die Diffusion des Wassers erfolgt so lange, bis der Konzentrationsausgleich erreicht ist oder – in Pflanzen – der **Turgordruck** keinen weiteren Wassereinstrom erlaubt. (68, 70, 71, 102, 105)

Osmotische Kräfte

Nach dem Prinzip der **Osmose** wirkende Saugkräfte, die einen Wassereinstrom in **Zellen** bewirken. (101)

Phloem

Leitgewebe von Samenpflanzen und Farnen, das dem Transport von **Photosyntheseprodukten** dient. Das P. hat keine verholzten Bestandteile. Im P. (Siebteil) erfolgt in lebenden Zellen ein (langsamer) Transport von organischen Nährstoffen von den Blättern zur Wurzel hin. (69, 70)

Photosynthese

Umwandlung von **Lichtenergie** in chemische **Energie**, die in **Glukose** (Traubenzucker) oder anderen **organischen Verbindungen** gespeichert wird. P. findet in grünen Pflanzenteilen sowie in bestimmten **Prokaryoten** (Bakterien, Archaeobakterien) statt. Ausgangsstoffe sind Kohlendioxid aus der Luft und Wasser, welches aus dem Boden oder – bei Algen – beides aus dem Umgebungswasser absorbiert wird. Neben **Glukose** entsteht bei der Umwandlung Sauerstoff (siehe **Licht- und Dunkelreaktion**). (50, 52, 53, 54, 55, 57, 68, 69, 70, 71, 102, 81, 113, 141, 142, 143, 156)

Phototropin

Rezeptortyp bei Pflanzen zur Er-

WIE ALLES BEGANN

Vor mehr als 3,5 Milliarden Jahren, als die Erdoberfläche sich auf eine Temperatur abgekühlt hatte, bei der sich flüssiges Wasser ansammeln konnte, entstand auf der Erde das erste Leben in Form von Urzellen, aus denen sich alle anderen Organismen entwickelt haben. Die ältesten Fossilien, die Forscher bisher gefunden haben, stammen aus jener Zeit und ähneln bestimmten Bakterien, die es heute noch gibt. Eine Theorie geht davon aus, dass sich die Urform

Urzelle

des Lebens am Meeresboden in Kaminen ausgebildet hat, die den schlotartigen „Schwarzen Rauchern“ in der Tiefsee ähneln (siehe auch GEOkompakt Nr. 1).

DOMÄNE

REICH

Eukaryoten →
Archaeobakterien
Salzbakterien
Methanbildner
Hyperthermophile

Bakterien
Spirillen
Rickettsien
Schwefelbakterien
Blaualgen
Spirochäten
Purpurbakterien

Tiere

Pilze
Schlauchpilze
(Morcheln, Trüffel)
Ständerpilze
(Steinpilz, Fliegenpilz)
Schimmelpilze

Pflanzen

Protoctisten
Wurzelfüßer
Augentierchen
Wimpertierchen
Kieselalgen
Braunalgen
Rotalgen
Grünalgen

Parasitoid

Parasit eines Parasiten, der seinen „Wirt“ im Laufe seiner Entwicklung allmählich tötet. (142)

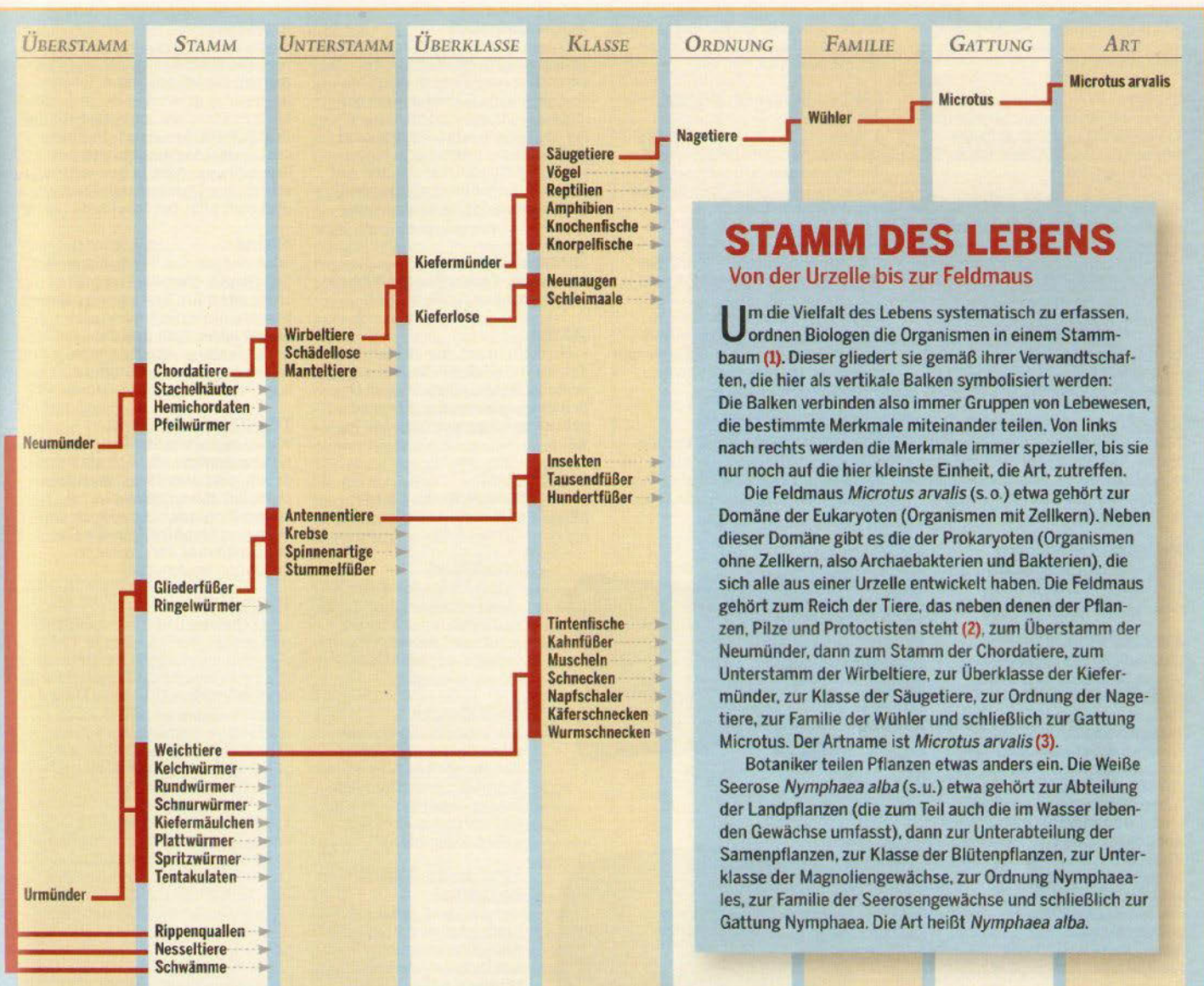
Pflanzengeographie

Wissenschaft von der Verbreitung und Ausbreitung von Pflanzengemeinschaften auf der Erde und deren historischen und ökologischen Ursachen. (137)

kennung von blauem **Licht** (mit einer **Wellenlänge** um 450 nm). Durch P. wird die Krümmung von Pflanzen zum Licht hin oder davon weg gesteuert. (102)

Phytohormone (Pflanzenhormone)

Regulatorstoffe der Pflanzen, wie Auxin, Gibberelline und Ethylen, die etwa das Wachstum, die Samenkeimung, den Blattabwurf oder



STAMM DES LEBENS

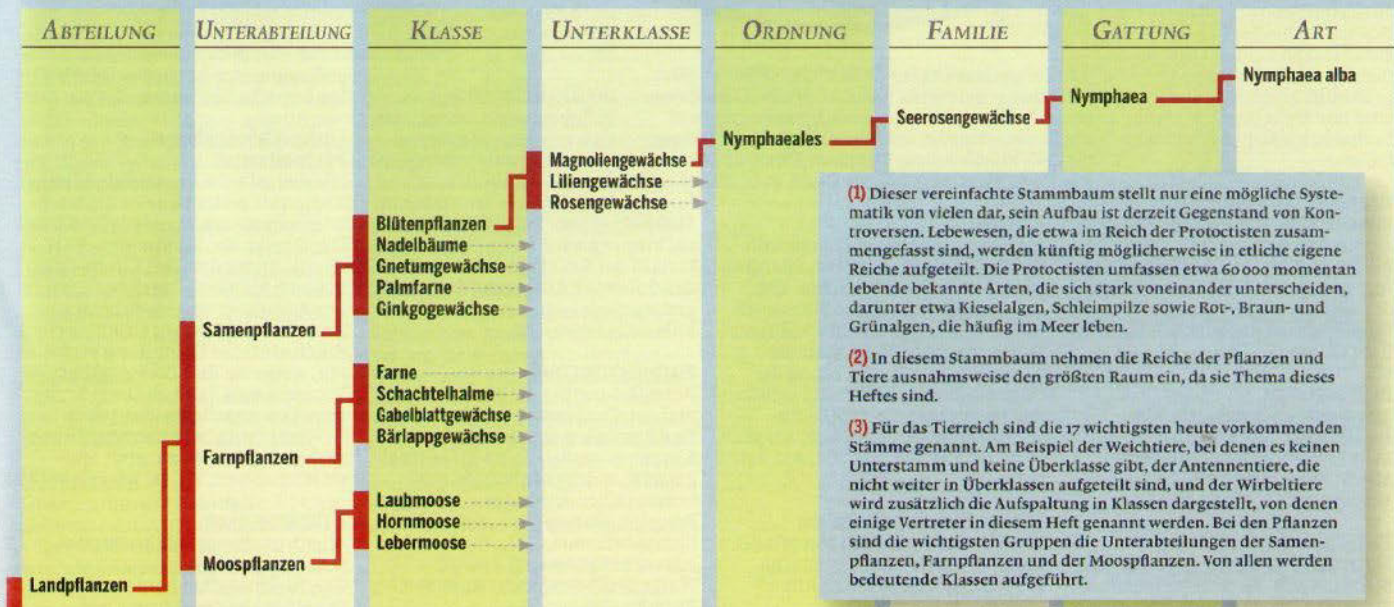
Von der Urzelle bis zur Feldmaus

Um die Vielfalt des Lebens systematisch zu erfassen, ordnen Biologen die Organismen in einem Stammbaum (1). Dieser gliedert sie gemäß ihrer Verwandtschaften, die hier als vertikale Balken symbolisiert werden: Die Balken verbinden also immer Gruppen von Lebewesen, die bestimmte Merkmale miteinander teilen. Von links nach rechts werden die Merkmale immer spezieller, bis sie nur noch auf die hier kleinste Einheit, die Art, zutreffen.

Die Feldmaus *Microtus arvalis* (s. o.) etwa gehört zur Domäne der Eukaryoten (Organismen mit Zellkern). Neben dieser Domäne gibt es die der Prokaryoten (Organismen ohne Zellkern, also Archaeobakterien und Bakterien), die sich alle aus einer Urzelle entwickelt haben. Die Feldmaus gehört zum Reich der Tiere, das neben denen der Pflanzen, Pilze und Protocysten steht (2), zum Überstamm der Neumünder, dann zum Stamm der Chordatiere, zum Unterstamm der Wirbeltiere, zur Überklasse der Kiefermänder, zur Klasse der Säugetiere, zur Ordnung der Nagetiere, zur Familie der Wühler und schließlich zur Gattung *Microtus*. Der Artname ist *Microtus arvalis* (3).

Botaniker teilen Pflanzen etwas anders ein. Die Weiße Seerose *Nymphaea alba* (s. u.) etwa gehört zur Abteilung der Landpflanzen (die zum Teil auch die im Wasser lebenden Gewächse umfasst), dann zur Unterabteilung der Samenpflanzen, zur Klasse der Blütenpflanzen, zur Unterklasse der Magnoliengewächse, zur Ordnung Nymphaeales, zur Familie der Seerosengewächse und schließlich zur Gattung *Nymphaea*. Die Art heißt *Nymphaea alba*.

Die grauen Pfeile deuten an, dass sich jede Gruppierung bis zur Art weiter verästelt – bekannt sind heute rund 1,75 Millionen Spezies.



(1) Dieser vereinfachte Stammbaum stellt nur eine mögliche Systematik von vielen dar, sein Aufbau ist derzeit Gegenstand von Kontroversen. Lebewesen, die etwa im Reich der Protocysten zusammengefasst sind, werden künftig möglicherweise in etliche eigene Reiche aufgeteilt. Die Protocysten umfassen etwa 60 000 momentan lebende bekannte Arten, die sich stark voneinander unterscheiden, darunter etwa Kieselalgen, Schleimpilze sowie Ror-, Braun- und Grünalgen, die häufig im Meer leben.

(2) In diesem Stammbaum nehmen die Reiche der Pflanzen und Tiere ausnahmsweise den größten Raum ein, da sie Thema dieses Heftes sind.

(3) Für das Tierreich sind die 17 wichtigsten heute vorkommenden Stämme genannt. Am Beispiel der Weichtiere, bei denen es keinen Unterstamm und keine Überklasse gibt, der Antennentiere, die nicht weiter in Überklassen aufgeteilt sind, und der Wirbeltiere wird zusätzlich die Aufspaltung in Klassen dargestellt, von denen einige Vertreter in diesem Heft genannt werden. Bei den Pflanzen sind die wichtigsten Gruppen die Unterabteilungen der Samenpflanzen, Farnpflanzen und der Moospflanzen. Von allen werden bedeutende Klassen aufgeführt.

Alle Organismen mit **geschlechtlicher Fortpflanzung** gehen aus Geschlechtszellen hervor, die sich aus einer kleinen Gruppe von

U. entwickeln. Diese werden bei den meisten Tierarten sehr früh in der Embryonalentwicklung von anderen Zelllinien abgetrennt. (87, 88)

Verpuppung

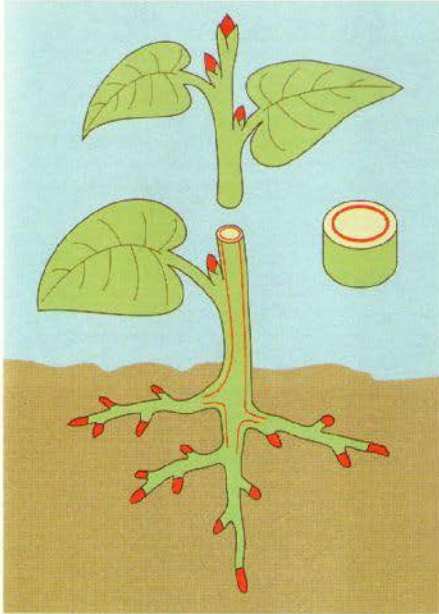
Prozess bei Insekten mit vollständiger Umwandlung (siehe **Holometabolie**), der zur Bildung eines Ruhestadiums, der Puppe, führt. (86, 88)

Wachstumszone (Teilungszone)

Die undifferenzierten Zellen dieser Zone in den Spross- und Wurzelspitzen von Pflanzen können sich unbegrenzt teilen und ermöglichen ihr so, während ihres gesamten Lebens weiterzuwachsen. (54, 80, 82)

Wellenlänge

Abstand zwischen den Kämmen elektromagnetischer Wellen. Das W.-Spektrum reicht von unter einem Nanometer (bei Gammastrahlen) bis zu mehr als einem Kilometer (bei Radiowellen). Die Sonne sendet das gesamte Spek-



Alle Pflanzen verfügen über Wachstumszonen (rot) mit Zellen, die sich teilen und neue Organe ausbilden können: Sie sitzen unten in den Wurzelspitzen, in den Sprossspitzen und – bei Gewächsen, die wie Bäume verholzen – in einem Ring im Stängel (siehe Ausschnitt)

trum elektromagnetischer Strahlung aus, die Erdatmosphäre lässt das sichtbare **Licht** durch, das auch die **Photosynthese** antreibt, hält aber einen beträchtlichen Teil der übrigen Strahlung ab. (54, 119)

Wirbellose

Tiere ohne Wirbelsäule. Mindestens 95 Prozent aller Tierarten gehören zu den Wirbellosen. (23, 81)

Wirbeltiere

Unterstamm der **Chordatiere**. Dazu gehören Amphibien, Reptilien, Vögel, Fische und Säugetiere. Die weitaus artenreichste Gruppe bilden die Fische mit 28 000 bis 30 000 Arten. (23, 43, 94, 119, 121, 141, 158)

Xylem

Bei Samenpflanzen und Farnen jener Teil der Leitbündel, der wegen der Verholzung der Leitelemente „Holzteil“ genannt wird. Das X. leitet Wasser und Mineral-salze von den Wurzeln zu den Blättern. (69, 70, 71)

Zellatmung

Auch: Innere Atmung. **Stoffwechselwege**, die der **Energiegewinnung** in Pflanzen, Tieren, Pilzen und **Protoctisten** dienen. Hierbei wird bei der äußeren Atmung aufgenommener Sauerstoff verbraucht und Kohlendioxid sowie Wasser freigesetzt. (51, 52, 53, 55)

Zelle

(von lat. *cella* = Zelle, Kammer) Autonomer Baustein aller Lebewesen, der einen Organismus darstellen kann (Einzeller) oder Teil eines vielzelligen Lebewesens ist. Bei Einzellern, wie Bakterien und Flagellaten, werden alle Lebensfunktionen von einer einzigen Z. wahrgenommen. Bei Vielzellern unterscheidet man je nach Funktion verschiedene Zelltypen, wie Muskel-Z., Keim-Z., Bindegewebs-Z., Drüsen-Z. Gleichartige Z. bilden Körpergewebe (siehe Seite 162). (38, 52, 55, 56, 68, 69, 70, 71, 88, 97, 100, 101, 102, 105, 109, 113, 114, 115)

Zellkern

Auch: Nukleus. Genetisches Steuerzentrum und größtes **Organell** der **Zelle** der **Eukaryoten**. Zu den Funktionen des Z. gehören die Speicherung der **genetischen Information** in der DNS, die Verdopplung der DNS und die Synthese der drei RNS-Typen. (38, 54, 168)

Zellulose

Mehrfachzucker, bestehend aus 500 bis 5000 **Glukose**-Einheiten, der den Hauptbestandteil der Gerüstsubstanz pflanzlicher **Zellwände** darstellt. Laub- und Nadelbäume bestehen zu rund 50 Prozent aus Z. Jährlich werden durch Pflanzen

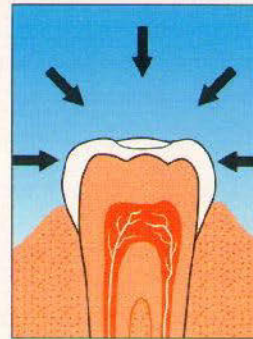
etwa zehn Billionen Tonnen Z. aufgebaut. (69, 142)

Zystenstadium

Entwicklungsstadium bestimmter niederer Tiere (Bakterien, Protozoen, Rädertiere, Bärtierchen, Schwämme, Würmer), darunter auch viele Parasiten, die in ihrer meist mit derber Haut umgebenen Hülle überdauern. Die Tiere bilden diese in Zeiten ungünstiger Lebensbedingungen, sie einzystieren sich, schlüpfen später wieder aus der Zyste und leben normal weiter. (159)

Eva Danulat, 49, ist promovierte Biologin und gehört zum Verifikationsteam dieser Ausgabe von GEOkompakt.

Härten Sie Ihre Zähne für die nächste Woche



Tägliches Zähneputzen ist gut. Mit **elmex® gelée** können Sie Ihre Zähne zusätzlich noch intensiv härten und so bis ins hohe Alter vor Karies schützen.

Diese Karies-Schutzmedizin wird 1 x wöchentlich angewendet. Dabei wird der Zahnschmelz intensiv

fluoridiert, mineralisiert und nachhaltig gehärtet. Damit er vor allen Angriffen geschützt bleibt.



zusätzlich 1 x wöchentlich
elmex® gelée
für gesunde, starke Zähne

GABA Lörrach – **elmex® Forschung**
E-Mail: info@gaba-dent.de

elmex® gelée. Zur Kariesprophylaxe, Remineralisation der Initialkaries und Behandlung überempfindlicher Zahnhälse. Zu Risiken und Nebenwirkungen lesen Sie die Packungsbeilage und fragen Sie Ihren Arzt oder Apotheker.

BAUKASTEN DES LEBENS

Aus nur drei Grundbausteinen können tierische wie pflanzliche Zellen fast alle Körpersubstanzen herstellen

BAUSTEINE Organismen bestehen zu etwa 96 Prozent aus Kohlen-, Wasser-, Sauer- und Stickstoff sowie Schwefel und Phosphor. Von der Zelle bis zum Stoßzahn baut die Natur daraus alle Strukturen auf. Das Prinzip ist immer gleich: Kohlenstoffatome bilden ein Gerüst aus Ringen oder Ketten, an das andere Elemente geknüpft werden. So entstehen große Moleküle. Zu diesen gehören auch die drei Grundbausteine der Natur: **Aminosäuren (A)**, **Fettsäuren (B)** und **Einfachzucker**, etwa **Glukose (C)**. Diese Bausteine werden mit der Nahrung aufgenommen oder von den Organismen selbst hergestellt und zu größeren Strukturen zusammengesetzt. Zum Beispiel werden einzelne Aminosäuren zu langen Eiweißketten verbunden, den **Proteinen**.

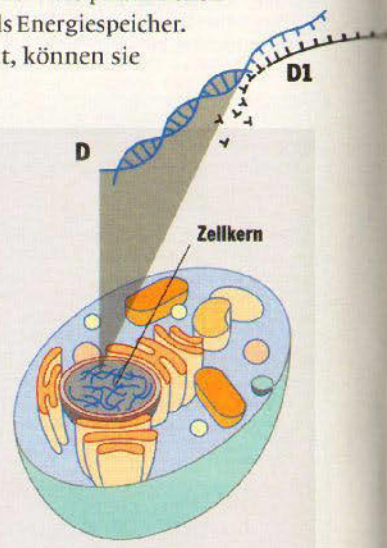
BAUPLAN Die Informationen für den Bau dieser Proteine sind zumeist im **Zellkern** in der Erbsubstanz gespeichert, der **DNS** (Desoxyribonukleinsäure), einem wendeltreppenförmigen Molekül (D). Für die Herstellung eines Eiweißmoleküls öffnet sich ein Abschnitt der DNS – ein Gen –, und es entsteht eine Kopie dieses Gens in Form der **Boten-RNS (D1)**. Diese gelangt aus dem Zellkern zu den **Ribosomen (A1)**, den Proteinfabriken in der Zelle. Dort werden Aminosäuren nach der vom Gen bestimmten Reihenfolge zu einer Kette (**A2**) verknüpft, die sich schließlich zum fertigen Protein faltet.

BAUSTOFF 1: PROTEINE Proteine sind Multitalente: Sie transportieren beispielsweise andere Moleküle (etwa Sauerstoff im Blut), steuern die Kontraktion der Muskeln, können Energie speichern (globuläre Proteine, **A3**) oder formen das Stützgerüst von Zellen (Strukturproteine, **A4**). Millionen von ihnen bilden auch Haare oder Fingernägel. Die größte Gruppe von Proteinen sind die Enzyme, die chemische Reaktionen eines Organismus beschleunigen und regulieren. Sie steuern auch den Auf- und Abbau von Fettsäuren und Zuckern (siehe B und C).

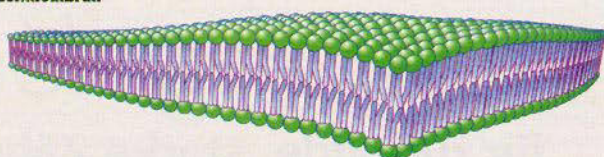
BAUSTOFF 2: FETTE Fettsäuren (B) dienen als Baustoff etwa in den Zellmembranen von Pflanzen und Tieren (E). Tiere nehmen einen Teil davon mit der Nahrung auf, einen Teil erzeugen sie selbst: Sie bauen Zucker etwa in der Leber zu Fettsäuren um. Pflanzen dagegen produzieren alle ihre Fettsäuren selbst. Um

beispielsweise Wachs herzustellen, werden diese Fettsäuren in der tierischen wie in der pflanzlichen Zelle mit langkettigen Alkoholmolekülen (**B1**) zu Wachsmolekülen (**B2**) verknüpft. Diese schließen sich in Schichten zusammen (**B3**). Bei Pflanzen reduziert Wachs die Verdunstung und schützt die Blattoberfläche vor Schmutz und Schädlingen. Tiere nutzen Wachse als Schutzschicht zum Beispiel auf Vogelfedern oder Insektenpanzern – oder zum Bau von Bienenwaben. Fettsäuren dienen aber auch als Energiespeicher: Je drei Säuren können in der Zelle mit dem Alkohol Glycerol (**B4**) verknüpft werden und ergeben dann ein Fettmolekül (**B5**). Viele von ihnen ballen sich (**B6**) zusammen. Diese dienen dann in den tierischen wie pflanzlichen Zellen, etwa dem Kern der Olive, als Energiespeicher. Bei Bedarf, wenn die Olive keimt, können sie verwertet werden.

DER BAUPLAN FÜR fast alle Konstruktionsvorgänge in der pflanzlichen und tierischen Zelle ist in der DNS gespeichert – einem Riesenmolekül im Zellkern. Soll ein Protein produziert werden, nimmt die Boten-RNS eine Kopie der entsprechenden Gensequenz und transportiert sie als Vorlage zu den Ribosomen, den Eiweißfabriken. Die dort gebildeten Proteine steuern alle anderen Bauvorgänge



Zellmembran



OHNE MEMBRANEN KÖNNTE keine Zelle funktionieren. Membranen, die unter anderem aus Fettsäuren bestehen, trennen Zellen von ihrer Umgebung, steuern den Stoffaustausch mit der Umwelt, nehmen chemische Signale auf und leiten sie weiter

BAUSTOFF 3: ZUCKER Pflanzen sind zu einem großen Teil aus Zuckern aufgebaut. Aus den in Chloroplasten gebildeten Molekülen werden in der Zelle von Enzymen zum Beispiel Ketten von Mehrfachzuckern zusammengesetzt (**C1**). Diese werden verlängert, es entstehen Bänder (**C2**). Mehrere lagern sich aneinander, Quervernetzungen machen diese Bänder sehr stabil (**C3**). So stellen Pflanzen Zellulose her, den Hauptbestandteil ihrer Zellwände. Diese wiederum machen das Gerüst der Pflanzen aus. Gliedertiere können aus Zucker, in Verbindung mit anderen Substanzen, Panzer aus **Chitin** aufbauen. Mehrfachzucker können aber auch als Energievorrat genutzt werden: Bei den meisten Pflanzen verbinden sich die Zuckermoleküle zu langen Ketten und formen dann unter anderem Spiralen (**C4**). Viele dieser Spiralen lagern sich zusammen (**C5**) – als Bestandteil des Speicherstoffs **Stärke**, etwa in der Kartoffelknolle, die dem jungen Spross als Nährstoffreservoir dient. Tiere speichern Mehrfachzucker in ähnlich komplexen Strukturen als Glykogen in der Leber.

Texte: Philipp Crone, Susanne Gilges, Jörn Auf dem Kampe
Infografik: Hark Weidling

PROTEINE

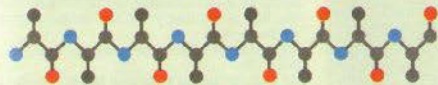
Aminosäuren

A Grundbausteine aller Proteine sind insgesamt 22 unterschiedliche Aminosäuren. Pflanzen stellen sie u. a. in den Mitochondrien her, Tiere nehmen etwa die Hälfte mit der Nahrung auf

- Kohlenstoff
- Stickstoff
- Sauerstoff
- Wasserstoff
- variabler Rest



A1 In den Ribosomen, den Eiweißfabriken der Zellen, werden die Aminosäuren nach einem von der Boten-RNS vorgegebenen Bauplan zu Ketten verknüpft



A2 Die Aminosäureketten können aus mehreren hundert Molekülen bestehen. Je nach Abfolge der Aminosäuren bilden sich unterschiedliche Ketten

Strukturprotein

globuläres Protein



A3 Diese Ketten falten sich zu unterschiedlichen Proteinen. Manche werden zu Baustoffen (siehe A4), andere zu Speicherstoffen (oben ein globuläres Protein, das etwa in Sojabohnen – unten – Energie speichert), wieder andere zu Enzymen. Letztere steuern sämtliche Bau- und Umwandlungsprozesse in den Organismen – also auch die Fett- und Zuckersynthese (siehe B u. C)

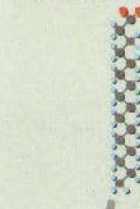
A4 Wenn sich die Ketten zu länglichen Fasern verdrehen, können Baustoffe entstehen. In den Pflanzen wie auch Tieren bilden sie das Gerüst einer jeden Zelle. In Tieren verbinden sie sich auch zu Megastrukturen: Abermillionen solcher Proteinfasern formen etwa Haare oder Nägel oder das Horn eines Rhinoceros



FETTE

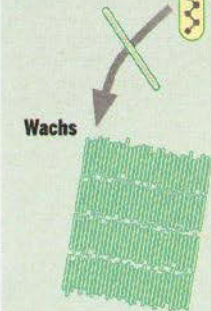
Fettsäuren

B Grundbausteine aller Fette sind die Fettsäuren. Pflanzen wie Tiere stellen sie aus Zucker selbst her, tierische Organismen nehmen sie zudem auch über die Nahrung auf



B1 Ein großes Alkoholmolekül, das in den Zellen gebildet wird, kann sich in einer tierischen wie pflanzlichen Zelle bei einer von Enzymen geregelten Reaktion unter anderem mit einer Fettsäure zu einem Wachsmolekül verbinden

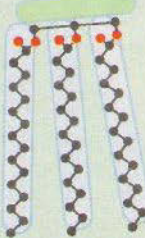
B2 Dieses Wachsmolekül ist stäbchenförmig und besteht immer nur aus einem Alkohol und einer Fettsäure. Es eignet sich als Baustoff



B3 Wenn sich viele Wachsmoleküle aneinander lagern, entstehen Wachsschichten, die von Tieren und Pflanzen unter anderem als schützender Überzug bei Blättern oder Federn genutzt werden. Bienen dagegen bauen mit dem in Drüsen produzierten Wachs ihre Waben



B4 Ein kleines Alkoholmolekül (Glycerol) kann sich, ebenfalls von Enzymen gesteuert, mit drei Fettsäuren zu einem Fettmolekül verbinden



B5 Dieses Fettmolekül ist außerordentlich energiereich und auch deshalb als Speicher besonders gut geeignet



B6 Viele Fettmoleküle lagern sich zusammen und bilden so beispielsweise die Fettreserven von Tieren und Pflanzen, etwa in Schweineschwart oder Oliven



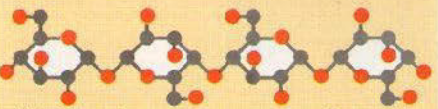
ZUCKER

Einfachzucker

C Grundbausteine aller Zucker sind die Einfachzucker, wie etwa Glukose (links). Pflanzen stellen sie selbst her, Tiere nehmen sie mit der Nahrung auf oder bauen sie selbst aus anderen Stoffen auf



C1 Enzyme verknüpfen diese Einfachzucker in den Zellen zu Mehrfachzuckern

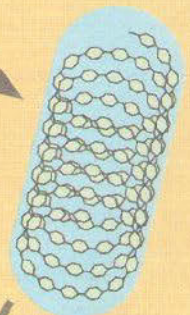


Mehrfachzucker können aus mehreren Dutzend Molekülen bestehen

C2 Manche Molekülketten werden immer weiter verlängert, sodass Bänder aus mehreren tausend Einfachzuckern entstehen. Diese dienen als Ausgangsmaterial für verschiedene Gerüstsubstanzen



C3 Mehrere solcher Bänder bilden so genannte Fibrillen: relativ stabile, breite Fasern. In Gewächsen bilden sie den Hauptbestandteil der Zellwände. Diese wiederum formen die Gerüste der Blätter oder des Stängels und geben so der Pflanze Halt. Bei Tieren können sie den Grundstoff etwa des chitinhaltigen Panzers bilden



C4 Mehrfachzucker in Bändern können sich auch zu Spiralen verdrillen und dienen in dieser Form als Energiespeicher



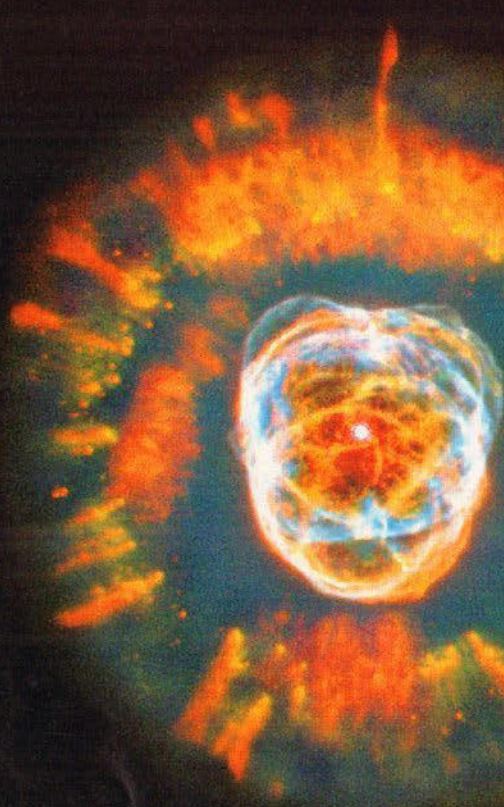
C5 Viele Spiralen verknäulen sich und lagern sich in pflanzlichen Zellen in Form von Stärkekörnern ab. Daraus entsteht etwa in der Kartoffel jene Stärke, die einen jungen Spross beim Austreiben versorgt. Bei Tieren sammeln sich solche Mehrfachzucker-Spiralen als Glykogen beispielsweise in der Leber – als Energiereserve



GEOkompakt Nr. 6 erscheint am 15. März 2006

Galaktische Welten

Der Aufbau des Universums – und die Entschlüsselung seiner Geheimnisse



Der Eskimo-Nebel, Reste eines sterbenden Sterns. Solche Himmelserscheinungen erfasst auch das Teleskop der Europäischen Südsternwarte

Alle Gestirne am Sternenhimmel, alle Galaxien und kosmischen Gaswolken machen nur einen geringen Teil der im All vorhandenen Materie und Energie aus. Der gewaltig große Rest ist nicht zu sehen: Er besteht aus Dunkler Materie und Dunkler Energie, von denen man bislang nur ihre Wirkungen kennt.

Doch Astrophysiker sind ihnen bereits auf der Spur. Mit immer besseren Teleskopen stoßen sie tiefer in den Kosmos vor als jemals zuvor. Da-



bei haben sie Neutronensterne entdeckt, die so schwer sind, dass ein Fingerhut ihrer Materie auf der Erde Hunderte Millionen Tonnen wiegen würde. Sie erspähen junge Sterne, die noch von ihren Geburtsnebeln

umgeben sind – und sterbende Riesen, deren finale Explosionen heller strahlen als eine gesamte Galaxie. Und sie sind auf über 100 Planeten gestoßen, die um ferne Sterne kreisen, so wie die Erde um die Sonne. Könnte es sein, dass sich dort auch Leben gebildet hat?

GEOkompakt macht sich auf zu den Ursprüngen von Zeit und Raum. Und erklärt, was unsere Sonne zum Strahlen bringt, was den Mars rot färbt und wo das heiße Herz unserer Galaxis schlägt.

Bereits erschienen:



Die folgenden Ausgaben:

Macht der Gene: Wie das menschliche Erbgut den Körper und unser Verhalten beeinflusst (14. Juni 2006)

Die Urzeit: Riesenbilden, Dinosaurier, Terrorvögel – die aufregende Geschichte des irdischen Lebens (13. September 2006)

Bildnachweis/Copyright-Vermerke

Anordnung im Layout: l. = links, r. = rechts, o. = oben, m. = Mitte, u. = unten

Titel: Chase Swift/Corbis

Editorial: Werner Bartsch

Inhalt: Frans Lanting: 41 o.; Solvin Zankl: 4 r. o.; Tim Wehrmann: 41 u.; Frans Lanting/Minden Pictures: 4 m. o.; Paul Starosta: 4 r. u.; Chris Newbert/Minden Pictures: 51 o.; Jochen Stuhmann: 5 r. o.; Stuart Franklin/Magnum Photos/Agentur Focus: 51 u.; David Doubilet: 5 m. u.; Art Wolfe: 5 r. u.

Das Prinzip Natur: Jeffrey L. Rotman: 6-7; Thomas Endlein: 8-9; Mitsuki Inagaki/Minden Pictures: 10-11; Heidi/Hans Jürgen Koch/Minden Pictures: 12-13; Norbert Wu: 14-15; Frans Lanting: 16-17; David Doubilet: 18-19

Das Spiel der Triebe: Mark Moffett/Minden Pictures: 22 l.; Norbert Wu/Minden Pictures: 22 m.; 23 l.; 24 l.; m. W. P. Richter/Wildlife: 22 m. m.; Ingo Arndt/Minden Picture Library: 22 m. u.; Norbert Wu/Minden Pictures: 23 r.; Fred Baveand/Minden Pictures: 24 l. o.; Pete Oxford/Nature Picture Library: 24 l. u.; Gallo Images/Corbis: 24-25 m. o.; SPL/Agentur Focus: 25 r. o.; John Canales/DRK PHOTO: 25 r. u.; SPL/Agentur Focus: 26 r.

Mein Reich – mein Gesang: Manfred Danegger/NHPA: 28 l.; H. Schwilke/WILDLIFE: 29 l.; blinkwinkel/H.Schmidbauer: 29 r.; K. Wolke/Arco Digital Images: 30 l.; R. Usher/WILDLIFE: 30 r.; André Skonieczny/Linea: 31; Sonagramm: H. H. Bergmann/H.-W. Helb. aus dem Buch „Stimmen der Vögel Europas“, W. Verlagsgesellschaft mbH München

Der weite Weg der Samen: Solvin Zankl: 32-40; Illustration: Andreas Boock: 38; Der Mann, der Ordnung ins Leben brachte: alg-images: 42 l.; ulldine – Grange Collection: 43 r. u.; Agro. M. Bibliothèque/Audiovisuel, Montpellier: 43 r. o.

Der Kraftstoff des Lebens: Jose Azel/Aurora: 48-49; Roger Harris/Photo Researchers, Inc.: 48 l. u.; Ted Kirsman/Photo Researchers, Inc.: 52; Paul Nicklen/National Geographic/Getty Images: 56; Illustrationen: Jochen Stuhmann: 50-51, 54-55

Der Tod, der das Leben bringt: Michael & Patricia Fodgen/Minden Pictures: 58-59; Beverly Joubert/National Geographic Image Collection: 60-61; Dou Perrine/SeaPics.com: 62-63; Christian Ziegler/Naturphoto.de: 64-65

Die Pumpe im Baum: Illustrationen: Tim Wehrmann: 66-71; Was die Materie zusammenhält: SPL/Agentur Focus: 72; alg-images: 73 r.; Ruprecht-Karls-Universität Heidelberg: 73 r. u.

Was einen Kern zum Körper macht: alg-images: 78-79; The Bridgeman Art Library: 80 l.; 80 r.; 83; DK Images: 81 r.

Ein Tier, zwei Körper: Paul Starosta: 84-88; Keine Neuronen! Pflanzen haben wirklich Glück: Aus: Banks Library – „Orkney Dagbert“, erschienen im Egmont Eha Verlag ©Doney: 91

Wettlauf ums Überleben: Randy Wells/Corbis: 92-93; Chris Newbert: 95; Merit L. Tuttle/Bat Conservation International, www.batcon.org: 96

Der lange Marsch: Weshalb Tiere wandern: NAS E. Tanson/Okapia: 98 l.; P. Schütz/blickwinkel: 98 l.; J.C. Sotho/Arco Digital Images: 98 l. u.; D. Harne/Wildlife: 98 r. o.; NPL/Arco Digital Images: 98 r. u.; A. Visage/Wildlife: 99 l. o.; P. Schütz/Arco Digital Images: 99 l. m.; KonNaven/US/Okapia: 99 l. u.; Hans Reinhard/Okapia: 99 r. o.; David Kjaer/blickwinkel: 99 r. m.; U. Walz/Arco Digital Images u. Illustration: Tim Wehrmann: 98-99

Pflanz mobil: Joan Edwards/Williams College, USA: 100-101; Sean Morris/OKAPIA: 103

Die Kraft, die aus der Verdünnung kommt: GEO-Grafik: 104; Librarian Scientific et Technique Albert Blanchard: 105 r. o.; Krown & Spelling: Bookellers: 105 r. u.

Die Sprache der Pflanzen: Stephan Elleringmann/Lail: 106-109; Das Uhrwerk der Natur: Stephan Elleringmann: 112; Max-Planck-Institut für Züchtungsforschung Köln: 114; Stephan Elleringmann/Lail: 115

Die Erfindung des Bildes: Jeffrey L. Rotman/National Picture Library: 116-117; Mary McDonald/National Picture Library: 118; Jürgen Freund/National Picture Library: 119; Jan van der Knippe/Foto Natura/Minden Pictures: 121; Dr. De Wachenfeld/Auscope/Minden Pictures: 122 l. o.; eye of science: 122 l. u.

Können Tiere denken?: Ron Kohn/The Gorilla Foundation: 125 l.; Heiner Maly/Elsner/Agentur Focus: 125 r.; R.F. Sisson/National Geographic Image Collection: 126; Vielfalt in der Schwerelosigkeit: Jeffrey L. Rotman: 128-129, 132-133

Der Letzte der Universalgelehrten: The Bridgeman Art Library: 136 l.; 137; alg-images: 137 l. o.; Aus: Berghaus Atlas, Band 1: 137 r. o.; Humboldt Projekt in der Anderen Bibliothek/Eichhorn Verlag: Herausgegeben von Hans Magnus Enzensberger

Das Netzwerk: Großes Bild: Patrick Loertscher/Bilderberg: 138-139; Diagramm: 138-139; von links nach rechts gelesen: 1. Zeile: Daniel J. Cox/Corbis; Erich Kuchling/Westend: 1. Zeile: Steve Hopkin/Taxi/Getty Images; Konrad Wolke/Okapia; Frans Lanting/Corbis; Nall Benne/Corbis; Mark E. Gibson/Corbis; 3. Zeile: J. Meul/blickwinkel; J. De Meester/Arco Digital Images; C. Blumenstein/blickwinkel; John S. Buckingham/NHPA; K. Wolke/Arco Digital Images; 4. Zeile: Ingo Arndt/NPL/Arco Digital Images; P. Hartmann/Wildlife; Karl Gottfried Vock/Okapia; D. Harne/Wildlife; K. H. Volkmann/Wildlife; Lawson Wood/Corbis; NPL/Arco Digital Images; 5. Zeile: A. Riedmiller/Das Fotoarchiv; Henemann/Westend: 61; Thom. Lang/Corbis; Hans Made/Bilderberg; 6. Zeile: J. Meul/Arco Digital Images; R. Schlephorn/Arco Digital Images; Lail: Thomas Steinhilber: 140-143

Ökosysteme: Wald: Stuart Franklin/Magnum Photos/Agentur Focus: 144 l. o.; Layer/Arco Images: 144 l. u.; Lynn Bickel/Corbis: 144 m. u.; C. M. Bahr/Arco Digital Images: 144 r. u.; Dierbrock & Schaff/Blidenberg: 145 l. o.; David R. Frazer/Photo Researchers, Inc.: 145 m. o.; Jürgen Richter/Look: 145 r. o.; Rene Lynn/Corbis: 145 l. u.; Illustration: Eric Tschern: 145 r. u.; Garland, Jim Bransburg/Minden Pictures: 145 l. o.; Joe McDonald/Corbis: 146 l. u.; John Gerlach/Animals: 146 m. u.; Sumo Harada/Minden Pictures: 146 r. u.; Carl & Ann Purcell/Corbis: 147 l. u.; Schwaib/online: 147 m. o.; Prisma/online: 147 r. o.; James Nedresky/AGF: 147 l. u.; Illustration: Eric Tschern: 147 r. u.; Wäster: Peter & Stef Lambert/Corbis: 148 l. o.; Michael & Patricia Fodgen/Corbis: 148 l. u.; Peter Johnson: 148 r. u.; Konrad Wolke/Look: 149 l. m. u.; Art Wolfe: 149 m. o.; Georg Fischer: 149 r. o.; Michael & Patricia Fodgen/Corbis: 149 l. m. u.; Diagramm von links nach rechts: 1. Zeile: Joe McDonald/Corbis; Peter Johnson/Corbis; 2. Zeile: Chris Mattison/Frank Line Picture Agency/Corbis; Gallo Images/Corbis; Dave Hamman/Gallo Images/Corbis; 3. Zeile: NPL/Arco Digital Images; Michael & Patricia Fodgen/Corbis; 4. Zeile: Anthony Barnister/Gallo Images/Corbis; Richard du Toit/Minden Pictures; Anthony Barnister/Gallo Images/Corbis; 5. Zeile: Peter Johnson/Corbis; Julia W. Terow/Eye Ubiquitous/Corbis; 6. Zeile: Peter Johnson/Corbis; Suswasse: Norbert/Westend/National Geographic Image Collection: 150 l. o.; Frans Lanting/Corbis: 150 r. u.; Nall Benne/National Picture Library: 150 m. u.; Karsten Grabow: 150 l. u.; Lay Kennedy/Corbis: 151 l. o.; Raymond Gehman/Corbis: 151 m. o.; Frans Lanting/Corbis: 151 r. o.; D. Benne/Arco Digital Images: 151 l. m. u.; Illustration: Eric Tschern: 151 u.; Meer: Bilderberg/Alstills 53 N. 152 l. o.; http://www.currents.srns.miami.edu/southern/antarctic-cp.html: 152 l. u.; Norbert Wu: 152 m. u.; Flip Nicklin/Minden Pictures: 152 r. u.; Arthur Selbach/Lail: 153 l. o.; Stuart Westerland/Corbis: 153 r. o.; Norbert Wu/Minden Pictures: 153 r. o.; Illustration: Eric Tschern: 153 r. u.

Die Flugsieger: eye of science/Medien & Örtung: 156-159

Die Sexualität – das Jammerthal der Natur: Aus: Banks Library 13 – „Die Dagbert“, erschienen im Egmont Eha Verlag ©Doney: 161

Glossar: Illustrationen: Mark Wedling: 162; GEO-Grafik: 164-165; Rainer Hu: 166-167

Balkasten des Lebens: von links nach rechts: 199; Stockbild: Martin Harve; Gallo Images/Corbis; A. Riedmiller/Das Fotoarchiv; Vincenzo Lombardo/Gallo Images; Sven Hoffmann/Care; PhotoCuisine/Corbis; Illustration: Mark Wedling: 169-169

Vorschau: NASA: A. Fruchter and the ERO Team (STSOL): 170 o.; European Southern Observatory (ESO): 170 u.

Für unverlangt eingesandte Manuskripte und Fotos übernehmen Verlag & Redaktion keine Haftung.

© GEO 2005 Verlag Gruner + Jahr, Hamburg, für sämtliche Beiträge

Einem Teil dieser Auflage liegen folgende Beilagen bei:

GEOkompakt und GEO shop: G+J Hamburg