

# Quietschgrüne Quantenwesen

Bei der Photosynthese laufen Prozesse ab, die es nach den klassischen Naturgesetzen gar nicht geben kann.

Von Ulf von Rauchhaupt

Seth Lloyd hatte nie Biologieunterricht. „Nicht einmal im Kindergarten“, erzählt der Physiker gerne in seinen Vorträgen, die sich gleichwohl seit einigen Jahren immer wieder um ein Thema aus dem Reich des Lebendigen drehen: die Photosynthese, jene Kette biochemischer Prozesse, mittels derer die meisten Pflanzen und viele Bakterien ihren Stoffwechsel mit Solarenergie versorgen. Dann muss Lloyd seinen Zuhörern natürlich erzählen, wie er zu dem Thema kam. Im April 2007 erstaunte und belustigte den Professor für Quanteninformatik am Massachusetts Institute of Technology ein Artikel in der *New York Times*. Darin ging es um die Veröffentlichung einer Gruppe von Chemikern an der University of California in Berkeley, die behaupteten, herausgefunden zu haben, dass photosynthetisierende Einzeller aus der Gruppe der grünen Schwefelbakterien sich verhalten wie Quantencomputer.

Diese bislang noch weitgehend theoretischen Apparate nutzen die Eigenschaft mikroskopischer Objekte wie Lichtquanten oder subatomarer Teilchen, in mehreren Zuständen gleichzeitig zu existieren. Statt entweder eine Null oder eine Eins zu repräsentieren wie die Bits in herkömmlichen Computern, lassen sie sich daher als Überlagerung mehrerer Nullen und Einsen präparieren, mit denen man dann zugleich rechnen kann. Wäre das praktisch umsetzbar, würde dies eine enorme Effizienzsteigerung bedeuten, weswegen weltweit Tausende von Physikern und Informatikern an der Entwicklung von Quantencomputern arbeiten, bis dato aber erst bescheidene Quantenberechnungen durchführen können. Dafür treiben sie zudem einen bislang unpraktikablen apparativen Aufwand, denn damit Quantenphänomene als solche in Erscheinung treten, muss Materie für gewöhnlich auf Temperaturen knapp oberhalb des absoluten Nullpunkts gekühlt und mitunter im Hochvakuum von der Umgebung isoliert werden. Wie soll dergleichen im warmen, weichen und nassen Milieu biologischer Systeme möglich sein?

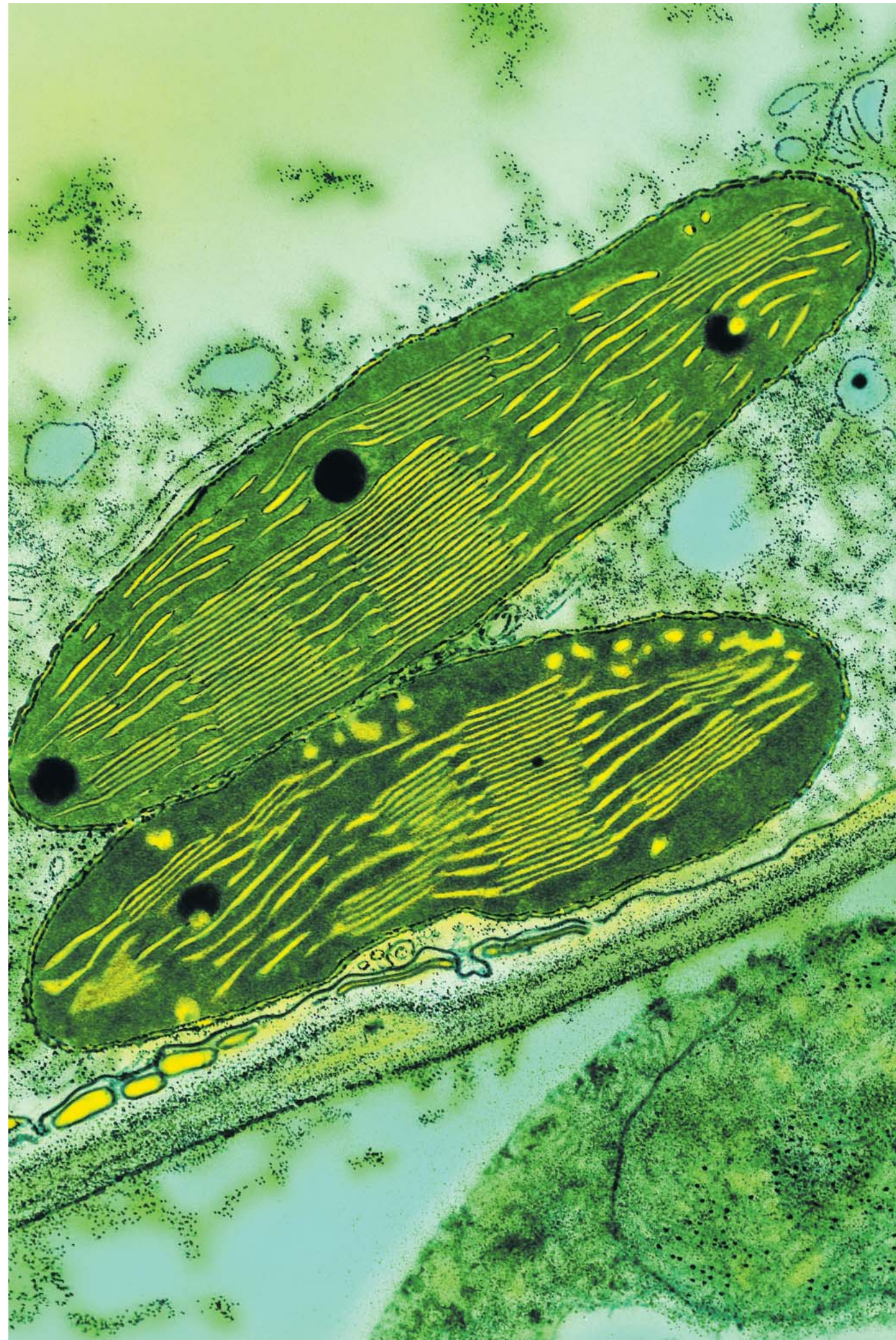
Als sich Lloyd die Veröffentlichung aus Berkeley genauer ansah, stellte er – wahrscheinlich zu seiner Erleichterung – schnell fest, dass die Photosynthese-Moleküle jener Bakterien mitnichten irgendwelche Quantenberechnungen ausgeführt hatten. Allerdings zeigen sie tatsächlich genuines Quantenverhalten. Seither ist dies auch in Pigmentmolekülen anderer lichtbedürftiger Organismen nachgewiesen worden: an Purpurbakterien, einzelligen Algen und schließlich auch Pflanzen. Das hat eine ganze neue Disziplin entstehen lassen, die Quantenbiologie, deren Protagonisten das spukhafte Treiben an der Basis der Physik längst auch anderswo im Lebendigen vermuten. Im Magnetsinn von Zugvögeln etwa oder im Geruchssinn. Während bei diesen Vorgängen noch nicht ganz klar ist, ob sie nicht doch mit klassischer Physik erklärt werden können, ist es im Fall der Photosynthese heute ein hartes experimentelles Faktum: Ohne Quantentheorie ist sie nicht zu verstehen.

Nun geht natürlich alle Chemie und damit auch Biochemie auf Quantenphysik zurück. Die in organischen Molekülen besonders wichtige sogenannte kovalente Bindung funktioniert nur, weil die Elektronen in den Hüllen der beteiligten Atome eine quantenmechanische Eigenschaft namens Spin besitzen, der sie dazu befähigt, maximal paarweise zugleich am gleichen Ort das gleiche Energieniveau zu besetzen. Doch das ist noch keine Quantenbiologie – man kann sich chemische Bindung durchaus auch als mechanisches oder elektrisches Verhaken von Atomen vorstellen, um chemische Prozesse zu verstehen und sogar vorherzusagen.

Auch der allererste Schritt der Photosynthese scheint noch im Bild der klassischen Physik verständlich: Ein Lichtquant oder Photon, das man sich hier als fliegendes Energiepäckchen denken kann, trifft auf das Molekül eines Farbstoffs, etwa Chlorophyll, und schlägt ein Elektron heraus, seinerseits als kleines negativ geladenes Kügelchen gedacht. Wo es im Molekül fehlt, ist eine positive Ladung zurückgeblieben, die das Elektron anzieht wie die Sonne die Erde. Beide bilden ein aneinander gebundenes Paar, ein sogenanntes Exziton, das die Energie des Photons weiterträgt.

Denn die positiv geladene Fehlstelle kann nun von einem der dicht gepackten Farbstoffmoleküle zum nächsten wandern und damit auch das Exziton (vereinfacht kann man sich auch ein wanderndes Elektron vorstellen, muss dann aber von dessen elektrischer Ladung absehen). Als Exziton wandert die vormalige Lichtenergie durch das von einem komplexen Proteingerüst zusammengehaltene Chlorophyllpaket, bis sie an eine spezielle Ecke des Komplexes, das Reaktionszentrum, gelangt, wo sie endlich in eine dauerhafter verfügbare Form verwandelt wird: Dort ermöglichen es die einlaufenden Exzitonen, dass auf der einen Seite der Membran, in welcher der ganze riesige farbstoffhaltige Proteinkomplex steckt, Protonen freigesetzt werden. Das dadurch erzeugte Gefälle in der Protonendichte beiderseits der Membran speichert die Energie gleich einer Batterie, aus der sich nun andere Prozesse bedienen können – bei Pflanzen etwa, um im Dunkelprozess (siehe Seite 55) Zucker zu produzieren. Die Pigmentmoleküle eines Photosynthesystems wirken also wie Antennen, welche die Lichtenergie einsammeln.

Seit diese Zusammenhänge bekannt sind, wundert man sich über die extreme Effizienz, mit der die Antennen die Lichtenergie zu den Reaktionszentren leiten. Von hundert Exzitonen gehen bei dem Tanz durch den Photokomplex, der in Pflanzen 35 Chlorophyllmoleküle umfasst, weniger als fünf verloren. Bei grünen Schwefelbakterien trifft es allenfalls eines, was für diese Lebewesen wichtig ist, denn manche von ihnen leben am lichtlosen Grund der Ozeane von den extrem selten sichtbaren Photonen in der Wärmestrahlung heißer Quellen. Die Effizienz ist erstaunlich, denn da die Exzitonen möglichst keine Energie verlieren sol-



Für den Biologen sind das Chloroplasten. Für den Physiker kohärente Zustände.

Foto Science Photo Library

len, wirkt keine äußere Kraft, um sie in Richtung Reaktionszentrum zu lotsen. Daher sollten sie mit ähnlicher Wahrscheinlichkeit in die falsche Richtung hopen wie in die richtige, bis die schiere Vielzahl von Hopsern sie dann doch irgendwann ans Ziel gelangen lässt. „Random Walk“ nennt man das.

Man könnte also denken, dass ein Exziton auf jenem, das nächste auf einem anderen Weg zum Reaktionszentrum gelangt. Was sich aber zuerst an jenem bakteriellen Pigment in Berkeley bei gezieltem Beschuss mit ultrakurzen Laserimpulsen zeigte, ist, dass solch ein Exziton gewissermaßen in alle ihm offenstehenden Richtungen gleichzeitig hüpfte. Das kann es, weil es, solange es sich selbst überlassen bleibt, in Wahrheit eben kein lokalisiertes Gebilde ist, sondern ein Quanten-

objekt, das die Farbstoffantenne als sogenannter kohärenter Zustand ausfüllt – ähnlich wie eine Welle, die ein Hindernis an beiden Seiten zugleich umspült.

Auch quantenmechanisch informierte Biochemiker hatten solche Kohärenzeffekte in biologischem Gewebe lange Zeit nicht für relevant gehalten, denn kohärente Quantenzustände sind fragil, und das umso mehr, je mehr Gelegenheit zum Energieaustausch sie haben, etwa mit den Temperaturschwingungen der Moleküle in denen sie existieren. Doch Temperatur ist etwas, was nur viele Teilchen haben können, die im Mittel genauso viel Energie an ihre Nachbarn abgeben, wie sie empfangen. Temperatur gibt es also nur in thermischen Gleichgewichten, und davon kann bei hopenenden Exzitonen keine Rede sein. Vor allem aber weisen viele

Untersuchungen darauf hin, dass bestimmte Formen des Energieaustausches das Quantentreiben in Photosynthesensystemen sogar noch befördern.

So haben 2008 Martin Plenio und Susana Huelga, die heute an der Universität Ulm forschen, sowie die Gruppe um Seth Lloyd entdeckt, dass der kohärente Exzitontransport in den Antennenmolekülen ohne ein gewisses Maß an Wechselwirkung mit den Schwingungen der molekularen Umgebung gar nicht funktionieren würde. Denn wenn man die kohärenten Exzitonen als Wellen begreift, dann kommt es mitunter zu sogenannten destruktiven Interferenzen, bei denen sich Wellenabschnitte gegenseitig auslöschten, weil ein Wellenkamm genau auf ein Wellental trifft. Der partielle Verlust kann dann aber durch Molekülschwin-

gungen wieder ausgeglichen werden. Die Störungen eröffnen Exzitonen also gewissermaßen neue Pfade, wo sie sonst hängen geblieben und, da ihre Lebensdauer endlich ist, vor dem Erreichen des Reaktionszentrums verlorengegangen wären. „Interessant ist, dass solch ein Energieaustausch in einem rauscharmen System auch reversibel sein kann“, erklärt Martin Plenio. „Ein Energiequant, das in die Vibration abgegeben wurde, kann also auch wieder zurückkehren und den Übergang rückgängig machen. Dies ist der Effekt, der die 2007 und 2010 und in späteren Arbeiten gemessenen Effekte erklärt.“ Die ganze molekulare Struktur der Antennen, etwa die Packungsdichte des Chlorophylls, wurde per Evolution offenbar genau so gestaltet, dass der exzitonische Energietransport optimal abläuft.

Weswegen man sich unwillkürlich fragt, ob die Quantenkohärenz ein unverzichtbares Element der Photosynthese ist oder nur ein bloßes Nebenprodukt der Evolution, zu dem es ohne spezifischen Selektionsdruck gekommen ist. „Schwierige Frage“, sagt Gregory Scholes von der Princeton University, dessen Arbeitsgruppe 2010, damals noch in Toronto, als erste beobachtet hatte, dass Quantenkohärenz in Photosynthese-Systemen auch bei Raumtemperatur auftritt. „Wir können ja nur die Natur studieren, die wir eben haben.“ Rienk van Grondelle von der Freien Universität Amsterdam ist sich da schon sicherer: „Aus meiner Sicht ist die erstaunliche Geschwindigkeit und Effizienz der ersten Prozesse der Photosynthese zum großen Teil ihrer intrinsischen Quantennatur zu verdanken. Wie genau, wussten wir lange nicht, weil wir nicht die Instrumente hatten, sie zu studieren. Das hat sich jetzt geändert.“

Dabei zeigt sich, dass der Exzitontransport nicht nur von einem breitbandigen Hintergrundrauschen befördert wird, das vor allem auf das Proteingerüst zurückgeht, sondern auch von spezifischen Schwingungen in den Farbstoffmolekülen. „Das sind dann die, welche die Ladungstrennung unterstützen“, sagt Plenio. Mit seinen Mitarbeitern hat er ein Modell entwickelt, das die experimentellen Daten reproduziert und zwingend solche Arten von Vibrationen enthält (im Physikerdeutsch heißen sie „Moden“), die an die Exzitonen koppeln. „Wenn wir nun diese Vibrationsmoden aus dem Modell entfernen, aber sonst alle Parameter gleich lassen, dann sehen wir, dass die Ladungstrennung etwa zehnmal langsamer verläuft und daher sehr ineffizient wird.“

Diese Befunde werden inzwischen auch experimentell gestützt. Christoph Lienau von der Universität Oldenburg hat den Effekt zusammen mit Plenios Gruppe 2016 an künstlichen Systemen nachgewiesen und das Team Rienk van Grondelles an einem der beiden Photosysteme, die in Algen, Cyanobakterien und Pflanzen zusammenwirken. Damit hätte die Quantenphysik ihre Finger also nicht nur beim Einsammeln der Lichtenergie durch die molekularen Antennen im Spiel, sondern auch bei ihrer Umwandlung in eine speicherbare elektrochemische Form.

Solche Ergebnisse dürften von nicht unerheblicher Bedeutung für die Versuche sein, bei der Natur abzukupfern. Systeme wie das von Lienau und Plenio untersuchte wollen das hocheffiziente Einsammeln der Lichtenergie sowie die Ladungstrennung von den Pflanzen und Bakterien abschauen, aber nicht, um damit künstliche Photosynthese zu betreiben, sondern um sie in die Energieform zu verwandeln, die dem Menschen die liebste ist: in elektrischen Strom. Die Forscher arbeiten also an organischen Solarzellen. Die Zeiten, in denen Physiker ohne Biologiekenntnisse durchkamen, könnten angesichts solcher Entwicklungen demnächst vorbei sein. Andererseits droht Biologiestudenten nun vielleicht bald ein Kurs in Quantenmechanik.

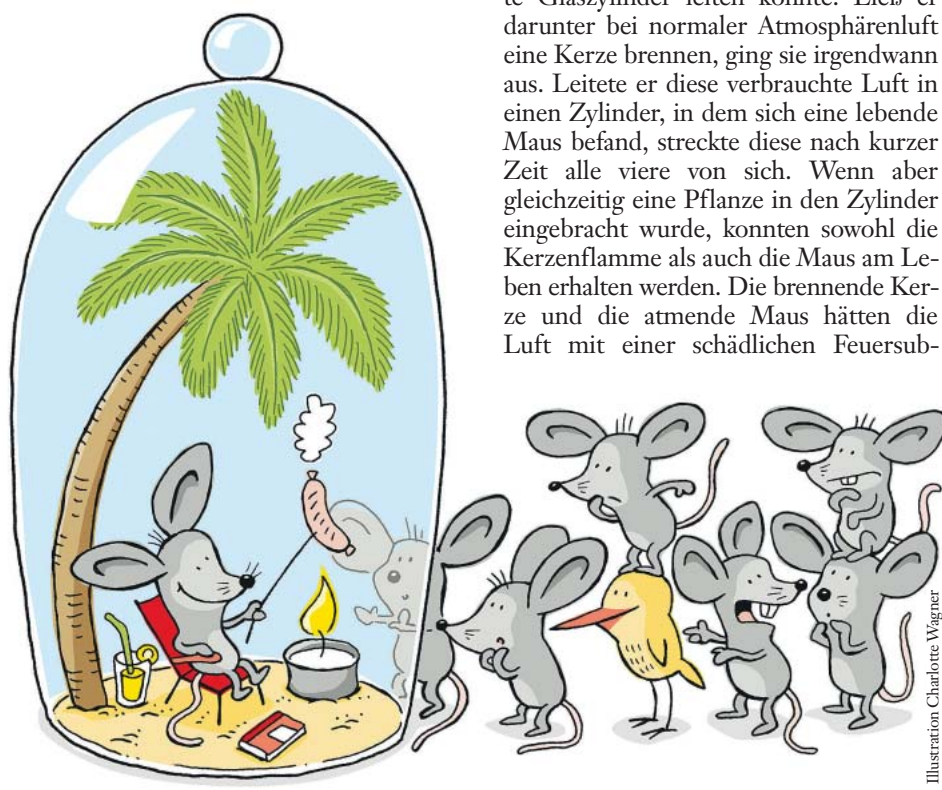
Zu den schönsten Momenten im Leben des Gärtners gehört es, wenn er nach einem Tag, den er in der Stadt verbracht hat, endlich das Gartentor aufsperrt und tief durchatmet. Ah, diese Luft! Gleich fühlt man sich wieder als Mensch.

Das Atemholen bietet zweierlei Gnade, fand Johann Wolfgang von Goethe: „Die Luft einziehen, sich ihrer entladen; jenes bedrängt, dieses erfrischt“, so wunderbar sei das Leben gemischt. Sein englischer Zeitgenosse Joseph Priestley war der Sache da schon Jahre zuvor auf den Grund gegangen. Als ausgebildeter Theologe war Priestley gleichwohl davon überzeugt, dass man religiösen Fragen mit naturwissenschaftlichem Sachverstand begegnen müsse und umgekehrt die Wissenschaft dazu beitrage, die göttlichen Pläne zu erforschen – eine Position, die ihn notwendigerweise zwischen allen Stühlen landen ließ und dazu führte, dass aufgebrauchte Massen am 14. Juli 1791 in sein Haus in Birmingham eintrugen und es samt Bibliothek und Labor dem Erdboden gleichmachten. Priestley musste die Stadt verlassen und wanderte später nach Pennsylvania aus.

Priestley veröffentlichte mehr als 150 Schriften zu den unterschiedlichsten Themen der Theologie, Physik, Chemie, Philosophie und Pädagogik. Doch

## IM GRÜNEN BEREICH LEBE LUFTIG, LEBE FROH

VON JÖRG ALBRECHT



in die Annalen der Naturwissenschaft ist er vor allem mit einem Experiment eingegangen, das heute noch als „Priestley-Versuch“ im Schulunterricht gelehrt wird. Er hatte dazu eine Apparatur entwickelt, mit deren Hilfe er Gase in luftdichte Glaszylinder leiten konnte. Ließ er darunter bei normaler Atmosphärenluft eine Kerze brennen, ging sie irgendwann aus. Leitete er diese verbrauchte Luft in einen Zylinder, in dem sich eine lebende Maus befand, streckte diese nach kurzer Zeit alle vier von sich. Wenn aber gleichzeitig eine Pflanze in den Zylinder eingebracht wurde, konnten sowohl die Kerzenflamme als auch die Maus am Leben erhalten werden. Die brennende Kerze und die atmende Maus hätten die Luft mit einer schädlichen Feuersub-

stanz angereichert, erklärte Priestley das Phänomen im Einklang mit der damals noch populären Phlogiston-Theorie. Die Pflanze hätte nun dafür gesorgt, dass sich wieder genügend dephlogistierte Luft gebildet hätte. Denselben Effekt erzielte Priestley, wenn er ein Gas einleitete, das er durch Erhitzen von Quecksilberoxid gewann. In Wahrheit hatte er damit erstmals nachgewiesen, dass Atmung und Verbrennung Sauerstoff benötigen, der auf natürlichem Wege durch Pflanzen erzeugt wird.

Die Forschung hat noch eine Weile gebraucht, bis sie alle grundlegenden Prozesse verstanden hat, die bei der Photosynthese ablaufen. Priestley selbst wird außerdem die Erfindung des Sodawassers zugeschrieben, von dem er glaubte, es könne gegen Skorbut helfen. Er stellte es her, indem er Schwefelsäure und Kalk miteinander reagieren ließ und das entstehende Kohlendioxid in Wasser löste; vermarktet hat es dann der deutsche Uhrmachermeister Jacob Schweppe („Schwepes-Wasser“). Priestley soll ferner den Radiergummi erfunden haben, doch er hat nur darüber berichtet, dass dies dem Instrumentenbauer Edward Nairne gelungen sei. Goethe im Übrigen hat Priestley von tiefstem Herzen gehasst, weil der es gewagt hatte, die „anbrüchige Newtonsche Lehre“ von den Spektralfarben des Lichts zu verteidigen.

## INS NETZ GEGANGEN



## GELERNT IST GELERNT

VON JOCHEN REINECKE

Die multimediale Plattform „planet schule“, ein Gemeinschaftsprojekt der Sender WDR und SWR, hat sich moderne und schülergerechte Wissensvermittlung auf die Fahnen geschrieben. Wer die Photosynthese noch einmal ganz einfach und gut verständlich erklärt bekommen möchte, kann das in der Rubrik „Frage trifft Antwort“ (<http://www.planet-schule.de/frage-trifft-antwort/spieldetails/animation-fotosynthese-der-pflanzen.html>) in Form eines animierten Lehrvideos nachvollziehen.

Zunächst wird Ihnen „Chloro“ der Chloroplast vorgestellt, dann dürfen Sie selbst aktiv werden und die verschiedenen Elemente beziehungsweise Stufen der Photosynthese per Maus-

click erkunden. Sobald Sie die Grundzüge verstanden haben, können Sie vier themenverwandte Videos betrachten, beispielsweise „Wie ernähren sich Pflanzen?“ oder „Wie erobern Pflanzen Neuland?“. Zu guter Letzt gibt es auf dieser Themenseite interaktive Quizfragen, mit denen Sie überprüfen können, ob Sie beim Betrachten der Videos auch gut aufgepasst haben.

Die Photosynthese ist auf dieser Website nur eines von zahlreichen naturwissenschaftlichen Themen. Beim Klick auf das Logo „Frage trifft Antwort“ oben links kommen Sie auf die Übersichtsseite, hier gibt es noch viele weitere Specials, beispielsweise zu Vulkanen, den Gezeiten, Krankheitssergern oder Aggregatzuständen der Materie. Sehenswert!

Nun zu unserem Rätsel: Gegen welche zuweilen unangenehme menschliche Eigenschaft kann Chlorophyll helfen? Bitte schicken Sie Ihren Lösungsvorschlag an [j.reinecke@faz.de](mailto:j.reinecke@faz.de). Unter allen richtigen Einsendungen verlosen wir einen Einkaufsgutschein für ebook.de im Wert von 25 Euro. Einsendeschluss ist der 2. August 2017, 21 Uhr.

Das Rätsel der vergangenen Woche hat Ingo Jansen aus Bad Godesberg mit der Lösung „Knocker“ gewonnen. Herzlichen Glückwunsch!