

Physik und Leben



◀ **Titelbild:**

Eine einzelne Nervenzelle aus dem Hirn einer Ratte sitzt auf einem Siliziumchip. Dadurch lassen sich die Nervensignale direkt auf den Chip übertragen. Komplexere Netzwerke aus Nervenzellen und Mikroelektronik könnten Anwendungen in der Neurobiologie oder Medizintechnik ermöglichen.

▶ **Bild rechts:**

Eine weiterentwickelte Form der Elektronenmikroskopie, die Elektronentomographie, erlaubt es, einzelne Makromoleküle in Zellen zu identifizieren und deren Struktur zu analysieren. Die Abbildung zeigt ein Elektronentomographiebild des Archäobakteriums *Pyrodictum abyssi*, in das die Struktur eines makromolekularen Proteinkomplexes einmontiert ist.



Gefördert vom

**Bundesministerium
für Bildung
und Forschung**

Deutsche Physikalische Gesellschaft



Deutsches Museum

wissenschaft : im dialog

„Mit ihrer Fähigkeit, komplexe Probleme auf wesentliche Aspekte zu reduzieren und universelle Gesetzmäßigkeiten aufzuspüren, sind Physikerinnen und Physiker prädestiniert dazu, über ihren Tellerrand zu schauen und ihre Methoden interdisziplinär anzuwenden. Sei es in anderen Naturwissenschaften wie der Biologie, sei es in Industrie und Wirtschaft, beispielsweise im Management“, so Dirk Basting, Präsident der Deutschen Physikalischen Gesellschaft.

Nach dem „Jahr der Physik“ wird die Reihe der großen Veranstaltungen für die Öffentlichkeit im Jahresturnus mit den „Highlights der Physik“ fortgeführt. Den Auftakt bildet passend zum aktuellen „Jahr der Lebenswissenschaften“ die Veranstaltung „Physik und Leben“ unter der Regie von Bundesministerium für Bildung und Forschung, Deutsche Physikalische Gesellschaft sowie Deutsches Museum, Zentrum Neue Technologien.

Weitere Informationen unter
www.physik-und-leben.de

Impressum

Autor:

Alexander Pawlak, Marburg

Gestaltung:

Gunther Schulz, Fußgönheim

Redaktion und Herstellung:

Wiley-VCH Verlag, Weinheim

Herausgeber:

Bundesministerium für Bildung und Forschung

(bmb+f)

Deutsche Physikalische Gesellschaft e.V. (DPG)

Deutsches Museum

Weitere Informationen:

Deutsche Physikalische Gesellschaft e.V.

Pressestelle

Hauptstr. 20a

53604 Bad Honnef

Telefon: (02224) 95195-18

Telefax: (02224) 95195-19

E-Mail: presse@dpg-physik.de

Inhaltsverzeichnis

Physik und Leben

Lebendige Materie..... 2

Strahlen auf Rezept

Phantastische Einblicke5

Heilen mit Licht 8

Moleküle des Lebens

Die Atome der Vererbung..... 11

Der Struktur auf der Spur.....13

Physik in der Zelle

Lebendige Maschinen17

Sinne und Signale20

Was ist Leben?22

Weiterführende Links.....24

Ausstellungskatalog..... 25

Lebendige Materie

Physik bestimmt unser tägliches Leben, man denke nur an die unübersehbaren Anwendungen der Quanten- und Festkörperphysik, etwa in Form der allgegenwärtigen Computer, Handys usw. Aber hat Physik auch etwas mit dem Leben an sich zu tun, mit der unübersehbaren Fülle an Organismen und Lebensvorgängen? Wohl kaum, könnte man meinen, ist doch die Physik nach landläufiger Meinung die Wissenschaft von der unbelebten Materie. Und doch führen physikalische Entdeckungen immer wieder zu Entwicklungsschüben in der Wissenschaft vom Leben.

Sehhilfen für die Biologie

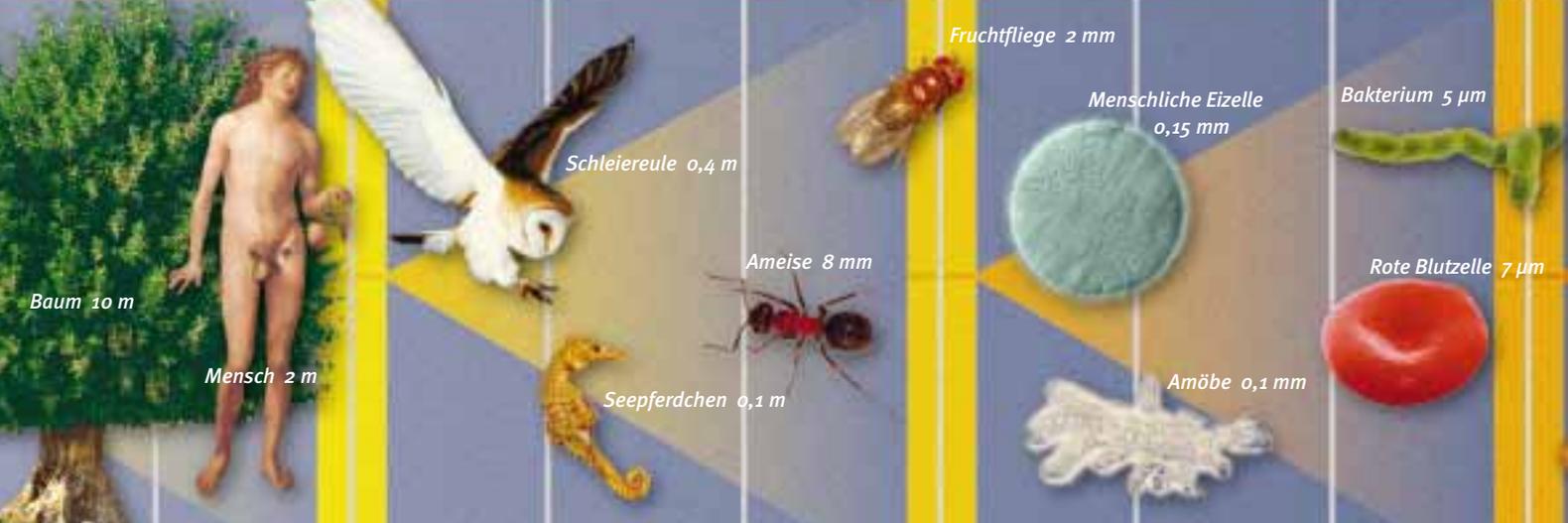
Erst die Erfindung des Mikroskops im Jahre 1670 durch den niederländischen Kaufmann und Naturforscher Anton van Leeuwenhoek machte es möglich, die kleinsten lebensfähigen Einheiten zu beobachten, die Zellen. Mit dem Elektronenmikroskop erschloss sich dann der Reichtum ihres inneren Aufbaus. Und die so genannte Röntgenstrukturanalyse bildet schließlich das unverzichtbare Rüstzeug der modernen Molekularbiologie, die in den dreißiger Jahren des letzten Jahrhunderts stark von Physikern geprägt wurde. Höhepunkte des folgen-

den Aufschwungs der Biologie sind die Entdeckung der DNA-Struktur und die Entzifferung des menschlichen Genoms durch das Human Genome Project (HUGO).

Anstöße für die Physik

Umgekehrt haben auch biologische Erkenntnisse die Physik vorangebracht. So machte auf der indonesischen Insel Java vor über hundertfünfzig Jahren der deutsche Julius Robert Mayer als Schiffsarzt eine weitreichende Entdeckung. Bei Aderlässen stellte er fest, dass das Blut, das in den Venen zum Herzen zurückfließt, in den Tropen heller, das heißt sauerstoffreicher als in den gemäßigten Zonen ist. Er schloss daraus, dass Menschen in den Tropen bei gleicher Arbeitsleistung weniger Energie verbrauchen als im kühleren Europa, da sie weniger Wärme an die Umgebung abgeben. Mayer vermutete, dass Wärme und mechanische Energie äquivalent seien. Der englische Physiker James Joule kam unabhängig von Mayer zum gleichen Schluss und demonstrierte dies auch experimentell. Erst der Physiologe und Physiker Hermann von Helmholtz formulierte allerdings den allgemeinen Satz von der Erhaltung der Energie in einer mathematisch-physikalischen

Meter (m)	10	1	0,1	0,01	0,001			
Millimeter ($10^{-3}m$)		1.000	100	10	1	0,1	0,01	0,001
Mikrometer ($10^{-6}m$)		1.000.000	100.000	10.000	1.000	100	10	1
Nanometer ($10^{-9}m$)					1.000.000	100.000	10.000	1.000



Sprache. Demnach lassen sich zwar verschiedene Energieformen ineinander umwandeln, etwa potentielle in kinetische Energie (oder wie man damals sagte „Fallkraft“ in „lebendige Kraft“). Energie kann aber nicht einfach spurlos verschwinden oder aus dem Nichts entstehen.



„Wenn wir (...) in der Lage sind, die Untersuchung der Funktionsweise der lebenden Dinge so weit voranzutreiben wie die der atomaren Phänomene, sollten wir kaum erwarten, dass wir auf andere Gesetzmäßigkeiten stoßen, als bei der anorganischen Materie.“
Niels Bohr

Ein weiteres Beispiel ist die Beobachtung des Botanikers Robert Brown, dass staubfeine Bärlappsporen im Wasser winzige, regellose Zitterbewegungen ausführen. Davon ausgehend gelang es Albert Einstein, der Vorstellung vom atomaren Aufbau der Materie zum Durchbruch zu verhelfen.

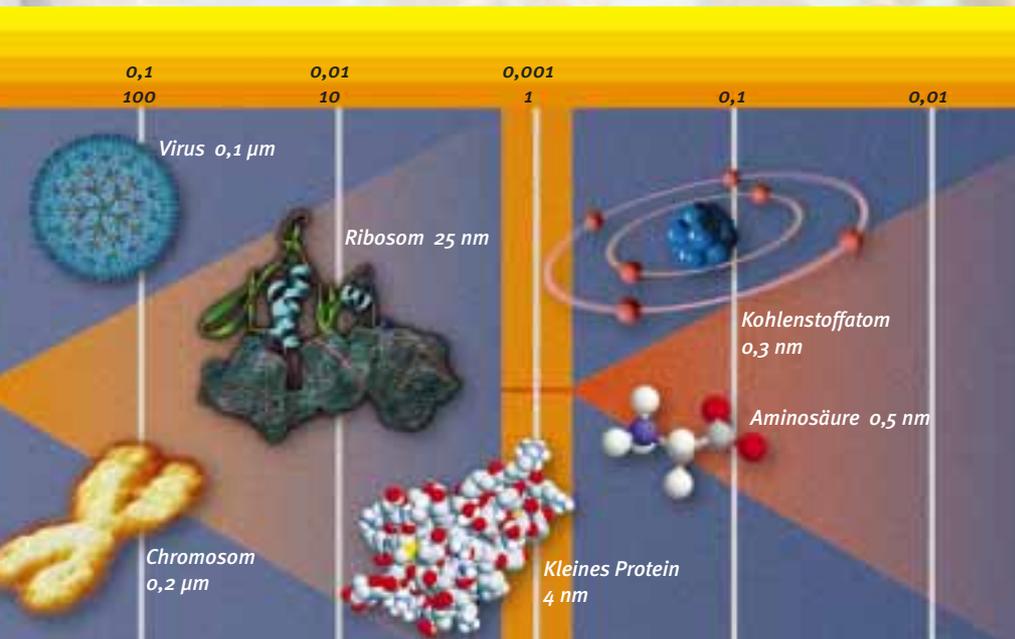
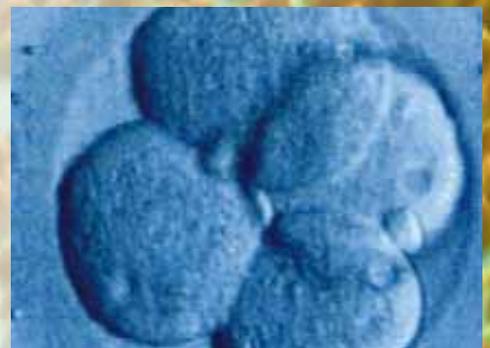
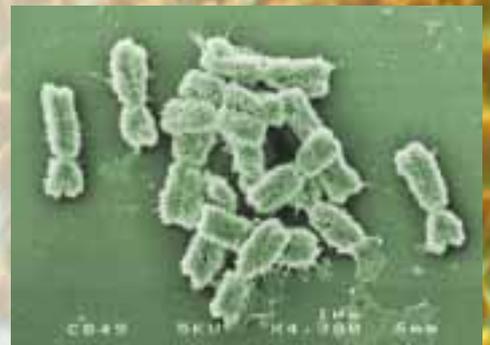
Lebendige Physik

Immer wieder haben sich Physik und Biologie in der Vergangenheit auf verschlungenen Pfaden getroffen, aber auch wieder voneinander entfernt. Gerade in den letzten Jahrzehnten sind sie sich zunehmend näher gekommen, so dass eine enge und fruchtbare Zusammenarbeit entstanden ist. Dabei stehen nicht mehr nur die nützlichen Instrumente für die biologische Forschung im Vordergrund, sondern die Physik beginnt, Lebewesen und ihren Aufbau mit ganz eigenen Augen zu betrachten. Schließlich gehorchen auch die Vorgänge des Lebens grundsätzlich denselben physikalischen Gesetzen, die auch für Atome, Steine und Maschinen

gelten. Dabei sind Lebewesen jedoch viel mehr als nur besonders komplizierte Anordnungen von Atomen. Physiker, die sich mit der Struktur von Proteinen, dem Aufbau der Zellmembran oder der Funktion des Gehirns beschäftigen, müssen sich deshalb auch für die Fragen der Biologie interessieren. Dabei müssen viele Größenordnungen unter einen Hut gebracht werden, was enorme Herausforderungen an Theorie wie Experiment

stellt – zehn Zehnerpotenzen trennen beispielsweise die Größe von Atom und Mensch. Ziel ist es, die Lebensvorgänge von physikalischen Grundprinzipien her zu verstehen. Wie sind biologische Materialien aufgebaut, welche Eigenschaften haben sie? Oder: Wie bewegen sich Organismen, woraus gewinnen sie ihre Energie? Und nicht zuletzt: Was ist Leben und wie ist es entstanden? Notwendige Voraussetzung, um diese Fragen lösen zu können, ist eine interdisziplinäre Kooperation zwischen Physik, Biologie, Chemie, aber auch der Informatik und den Ingenieurwissenschaften.

Doch es gilt nicht nur Leben zu untersuchen, sondern auch zu bewahren. Denn zu guter letzt wäre die moderne Medizin ohne ihre physikalischen Methoden und Apparate undenkbar. Unsere Rundreise durch die Physik des Lebendigen beginnt daher beim komplexesten Lebewesen, das wir kennen, dem Menschen.



Strahlen auf Rezept

Der gläserne Mensch – in der Medizin scheint er auf positive Weise Wirklichkeit geworden zu sein. Die mittlerweile fast handgreiflichen Ansichten innerer Organe lassen dabei fast vergessen, dass sie ihre Herkunft unsichtbaren Strahlen und winzigen Teilchen verdanken. Auch wenn sich die zugrundeliegenden physikalischen Phänomene oft nur in der abstrakten Sprache der Mathematik adäquat beschreiben lassen, eröffnen sie uns faszinierende Einblicke in den menschlichen Körper. Was den Wissenschaftlern einst Kopfzerbrechen bereitete, hilft heutzutage dabei, Krankheiten immer besser zu diagnostizieren und Operationen zu planen. Und die Möglichkeiten sind noch längst nicht ausgeschöpft.



Phantastische Einblicke

Alles ist vorbereitet für eine komplizierte Operation. Der Chirurg schweift mit seinem Blick durch das Innere des Brustraums, ungehindert durch Haut und Rippen. Zunächst betrachtet er eingehend die Lunge mit ihren fein verästelten Gefäßen: Frische Luft durchströmt nach wie vor beide Lungenflügel des Patienten. Auch der Anblick des Herzens beruhigt den Arzt: Die Klappen öffnen und schließen sich ohne jede Beanstandung, das Herz schlägt ruhig und gleichmäßig. Noch wurde kein Skalpell zum Schnitt angesetzt, kein Tropfen Blut ist geflossen. Die Operation kann beginnen – die beschriebene Situation ist gewiss noch eine Zukunftsvision, aber eine Vision, welche Forscher und Techniker bei der Entwicklung neuer Verfahren für die medizinische Bildgebung durchaus beflügelt.

Rätselhafte Strahlen...

Im Jahre 1895 berichtete ein bis dahin unbekannter Würzburger Physiker von einer folgenreichen Beobachtung: „Hält man die Hand zwischen den Entladungsgang und den Schirm, so sieht man die dunkleren Schatten der Handknochen, in dem nur wenig dunklen Schattenbild der Hand.“ Dieser unerwartete Einblick war die Folge einer Zufallsentdeckung. Wilhelm Röntgen wollte in seinen Versuchen mit einer Kathodenstrahlröhre eigentlich den elektromagnetischen Erscheinungen auf den Grund gehen. Die Röhre hatte er dabei, so dachte er zunächst, sorgfältig mit einer Papphülle abgeschirmt.

Als er jedoch feststellte, dass ein neben der Röhre stehender Schirm während der Versuche zu leuchten begann, genauer fluoreszierte, setzte er fast alles, was ihm in die Finger kam, der rätselhaften Strahlung aus, die er für das Leuchtphänomen verantwortlich machte: „ein Buch von 1000 Seiten, ein doppeltes Whistspiel, einzelne Spielkarten“, und die Hand seiner Frau. Röntgen, ein äußerst sorgfältiger Experimentator, ließ nichts



◀ Das erste Röntgenbild nahm Wilhelm Röntgen von der Hand seiner Frau Berta auf. Bei dem dunklen Fleck handelt es sich um einen Ring.

unversucht. Die meisten Materialien schwächten die X-Strahlen, wie Röntgen sie taufte, nicht nennenswert ab. Verschiedene Metalle vermochten die Strahlung dagegen deutlich abzuschirmen.

...und ihr durchdringender Erfolg

Den Nutzen von Röntgens Entdeckung erkannte man unmittelbar. Der Siegeszug der X-Strahlen war deshalb geradezu schwindelerregend. Mediziner begeisterten sich für den unverstellten Blick in den transparent gewordenen menschlichen Körper. Die Zahl der wissenschaftlichen Arbeiten zum Thema explodierte geradezu.

Der Erfolg der Röntgenstrahlung trieb kuriose Blüten. Sogar die Passform von Schuhen ließ man mit ihnen überprüfen. Doch ein schmerzhafter Selbstversuch des amerikanischen Ingenieurs Elihu Thomson wies bereits 1896 auf schädliche Nebenwirkungen hin. Er setzte sich regelmäßig längerer Röntgenbestrahlung aus. Die Folgen: Wie bei einem starken Sonnenbrand lösten sich Teile der Haut ab und heilten nur äußerst ungenügend. Damit war der, zugegeben unfreiwillige, Grundstein für die Strahlenbiophysik gelegt, die sich mit der Wirkung ionisierender Strahlen auf Organismen beschäftigt.



▲ Röntgenuntersuchung anno 1897.



▲ *Mit wachsender Kenntnis der physikalischen Zusammenhänge und leistungsfähigeren Computermethoden lassen sich immer feinere Strukturen in den Röntgenbildern herausarbeiten.*

Die Physiker wurden indes lange Zeit mit den X-Strahlen nicht so recht froh. Der hochangesehene Professor für theoretische Physik Arnold Sommerfeld klagte noch 1905: „Es ist eigentlich eine Schande, dass man 10 Jahre nach der Röntgenschen Entdeckung immer noch nicht weiß, was in den Röntgenstrahlen los ist.“ Erst 1912 erhielt man Klarheit über die Natur der rätselhaften Strahlen, als sich zeigte, dass es sich wie das sichtbare Licht um elektromagnetische Strahlung handelt, nur mit einer viel kürzeren Wellenlänge. Diese entsprach etwa den kürzesten Atomabständen in Kristallgittern. Eine Tatsache, die sich als äußerst weittragend erweisen sollte und schließlich 1953 zur Aufklärung der Struktur der Erbsubstanz Desoxyribonukleinsäure (DNA) beitrug.

vielen Richtungen durch einen Querschnitt des Körpers. Ein empfindlicher Detektor nimmt alle Signale auf, welche dann von einem Computer gespeichert und verarbeitet werden. Der unbefangene Blick auf die Röntgenbilder ist einer komplizierten Rechenprozedur gewichen. Erst damit lassen sich aus der Datenflut der Messwerte räumliche Bilder des Körperinneren rekonstruieren. Dann bietet sich beispielsweise nicht mehr nur ein Bild übereinander projizierter Umriss der Knochen, sondern ein Anblick ihrer Lage zueinander oder ihres inneren Aufbaus.

Der Dreh mit dem Kern

Der menschliche Körper ist außer für Röntgenstrahlen auch für Kurz- und Ultrakurzwellen (Radiostrahlung) durchlässig, deren Wellenlängen im Zentimeterbereich liegen. Direkt durchleuchten lässt sich der Körper damit wegen optischer Begrenzungen zwar nicht. Aber 1973 erkannte der Amerikaner Paul C. Lauterbur, wie sich die Kurzwellenstrahlung trotzdem für die medizinische Bildgebung ausnutzen lässt. Es war bekannt, dass der Kern des Wasserstoffatoms, der nur aus einem Proton besteht, im Magnetfeld besonders ausgeprägt Kurzwellenstrahlung absorbiert. Da der menschliche Körper zu mehr als siebenzig Prozent aus Wasser besteht, und Wasser wiederum aus einem Sauerstoffatom und zwei Wasserstoffatomen, ist der Kern des Wasserstoffs am häufigsten im lebenden Gewebe vertreten.

▼ *Die Magnetresonanztomographie erlaubt es, feinste Gefäßsysteme abzubilden, wie etwa hier in den Nieren, deren Umriss links zu erkennen sind.*

Mit dem Computer in die dritte Dimension

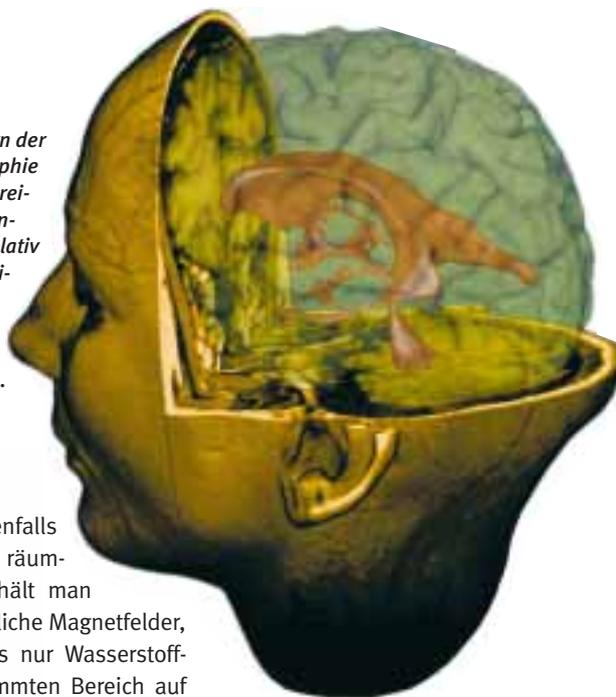
Der Röntgenblick in den Körper bleibt zweidimensional, die Aufnahme enthält keine räumliche Information. Alles, was zwischen Röntgenstrahl und Fotoplatte oder Röntgenschirm liegt, wird übereinander projiziert, die uninteressanten Körperschichten überschatten dabei gewissermaßen die interessierenden Regionen.

Erst der Computer brachte einen entscheidenden Durchbruch. Der südafrikanisch-amerikanische Physiker Allan Cormack beschrieb bereits 1963 die theoretischen Grundlagen für die Computertomographie oder kurz CT. Knapp zehn Jahre später realisierte der britische Ingenieur Godfrey Hounsfields den ersten Computertomographen. Die Röntgenröhre wird kreisförmig, neuerdings auch auf einer Schraubenlinie, um den Körper herumgeführt und sendet so ihre Strahlen aus

Im konstanten Magnetfeld richten sich die so genannten Spins (oder magnetischen Momente) der Wasserstoffkerne aus. Dabei sind nur zwei Einstellungen möglich: parallel oder antiparallel zum Magnetfeld, wobei die parallele ein wenig häufiger auftritt. Mit einem Hochfrequenzsignal zwingt man nun die Spins zum „Umklappen“. Dabei entsteht ein messbares Signal. Die Art und Weise, wie die Spins der Wasserstoffkerne nach dem Umklappen wieder in ihre ursprüngliche Lage zurückfinden und wieder angeregt werden können, unterscheidet sich in verschiedenen Gewebearten. Deswegen liefert die so genannte Kernspintomographie (oft auch als Magnetische Kernresonanztomographie bezeichnet) äußerst kontrastreiche Bilder vor allem der Weichteile. Entzündungen oder Tumore beeinflussen zusätzlich die Gewebeeigenschaften und



► Aus den Schnittbildern der Magnetresonanztomographie lassen sich mittlerweile dreidimensionale Bilder rekonstruieren. Noch ist dies relativ zeitaufwändig. Doch Mediziner, Physiker und Informatiker arbeiten daran, diese Methoden auch praxistauglich zu machen.



lassen sich somit ebenfalls sichtbar machen. Die räumlichen Verhältnisse erhält man durch weitere veränderliche Magnetfelder, die dafür sorgen, dass nur Wasserstoffatome in einem bestimmten Bereich auf die Kurzwellenstrahlung reagieren.

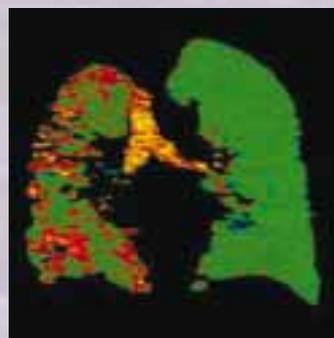
Zunächst war die Kernspintomographie vor allem für Untersuchungen des Gehirns gedacht. Erst mit größeren, supraleitenden Magneten ließ sich auch der gesamte Körper abbilden. Neben Tomographen, die den Patienten vollständig umschließen, existieren mittlerweile auch offene Bauarten, die ärztliche Eingriffe während der Bildaufnahme erlauben. Die Möglichkeiten der Kernspintomographie auszuschöpfen stellt eine Fülle kniffliger wissenschaftlicher und technischer Probleme. So versucht man, mit komplizierteren Folgen von Hochfrequenzimpulsen neue Strukturen sichtbar zu machen oder Störeffekte zu vermeiden. Je mehr Daten und Bilder dabei anfallen, umso leistungsfähiger müssen die Computer für die Bildverarbeitung sein. Das gilt auch für jede

Steigerung des Auflösungsvermögens, das derzeit im Bereich eines Millimeters liegt.

Wer weiß, welche neuen, überraschenden Methoden weitere Einblicke in den Körper gewähren? Ob sich die vielfältigen Verfahren der medizinischen Bildgebung tatsächlich einmal so weit entwickeln lassen, dass sie einen vollständigen virtuellen Flug durch das Innere des Menschen gestatten, ist dabei natürlich ungewiss. Den gemeinsamen Anstrengungen von Medizinern, Physikern und Informatikern ist es auf jeden Fall zu verdanken, dass wichtige Stationen auf dem Weg dorthin bereits erreicht worden sind.

Grundlagenforschung zum Einatmen

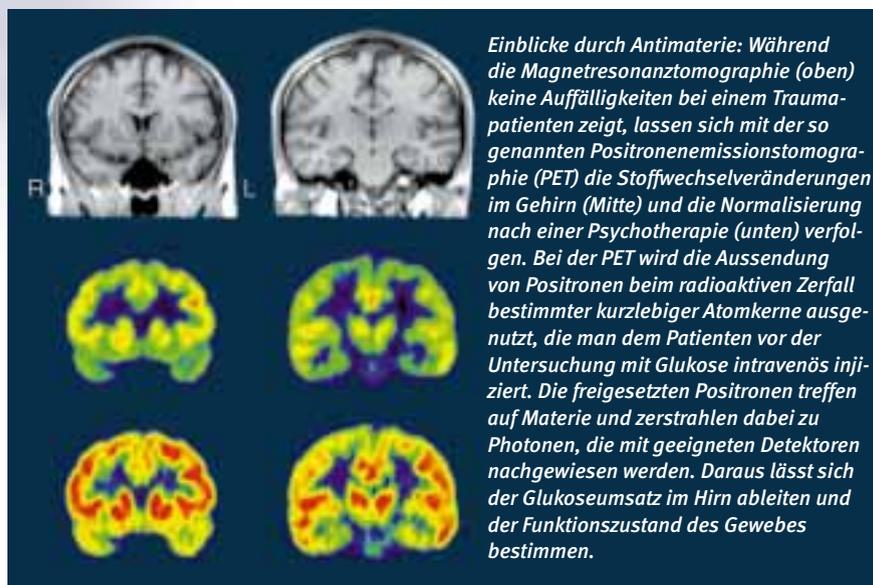
Mit immer schnelleren Bildfolgen lassen sich in der Kernspintomographie mittlerweile auch Körperfunktionen sichtbar machen, etwa das Schlagen des Herzens. Doch die Lungenaktivität kann mit den herkömmlichen Methoden nicht oder nur sehr unzureichend beobachtet werden. So befinden sich in luftgefüllten Lungengefäßen zu wenig Wasserstoffkerne, um ein merkliches Resonanzsignal zu liefern. Doch gerade die Verstopfung von Lungengefäßen, die so genannten Lungenembolien, gehören zu den lebensgefährlichen Komplikationen bei Operationen und Entbindungen. Diese frühzeitig zu erkennen könnte helfen, Menschenleben zu retten.



Ein unerwarteter Fortschritt kam aus der Elementarteilchenphysik. Mainzer Physiker hatten ein Verfahren entwickelt, um so genanntes spinpolarisiertes Helium-3-Gas herzustellen, mit dem sich Neutronen (neben den Protonen und Elektronen Grundbausteine der Materie) polarisieren lassen.

► Mit spinpolarisiertem Helium-3-Gas lässt sich ein gesunder, transplantiertes Lungenflügel (rechts) von einem erkrankten unterscheiden. Die roten und gelben Flecken kennzeichnen dabei die Bereiche, in denen sich die Atemluft nicht ungehindert ausbreiten kann, weil das Bläschengewebe geweitet und zersetzt ist.

Nach ihren erfolgreichen Experimenten warfen die Mainzer Physiker einen Blick über den Tellerrand des eigenen Forschungsgebietes hinaus. Warum nicht die Eigenschaften des Helium-3-Gases für die medizinische Bildgebung nutzen? Atmet ein Patient mit der Luft eine geringe Beimischung spinpolarisierten Helium-3-Gases ein, so lässt sich damit auch in der Atemluft ein messbares Resonanzsignal erzeugen. Die Verteilung der eingeatmeten, frischen Luft in der Lunge wird somit sichtbar. Die ersten Versuche mit Testpersonen verliefen vielversprechend. Jetzt gilt es, die Methode bis zur klinischen Einsatzreife weiterzuentwickeln und dabei immer feinere Gefäßstrukturen in der Lunge aufzulösen.



Einblicke durch Antimaterie: Während die Magnetresonanztomographie (oben) keine Auffälligkeiten bei einem Traumapatienten zeigt, lassen sich mit der so genannten Positronenemissionstomographie (PET) die Stoffwechselveränderungen im Gehirn (Mitte) und die Normalisierung nach einer Psychotherapie (unten) verfolgen. Bei der PET wird die Aussendung von Positronen beim radioaktiven Zerfall bestimmter kurzlebiger Atomkerne ausgenutzt, die man dem Patienten vor der Untersuchung mit Glukose intravenös injiziert. Die freigesetzten Positronen treffen auf Materie und zerstrahlen dabei zu Photonen, die mit geeigneten Detektoren nachgewiesen werden. Daraus lässt sich der Glukoseumsatz im Hirn ableiten und der Funktionszustand des Gewebes bestimmen.

Heilen mit Licht

▲ Was ist das? (A) Der Urknall, (B) eine Szene aus einem Science-Fiction-Film, oder (C) eine Nierensteinzertrümmerung mit dem Laser?

Wer jetzt auf (C) getippt hat, liegt richtig. Allerdings handelt es sich nicht um ein live aufgenommenes Bild während einer Operation, sondern um eine aufwändige Mehrfachbelichtung, welche den physikalischen Vorgang der so genannten Laserinduzierte-Stoßwellen-Lithotripsie veranschaulichen soll. Auf winzigstem Raum wird dabei für weniger als eine Milliardestel Sekunde eine Leistung freigesetzt, die durchaus der eines Kraftwerks entsprechen kann. Die erzeugte Energie reicht allerdings nur, um eine Glühbirne für Sekundenbruchteile zu betreiben, aber die sich ausbreitende Stoßwelle vermag trotzdem dem Nierenstein den Garaus zu machen, ohne dass umliegendes Gewebe zerstört wird.

▶ Tumorthherapie mit infrarotem Laserlicht: Eine Glasfaser leitet das Licht direkt in den Tumor, in diesem Falle handelt es sich um Gewebe einer Schweineleber.

Schon kurz nach der Entwicklung des Lasers 1960 stießen die Eigenschaften dieser neuartigen Lichtquelle auch auf das Interesse der Mediziner. Ihnen hatte es besonders die Fähigkeit des Lasers angetan, exakt bemessene Energieportionen gezielt im Körper deponieren zu können. Die breite Palette an unterschiedlichen Lasertypen ermöglicht mittlerweile eine ebenso große Bandbreite an medizinischen Anwendungen.

Wie der Laser dabei wirkt, hängt von seiner Wellenlänge ebenso ab wie von seiner Intensität und Anwendungsdauer. Der große Vorteil des Laserlichts im Vergleich etwa zum Licht einer Zimmerlampe besteht darin, dass sich seine Energie wesentlich besser bündeln lässt.

Während etwa eine Glühbirne Licht verschiedener Wellenlängen ungeordnet in alle Richtungen strahlt, sendet ein Laser Licht in einem eng gebündelten Strahl mit nur einer Wellenlänge aus, der sich auch auf langen Strecken kaum auffächert. Die Lichtwellen befinden sich dabei quasi im Gleichtakt. Mit optischen Linsen lässt sich das Laserlicht und damit auch seine Energie auf immer kleinere Bereiche konzentrieren.

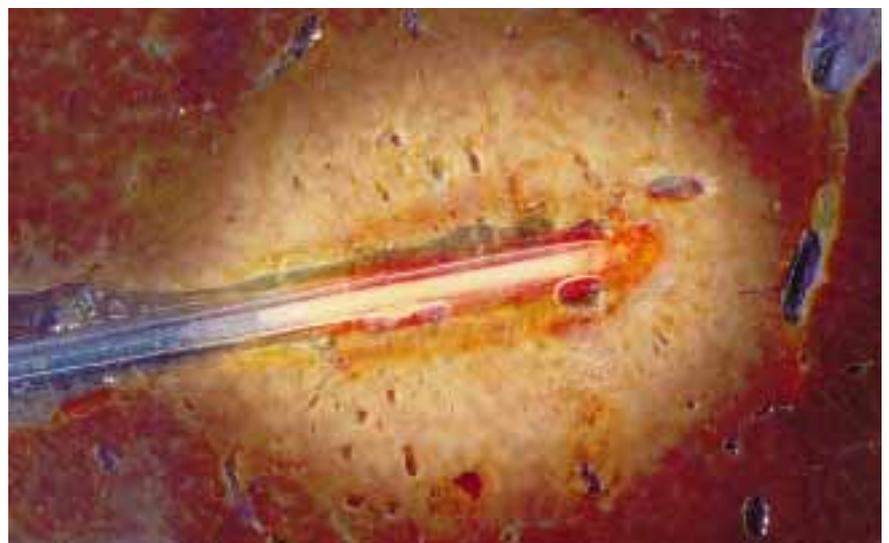
Durch die Betriebsart des Lasers lässt sich die Intensität seines Strahls weiter steigern. Statt einen kontinuierlichen Laserstrahl auszusenden, kann er auch

„gepulst“ betrieben werden, das heißt er gibt sein Licht in abgehackten Portionen ab. Allgemein gilt: Leistung ist Energie pro Zeit. Verkürzt man die Pulsdauer, so steigt bei gleichem Energieaufwand die Strahlungsleistung des Lasers. Nur so lassen sich gigantische Intensitäten für fast unmessbar kurze Zeiten aufrecht erhalten.

Von der Wärme zur Stoßwelle

Laserlicht kann auf sehr unterschiedliche Weise heilsame Wirkungen entfalten. So sagt man längeren Bestrahlungen mit Laserlicht geringer Intensität eine Beschleunigung der Wundheilung nach. Höhere Intensitäten eröffnen den Bereich der photothermischen Wechselwirkung, die mittlerweile einen festen Platz in der Tumorthherapie gefunden hat. Die eingestrahlte Lichtenergie wird im Körper in Wärme umgewandelt, wobei Temperaturen zwischen etwa 50 bis 150 Grad Celsius erreicht werden. Da Tumorzellen temperaturempfindlicher sind als gesunde Zellen, lassen sie sich auf diese Weise gezielt zerstören (Hyperthermie). Je nach Höhe der Temperatur werden entweder die Eiweißstrukturen der Tumorzellen zerstört (denaturiert) oder die Zellen verdampfen vollständig.

Aus der Augenheilkunde ist der Laser ebenfalls nicht mehr wegzudenken. Das „Festkleben“ abgelöster Netzhaut gehörte zu den ersten medizinischen Laseranwen-





▲ Vorbereitung einer Schwerionenbehandlung an der GSI und Blick in die Beschleunigeranlage.

dungen überhaupt. Und mit der mikrometeregenauen Abtragung von Hornhaut durch einen Laser lässt sich starke Fehlsichtigkeit korrigieren. Im Bereich hoher Intensitäten und kurzer Wechselwirkungszeiten nutzt man den Laser für das Trennen von Gewebesträngen und, wie bereits erwähnt, das Zertrümmern von Steinen in Niere oder Galle. Hier spricht man von der photomechanischen Wirkung des Laserlichts.

In einigen Fällen ersetzt der Laser bereits das Skalpell und ermöglicht berührungs- und damit keimfreie Schnitte, bei denen es nur selten zu Blutungen kommt. Für die Chirurgen bedeutet das bessere Sicht auf die zu operierenden Stellen.

Klarer Blick durch trübe Medien

Bei den ersten Einsätzen des Lasers in der medizinischen Praxis hing der Erfolg einer Behandlung hauptsächlich vom Geschick und der Erfahrung des Arztes ab. Man wusste zwar etwa, dass Blut vor allem grünes Licht schluckt, wohingegen die Hornhaut des Auges, da sie zum Großteil aus Wasser besteht, stärker im Infrarotbereich absorbiert. Doch nur wenig war darüber bekannt, wie genau sich Laserlicht im Körpergewebe ausbreitet und dort seine Wirkung entfaltet.

Schwierig ist dies vor allem deshalb, weil biologisches Gewebe zu den so genannten trüben Medien zählt. Darin breitet sich das Licht nicht so einfach und vorhersagbar aus wie in einem System aus geschliffenen Glaslinsen oder einem homogenen

Körper. Stattdessen wird ein Großteil des Lichts in die verschiedensten Richtungen gestreut oder teilweise absorbiert. Deshalb hat sich ein eigener Zweig der Physik, die so genannte Gewebeoptik etabliert, um die optischen Eigenschaften des Körpergewebes quantitativ zu untersuchen. Diese sind im lebenden Organismus einer direkten Messung nicht zugänglich, doch lassen sie sich anhand von Messungen an Gewebeproben verbunden mit Computersimulationen immer präziser erschließen.

Für Medizinphysiker sind die vielen Aspekte bei der Wechselwirkung von Laserlicht mit dem Körpergewebe ein interessantes Forschungsfeld. Ihr Ziel ist es, Computerprogramme zu entwickeln, mit denen sich wirksame Laserbestrahlungen von Tumoren zeitsparend und vor allem erfolgreich planen lassen. Denn sonst besteht die Gefahr, dass auch gesundes Gewebe geschädigt wird. Das gilt vor allem für die Entfernung von Hirntumoren, wo die Gefahr irreparabler Schäden besonders groß ist. Gleichzeitig muss aber auch gewährleistet sein, dass alle Tumorzellen vernichtet werden, denn sonst drohen neue Wucherungen.



◀ Diese vermeintliche Baugrube ist ein nur 0,5 Millimeter tiefes Loch, das mit ultrakurzen Laserpulsen in einen menschlichen Zahn geschnitten wurde. Der Blick durch das Rasterelektronenmikroskop zeigt, dass bei der exakten Aushöhlung keine weiteren mechanischen oder thermischen Schäden auftraten.

Schwere Geschütze

Neben Röntgen- und Laserstrahlen können auch Teilchen Tumorgewebe zerstören. Bei der Gesellschaft für Schwerionenforschung (GSI) in Darmstadt behandelt man Krebspatienten mit Kohlenstoffionen, die in einem etwa 200 Meter langen unterirdischen Ringbeschleuniger normalerweise fast bis auf Lichtgeschwindigkeit beschleunigt werden, um Teilchenphysik zu betreiben. Schwere Ionen (Atome, die Elektronen verloren haben) geben fast ihre gesamte Energie erst am Ende ihrer Bahn durch den Körper ab. Röntgenstrahlen verlieren dagegen schon auf dem Weg zum Tumor viel Energie und schädigen so auch gesundes Gewebe.



Moleküle des Lebens



Seit Jahrtausenden vermag der Mensch durch Züchtung die Merkmale von Lebewesen zu beeinflussen. Wie diese Merkmale aber von Generation zu Generation weitergegeben oder verändert werden, blieb lange Zeit ein Rätsel. Zu Beginn des zwanzigsten Jahrhunderts entdeckten Forscher die Gene. Mit den Mitteln der Physik erschloss sich dann der ganze Reichtum der Lebensvorgänge auf molekularer Ebene. Das eigentliche Fundament der Genetik liegt jedoch in einem unscheinbaren Garten, den ein Mönch mit Erbsenstauden bepflanzte.

Die Struktur des so genannten „bluetongue virus“, der die Blauzungkrankheit bei Säugetieren hervorruft. Er hat eine Größe von etwa 70 Nanometer (Milliardstel Meter). Erst mit den Methoden der Röntgenstrukturanalyse und modernen Strahlenquellen ist es möglich geworden, solch komplexe Strukturen mit atomarer Genauigkeit zu analysieren.

Die Atome der Vererbung

„Ich bin überzeugt, daß es nicht lange dauern wird, da die ganze Welt die Ergebnisse dieser Arbeit anerkennen wird“, sagte Gregor Mendel, der Begründer der Vererbungslehre, ein Jahr vor seinem Tod 1884. Sein Vertrauen in die eigenen Forschungen war ungebrochen. Doch es sollte noch geraume Zeit dauern, bis die Saat seiner Experimente auch in den Universitätslaboren aufging. Mehr als dreißig Jahre verstrichen, bis mehrere Wissenschaftler ab 1900 unabhängig voneinander Mendels Ergebnisse wiederentdeckten.

Eigentlich war Mendel als junger Augustinermönch von seinem Abt zum Physikstudium, das auch Biologie und Chemie umfasste, nach Wien geschickt worden. Leider erfolglos, denn er fiel zweimal durch das Lehrerexamen, da er unter furchtbarer Prüfungsangst litt. Seine Lektionen in der Physik hatte er trotzdem gelernt. Denn als er begann, sich für die Vererbung der Eigenschaften von Organismen auf ihre Nachkommen zu interessieren, verirrte er sich nicht in der großen Vielfalt der Organismen, sondern experimentierte nur mit einer einzigen Pflanze, der Gartenerbse.

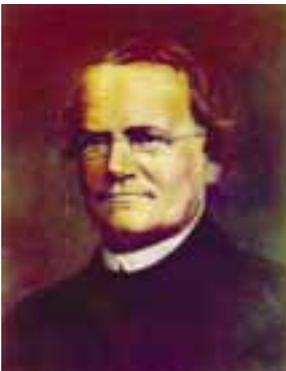
Sorgfältig sortierte er hunderttausende Samen, pflanzte insgesamt fast 40 000 Pflanzen.

Als guter Experimentator veränderte er stets nur eine Eigenschaft der Erbsen und untersuchte die Mittelwerte seiner Versuchsreihen statt Einzelwerte. Seine Folgerung aus den zeitraubenden Kreuzungsexperimenten: Die Erbfaktoren, später Gene genannt, können sich frei aufspalten und trennen.

Gene wären demnach so etwas wie die „Atome“ der Vererbung, die sich neu kombinieren lassen. Doch noch für lange Zeit ging man davon aus, dass Gene sich eher wie zwei Farben in einem Eimer mischen und die vererbten Merkmale kontinuierlich veränderbar seien.

Vielleicht war die wissenschaftliche Welt wirklich erst ab 1900 dafür reif, sich eine Welt vorzustellen, die aus getrennten (diskreten) Teilen aufgebaut war. Im Dezember 1900 stellte Max Planck seine berühmte Quantenhypothese auf, nach der Strahlungsenergie aus kleinsten „Paketen“ besteht und nicht in beliebigen

kleinen Portionen vorkommen kann. Albert Einstein formulierte 1905 nicht nur seine spezielle Relativitätstheorie, sondern konnte anhand der Brownschen Bewegung, der ständigen winzigen Zitterbewegung von Pflanzenpollen in einer Flüssigkeit, einen Nachweis für die Realität der Atome bringen.



Der Augustinermönch Gregor Mendel legte mit seinen systematischen Experimenten zur Vererbung von Merkmalen bei der Erbse die Grundlagen für die moderne Genetik.

Bohrende Fragen

Die moderne Biologie, das heißt die Genetik und Molekularbiologie, ist nicht nur das Werk der Biologen, in ihren Grundzügen geht sie wesentlich auf Anregungen aus der Physik zurück. Eine davon ist die berühmte Rede, welche der Begründer der Atomphysik, der Däne Niels Bohr im Jahre 1932 zur Eröffnung eines Kongresses über Lichttherapie hielt. Die Rede trug den bezeichnenden Titel „Licht und Leben“. Darin sinnierte Bohr über das Verhältnis der physikalischen Gesetze zum Phänomen des Lebens. Einer seiner Zuhörer, der junge Physiker Max Delbrück, war so tief von den Ausführungen Bohrs beeindruckt, dass er sich unverzüglich aufmachte, die Wechselwirkung zwischen Licht und Leben zu erforschen.

Mendels „Labor“: Der Garten im Augustinerkloster von Brunn.



Was zunächst nach einem recht vagen Forschungsansatz klingt, hatte bereits eine experimentelle Grundlage. Der amerikanische Zoologe und Genetiker Hermann Muller konnte 1927 zeigen, dass Röntgenstrahlen bei Taufliiegen Mutationen, das sind Veränderungen der Erbanlagen, hervorrufen können. Doch Delbrück wandte sich nicht einfach von der Quantenmechanik, die er bis dahin betrieben hatte, ab und der Genetik zu, sondern verband vielmehr beide Wissenschaftszweige erstmals miteinander. Sein Vorschlag, das Gen der Biologen als Molekül aufzufassen, lenkte den Blick vieler Physiker auf die Biologie. Nicht zuletzt den von Erwin Schrödinger, einer der Pioniere der Quantenmechanik, der 1944 mit seinem Buch „Was ist Leben?“ die weitere Entwicklung der modernen Biologie entscheidend beeinflusste. Noch heute ist das Werk eine faszinierende Lektüre. Schrödingers Überlegungen kreisten um die Frage, ob Leben auf physikalischen Gesetzen beruht. Der molekularen Natur der Vererbung und Delbrücks Forschungen schenkte er deshalb besondere Aufmerksamkeit. Zudem formulierte Schrödinger erstmals die Vorstellung eines genetischen Codes, den er in den Chromosomenstrukturen vermutete, welche „gleichzeitig dazu beitragen, die Entwicklung, welche sie ahnen lassen, hervorzubringen. Sie sind zugleich Gesetzbuch und ausübende Gewalt, Plan des Architekten und Handwerker des Baumeisters.“ Schrödinger fragte sich, wie die winzigen Gene dafür sorgen können, dass ein geordneter, lebensfähiger Organismus entsteht.

Dass wir die Gene und die Atome, aus denen sie bestehen, nicht sehen können, hatte dabei für Schrödinger durchaus eine tiefere Bedeutung, denn „wenn wir so empfindliche Organe hätten, dass ein einzelnes Atom einen wahrnehmbaren Eindruck auf unsere Sinnesorgane machen könnte – du lieber Himmel, wie sähe das Leben dann aus! Ein so beschaffener Organismus wäre ganz sicher nicht fähig, die Art geordneter Gedanken zu entwickeln, welche schließlich unter vielen Anderen den Begriff des Atomes schafft.“ Schrödinger konnte nicht ahnen, dass ein junger Student sieben Jahre nach der begeisterten Lektüre von „Was ist Leben?“ tatsächlich herausfand, wie der Stoff, aus dem die Gene sind, beschaffen ist. Und ebenso wenig konnte er ahnen, dass es einmal möglich sein könnte, die Moleküle des Lebens sichtbar zu machen.



▲ *Ein menschliches Chromosom wie es sich mit modernen physikalischen Methoden abbilden lässt. Bereits 1903 wies der amerikanische Wissenschaftler Walter Sutton nach, dass Chromosomen die Träger der Gene sind. Heutzutage kann man mit Hilfe des Rasterkraftmikroskops Chromosomen sogar zerschneiden, um gezielt geringe Mengen der Erbsubstanz DNA entnehmen und analysieren zu können.*

▶ *Der österreichische Physiker Erwin Schrödinger (1887 bis 1961) hat mit seinem Buch „Was ist Leben?“ entscheidend dazu beigetragen, dass sich Physiker mit Problemen der Biologie beschäftigten.*



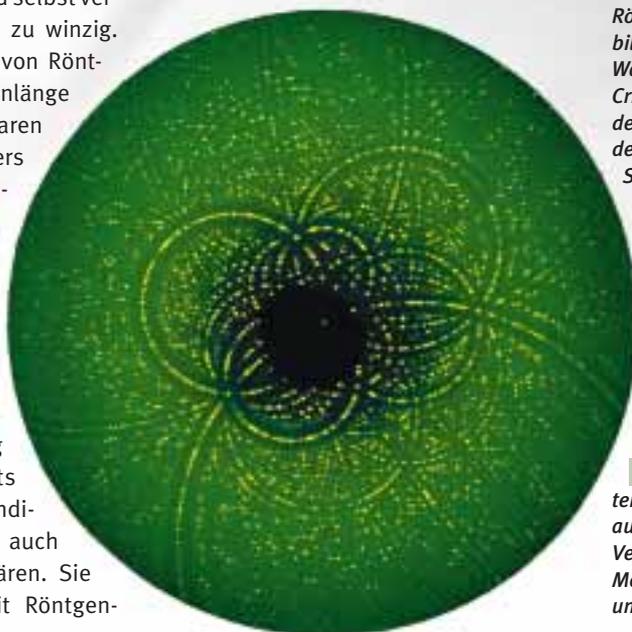
Der Struktur auf der Spur

Spätestens in der Zeit nach dem Zweiten Weltkrieg setzte sich der Gedanke endgültig durch, dass Gene einen materiellen Träger aus Molekülen haben müssten. Doch welche Stoffe kamen dafür in Frage? Im Laufe der Zeit hatten sich zwei mögliche Kandidaten herauskristallisiert. Viele Wissenschaftler favorisierten die Eiweiße (Proteine). Nur sie seien zahlreich und komplex genug, um die vielfältigen Eigenschaften der Lebewesen repräsentieren zu können. Die so genannte Desoxyribonukleinsäure (DNA = desoxyribonucleic acid), welche sich in den Chromosomen fand, kam dafür anscheinend weniger in Frage. Sie schien zu regelmäßig aufgebaut zu sein. Wie sollte sie dann aber die gigantische Menge an Erbinformationen eines Lebewesens speichern und weitergeben können?

Durchdringende Ablenkung

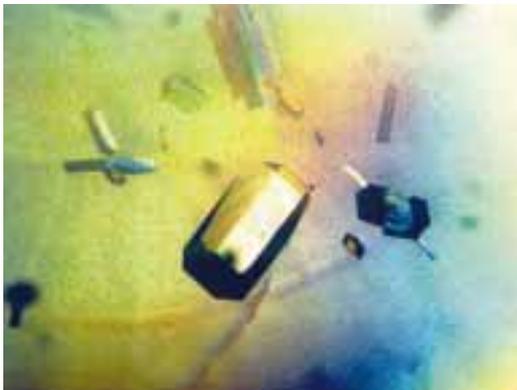
Eine Antwort auf diese Fragen zu finden, erforderte mehr Wissen über die Moleküle des Lebens, über ihre chemischen Eigenschaften ebenso wie über ihren atomaren Aufbau. Um sie direkt in einem Mikroskop zu betrachten, dafür sind selbst vergleichsweise große Proteine zu winzig. Ein Ausweg bot der Einsatz von Röntgenstrahlung, denn ihre Wellenlänge entspricht etwa den atomaren Größenordnungen. Aber anders als bei sichtbarem Licht existieren keine Linsen, mit denen sich eine Art Röntgenmikroskop bauen ließe, das direkte Bilder aus der Welt der Atome liefert. Allerdings entdeckten der deutsche Physiker Max von Laue zusammen mit Paul Knipping und Walther Friedrich bereits 1912 die Grundlage für einen indirekten Weg, der es erlaubt, auch atomare Strukturen aufzuklären. Sie bestrahlten Zinkkristalle mit Röntgen-

strahlen und erhielten auf einem Film erstaunlich regelmäßig aussehende Beugungsmuster aus einer Vielzahl von Punkten. Die Briten William und Lawrence Bragg stellten ein Jahr später einen mathematischen Zusammenhang zwischen diesem Punktmuster und der Anordnung der Atome im Kristall auf. Damit ließ sich von nun an auf den atomaren Aufbau eines Kristalls schließen. Erst Ende der dreißiger Jahre war die so genannte Röntgenstrukturanalyse allerdings soweit verfeinert, dass sich auch Proteine und DNA damit untersuchen ließen. Dabei müssen diese so genannten Biomakromoleküle für eine Analyse mit Röntgenstrahlen zunächst in eine kristalline Form gebracht werden. Ein einzelnes Molekül wäre viel zu klein und würde die Röntgenstrahlen nur unmessbar schwach ablenken. Erst bei einer regelmäßigen Anordnung vieler Moleküle verstärken sich die abgelenkten Röntgenstrahlen auf dem Film zu einem sichtbaren Muster.



▲ Anhand dieses von Rosalind Franklin aufgenommenen Röntgenbeugungsbildes gelang James Watson und Francis Crick der entscheidende Durchbruch bei der Ermittlung der DNA-Struktur.

◀ Ein modernes Beugungsbild eines Proteinkristalls, aufgenommen mit Röntgenlicht aus einem Teilchenbeschleuniger. Heutige Verfahren erschließen Details der komplexen Molekülstrukturen, die für Rosalind Franklin unerreichbar gewesen wären.



▲ Um die Struktur von Proteinen zu untersuchen, müssen diese in kristalliner Form vorliegen. Doch oft gelingt es nicht, sie in ausreichender Reinheit und Größe zu züchten. Die hier im polarisierten Licht fotografierten Proteinkristalle wurden an Bord des amerikanischen Space Shuttles herangezüchtet. Dort lässt sich das Kristallwachstum ungestört vom Einfluss der Schwerkraft studieren.

Die Doppelhelix

Eines der berühmtesten Ereignisse der Wissenschaft im 20. Jahrhundert ist sicherlich die Entdeckung der Doppelhelixstruktur der DNA durch den Biologen James Watson und den Physiker Francis Crick. Beiden gelang damit ein wissenschaftlicher Husarenstreich, denn andere Forscher lagen ihnen dicht auf den Fersen. Die ihrer Entdeckung zugrundeliegenden und bis dahin besten Röntgenbeugungsmuster der DNA stammten von Rosalind Franklin. Sie arbeitete am King's College in London beim Physiker Maurice Wilkins, der sich nach dem Zweiten Weltkrieg der Biologie zugewandt hatte. Crick und Watson erschlossen die Struktur der DNA aus Franklins Aufnahmen und aus all den Informationen, die sie über deren chemische Zusammensetzung und Bindungsverhältnisse

zusammenbringen konnten. Die schraubenförmige DNA besteht demnach aus zwei Strängen, die durch eine Vielzahl von Basenpaaren verbunden sind. Diesen kommt eine besondere Bedeutung zu. Der Biochemiker Erwin Chargaff hatte gezeigt, dass die vier in der DNA vorhandenen Basen in einem festen Verhältnis vorkommen. Mit britischem Understatement verkündeten Crick und Watson am Schluss ihres recht kurzen Artikels in der wissenschaftlichen Fachzeitschrift *Nature*: „Es ist unserer Aufmerksamkeit nicht entgangen, dass die spezifische Paarbildung, die wir hier voraussetzen, unmittelbar auf einen möglichen Kopiermechanismus des genetischen Materials schließen lässt.“ Privat äußerten sich Watson und Crick enthusiastischer und waren davon überzeugt, endlich dem Geheimnis des Lebens auf die Spur gekommen zu sein.

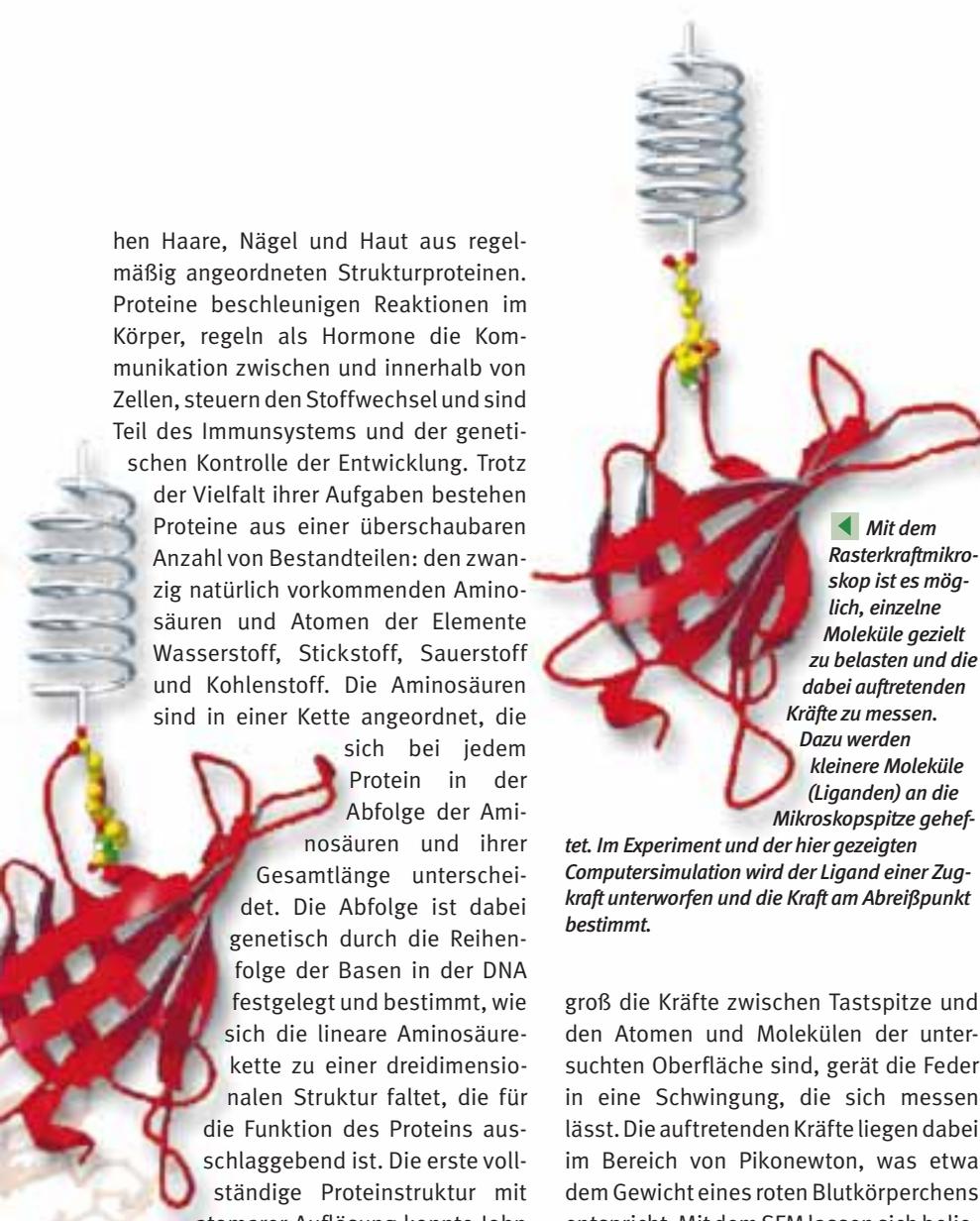
Watson und Crick erhielten 1962 zusammen mit Wilkins den Nobelpreis. Rosalind Franklin war bereits 1958 im Alter von nur 37 Jahren an Krebs gestorben. Das Reglement der Nobelstiftung erlaubte keine posthume Ehrung. Franklin ist gewissermaßen die tragische Gestalt bei der Jahrhundertentdeckung von Crick und Watson.

Die Botschaft der Gene

Mittlerweile ist das menschliche Genom durch das Humane Genome Project fast vollständig entziffert, das heißt, man kennt nun die Abfolge der Basen Adenin (A), Cytosin (C), Guanin (G) und Thymin (T), die gewissermaßen die Buchstaben des Lebens bilden. Damit ist das Geheimnis der Gene jedoch keinesfalls auf eine bloße Folge aus den Buchstaben A, C, G und T reduziert. Es scheint, dass die Verhältnisse viel komplexer sind, als es sich Crick und Watson 1953 ausmalen konnten. Es gilt nun, die Gene, welche für bestimmte Merkmale oder bei Erkrankungen eine Rolle spielen, zu identifizieren und herauszufinden, wie sie die Produktion und die Eigenschaften der Proteine regeln.

Proteine sind die „aktiven“ Moleküle des Lebens. Im Körper sind sie allgegenwärtig. So beste-

▼ Ausschnitt aus dem Molekülmodell eines so genannten Proteasoms, das in lebenden Zellen als eine Art „Müllschlucker“ fungiert, der funktionsunfähige Proteine vernichtet. Diese Darstellung bringt etwas Übersicht in das Gewirr, indem sie nur die wichtigsten Strukturelemente ohne die Seitengruppen zeigt.



hen Haare, Nägel und Haut aus regelmäßig angeordneten Strukturproteinen. Proteine beschleunigen Reaktionen im Körper, regeln als Hormone die Kommunikation zwischen und innerhalb von Zellen, steuern den Stoffwechsel und sind Teil des Immunsystems und der genetischen Kontrolle der Entwicklung. Trotz der Vielfalt ihrer Aufgaben bestehen Proteine aus einer überschaubaren Anzahl von Bestandteilen: den zwanzig natürlich vorkommenden Aminosäuren und Atomen der Elemente Wasserstoff, Stickstoff, Sauerstoff und Kohlenstoff. Die Aminosäuren sind in einer Kette angeordnet, die sich bei jedem Protein in der Abfolge der Aminosäuren und ihrer Gesamtlänge unterscheidet. Die Abfolge ist dabei genetisch durch die Reihenfolge der Basen in der DNA festgelegt und bestimmt, wie sich die lineare Aminosäurekette zu einer dreidimensionalen Struktur faltet, die für die Funktion des Proteins ausschlaggebend ist. Die erste vollständige Proteinstruktur mit atomarer Auflösung konnte John Kendrew 1959 bei Max Perutz in den Cavendish-Laboratorien in Cambridge nach jahrelanger und mühevoller Arbeit ermitteln. Er erschloss den dreidimensionalen Aufbau des Muskelfarbstoffs Myoglobin mit den Mitteln der Röntgenstrukturanalyse. Seitdem haben sich zwar die Verfahren enorm verbessert, doch kann es auch heute noch Jahre dauern, bis die Struktur eines komplexen Proteins vollständig aufgeklärt ist.

Vom Ertasten zum Zerreißen

Ein weiteres Instrument, das sich bei der Erforschung komplexer Molekülstrukturen bewährt hat, haben 1986 die deutschen Physiker Gerd Binnig und Christoph Gerber zusammen mit dem Amerikaner Calvin Quate entwickelt: das so genannte Rasterkraftmikroskop (kurz SFM = Scanning Force Microscope). Sein Funktionsprinzip klingt bestechend einfach: Eine Spitze, die nur aus wenigen Atomen besteht, ist an einer winzigen Blattfeder aufgehängt. Je nachdem, wie

groß die Kräfte zwischen Tastspitze und den Atomen und Molekülen der untersuchten Oberfläche sind, gerät die Feder in eine Schwingung, die sich messen lässt. Die auftretenden Kräfte liegen dabei im Bereich von Pikonewton, was etwa dem Gewicht eines roten Blutkörperchens entspricht. Mit dem SFM lassen sich beliebige Oberflächen mit atomarer Auflösung zeilenweise abtasten. Die dabei entstehenden Bilder wirken oft wie bizarre Landschaften und lassen Rückschlüsse auf die Eigenschaften der untersuchten Materialien zu.

Das Rasterkraftmikroskop eignet sich auch als Werkzeug. So lassen sich mit ihm gezielt winzige Proben der Erbsubstanz aus den Chromosomen herauschneiden und anschließend mit den Verfahren der Polymerasekettenreaktion für eine Analyse vervielfältigen. Wissenschaftler versuchen zudem, neuartige Moleküle Atom für Atom mit dem SFM zusammenzusetzen. Um mehr über die spezifische Faltung von Proteinen zu erfahren, verankert man einzelne Proteinmoleküle auf einer Oberfläche und kehrt den Faltungsprozess gewissermaßen um, indem man das Protein langsam mit der Tastspitze des SFM auseinanderzieht. Auf diese Weise lässt sich die Stärke der dabei gedehnten oder zerreißen innermolekularen Bindungen messen.

◀ **Mit dem Rasterkraftmikroskop ist es möglich, einzelne Moleküle gezielt zu belasten und die dabei auftretenden Kräfte zu messen. Dazu werden kleinere Moleküle (Liganden) an die Mikroskopspitze geheftet.**

Im Experiment und der hier gezeigten Computersimulation wird der Ligand einer Zugkraft unterworfen und die Kraft am Abreißpunkt bestimmt.

Eine Frage der Zeit

Die Wissenschaftler möchten auch herausfinden, wie die genetischen und molekularen Prozesse in den Lebewesen ablaufen. Denn meist genügt es nicht, nur die Struktur der Proteine zu kennen. Etwa im Falle von genetisch bedingten Krankheiten, bei denen die Funktion eines Proteins an einem ganz bestimmten Punkt gestört ist und für die man maßgeschneiderte Medikamente herstellen möchte. Ebenfalls interessant sind diejenigen Proteine, die bestimmte Reaktionen extrem beschleunigen. Die dabei zugrundeliegenden Mechanismen zu verstehen, könnte helfen, neuartige Katalysatoren für industrielle Prozesse zu entwickeln.

Biophysiker und Molekularbiologen versuchen deshalb auch die Zwischenprodukte der komplexen biologischen Reaktionen zu charakterisieren. Das ist möglich, weil die modernen Methoden der Röntgenstrukturanalyse in immer kürzeren Zeiten zufriedenstellende Daten zu liefern vermögen. Allerdings können sich damit nur Reaktionen verfolgen lassen, die auch im kristallinen Zustand ablaufen.

Da ein Protein kein völlig starres Gebilde ist, gilt es, auch die subtilen Veränderungen innerhalb des Moleküls zu untersuchen. Hierfür existieren spektroskopische Techniken, welche das Phänomen der Kernspinresonanz ausnutzen. Zusammen mit extrem aufwändigen Computersimulationen entsteht so ein dynamisches Bild der Moleküle des Lebens.



A microscopic image of mouse brain neurons, showing a complex network of yellow and red fibers against a dark green background. The neurons are interconnected, forming a dense web. The title 'Physik in der Zelle' is overlaid on the top left of the image.

Physik in der Zelle

Jede einzelne Zelle ist als kleinste Einheit des Lebendigen schon ein ebenso anpassungsfähiges wie hochorganisiertes Wunderwerk im Kleinen, das aus tausenden verschiedenen Proteinen aufgebaut ist. Zellen erzeugen Energie und Bewegung, regeln den Stoffwechsel, wandeln Sinneseindrücke in elektrische Impulse um. Ihr Zusammenspiel steuert unsere Bewegungen ebenso wie unsere geistigen Fähigkeiten. Sie alle sind schon ein erstaunliches Stück Materie.

Nervenzellen der Großhirnrinde einer Maus. Dieses Mikroskopbild ist so aufgenommen worden, dass es die räumliche Anordnung der Nervenzellen wiedergibt. Es vermittelt einen guten Eindruck des komplex verschalteten Netzwerks.

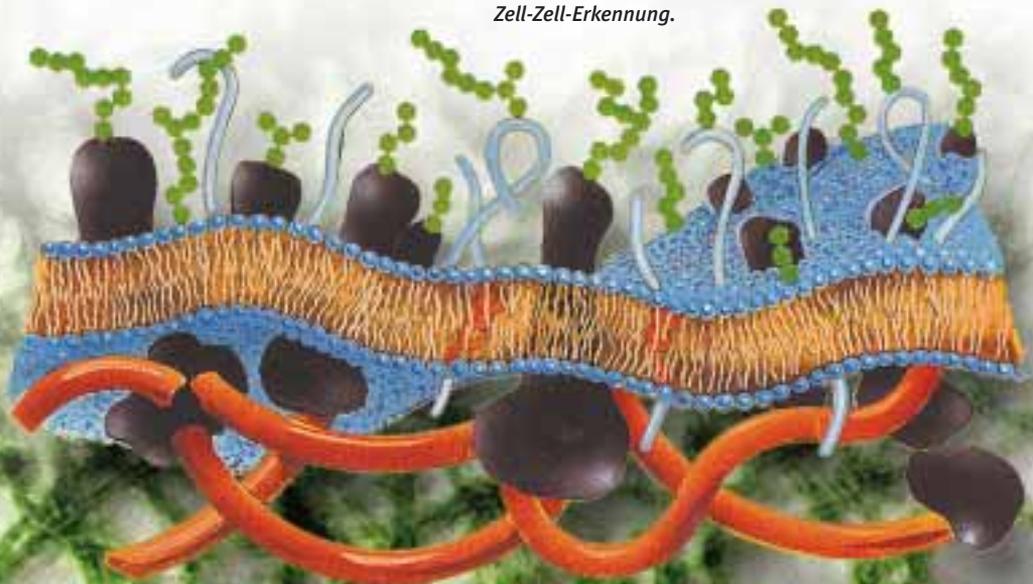
Lebendige Maschinen

Blutzellen zwängen sich während ihres etwa 120tägigen Lebens mehrere hundert Kilometer weit durch enge Blutgefäße, ohne an den Belastungen zu zerbrechen. Schließlich vermögen sie einerseits, ihre Gestalt in Bruchteilen von Sekunden wie eine Flüssigkeit fast beliebig zu verändern, andererseits erweisen sie sich gegenüber Spannungen als geradezu „steinhart“. Die meisten Bestandteile der Zellen gehören nämlich zur Stoffklasse der „weichen Materialien“. Im Reich der unbelebten Materie zählen dazu viele Substanzen, die uns aus dem alltäglichen Leben vertraut sind: Schäume, Plastik, Textilien oder pharmazeutische Produkte. Gemeinsam ist ihnen, dass ihre Eigenschaften gewissermaßen zwischen denen von harten Festkörpern und von Flüssigkeiten liegen. Die Eigenschaften der weichen Materialien in Organismen sind dabei außergewöhnlich, denn sie vermögen in einem komplexen Wechselspiel zwischen zahlreichen Komponenten ungeheuer flexibel auf äußere Einflüsse zu reagieren. Künstlich nachahmen lässt sich das bislang kaum. Doch mehr über die „Werkstoffe der Natur“ herauszufinden könnte durchaus zur Entwicklung neuartiger Materialien führen.

Dass Zellen so flexibel und stabil zugleich sind, verdanken sie dem Cytoske-

lett, einem Netzwerk verschiedener Fasertypen, das sich im Zellinneren befindet. Diese verleihen der Zelle nicht nur die nötigen mechanischen Eigenschaften, sondern sorgen auch für den Stofftransport und die Zellbewegung. Für die Stabilität sind die so genannten Intermediärfilamente zuständig, seilartige Fasern, die ein ungeordnetes Geflecht in der Zelle bilden. Hier versuchen Forscher, die Eigenschaften einzelner Filamente und nicht nur einer großen Anzahl Fasern in einer Lösung zu untersuchen und immer präziser zu vermessen. Dabei hat sich gezeigt, dass die Filamentfasern je nach Belastung ganz unterschiedlich reagieren können. Schließlich macht es einen großen Unterschied, ob nur träge ein Finger krumm gemacht wird oder die plötzliche Stoßenergie bei einem Sturz abgefangen werden muss, damit es nicht zu inneren Verletzungen kommt.

▼ Ein Geflecht von so genannten Aktinfilamenten, die das Gerüst einer Zelle bilden, mit einem Elektronenmikroskop betrachtet. Physiker vermessen die Bewegung dieser Biopolymere mit immer größerer Genauigkeit, um dem Geheimnis ihrer besonderen mechanischen Eigenschaften auf die Spur zu kommen.



▲ *Blutzellen des Menschen: Rote Blutkörperchen (rot) haben die Gestalt kleiner Scheiben und können sich auch durch Blutkapillaren zwängen, deren Durchmesser nur halb so groß ist wie ihr eigener. Weiße Blutkörperchen (gelb), die Zellen der Immunabwehr, sind dank vieler Fortsätze an der Zelloberfläche besonders beweglich, während die Thrombocyten (grün) eine wichtige Rolle beim Wundverschluss spielen.*

▼ *Die elementaren Prozesse in der Zelle finden größtenteils an der Membran statt. In einer Doppelschicht aus Lipidmolekülen (braun mit blauen Köpfen) sind Proteine (schwarz) eingebettet. Die Lipidschicht wird von Proteinfilamenten (rot) stabilisiert. Die dünnen grauen Fäden stellen so genannte Zellrezeptoren dar, und die grünen Ketten Zuckermoleküle. Beide sind wichtig für die Zell-Zell-Erkennung.*



Molekulare Motoren

Bewegung ist ein wesentlicher Teil der Lebensprozesse. Ob es sich um ein Bakterium handelt, das sich mit seinen filigranen Geißeln durch das Wasser geradezu hindurchschraubt, einen Vogel im Flug

oder eine Sportlerin, die sich anschiekt, einen neuen Weltrekord im Hürdenlauf aufzustellen: Stets stellt sich die faszinierende Frage, wie Energie in gerichtete Bewegung umgewandelt wird. Auf der Suche nach einer Antwort stoßen Wissenschaftler in immer kleinere Bereiche vor. So lassen sich mit Hilfe der Röntgenstrukturanalyse Muskelfasern bei der Bewegung beobachten und die Struktur der beteiligten Proteine aufklären.

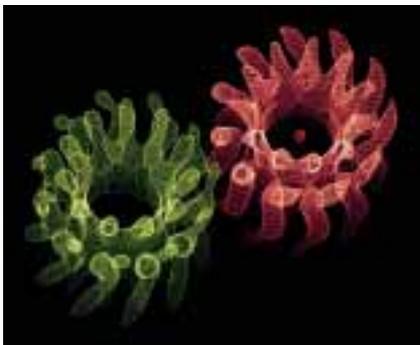
Mit so genannten optischen Pinzetten studiert man sogar die Bewegung einzelner Proteinmoleküle und misst die auftretenden Kräfte. Dabei hat sich gezeigt, dass die Natur bereits vor Milliarden Jahren Motoren hervorgebracht hat. Mit denen lassen sich zwar keine Autos antreiben, doch spielen sie die entscheidende Rolle bei allen Bewegungen eines Autofahrers.

einzufangen und künstliche Befruchtungen durchzuführen. Mit einem intensiven, gepulsten Laserstrahl lassen sich auch extrem präzise Schnitte an Zellen vornehmen – und das berührungsfrei und ohne dass die Gefahr einer Verunreinigung besteht.

Grüne Kraftwerke

Die Photosynthese, das heißt die Umwandlung von Sonnenlicht in chemische Energie, ist die Grundlage für das Leben auf der Erde. Die winzigen Chloroplasten, die Zellorganellen in Pflanzen und bestimmten Bakterien, die das Licht absorbieren, erbringen weltweit eine unübertroffene Produktionsleistung. Durch die Photosynthese entstehen jährlich schätzungsweise 160 Milliarden Tonnen Kohlenhydrate. Kein anderer chemischer Prozess auf der Erde kommt der Photosynthese gleich.

Seit dem Ende des 18. Jahrhunderts rätselten Forscher, wie Pflanzen die Qualität der Luft verbessern und wie sie die „schwer fassbare Energie“ des Son-

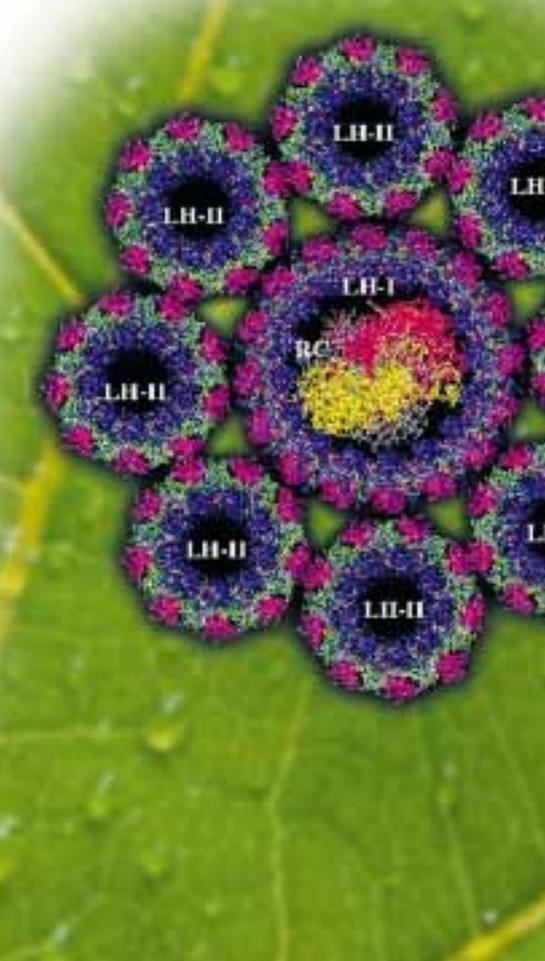


▲ *Dreidimensionales Strukturmodell des kleinsten biologischen Rotors. Er befindet sich in einem Bakterium und liefert durch seine Drehung die Energie zur Bildung des Moleküls ATP, das eine besondere Rolle beim Energiestoffwechsel innerhalb von Zellen spielt, indem es chemische Energie speichert.*

Pinzetten und Scheren aus Licht

Dass Licht in der Lage ist, Objekte zu bewegen oder sogar festzuhalten, erscheint zunächst phantastisch. Gleichwohl hat Licht aber einen Impuls, den es auf Materie übertragen kann. Das spielt im Alltag keine Rolle – so übt selbst starke Sonnenstrahlung keinen merklichen Druck auf unsere Haut aus – doch ist dieser etwa für Zellen oder Bakterien durchaus spürbar.

Ein kontinuierlicher gebündelter Laserstrahl lässt sich daher als eine Art optische Pinzette einsetzen, mit der sich solch winzige Objekte festhalten und bewegen lassen. Das Funktionsprinzip beruht kurz gesagt darauf, dass Laserlicht durch transparente Objekte so gebrochen wird, dass der resultierende Strahlungsdruck diese eher zum Brennpunkt hinzieht als wegstößt. Dies lässt sich sogar ausnutzen, um extrem quirlige Zellen wie einzelne Spermien



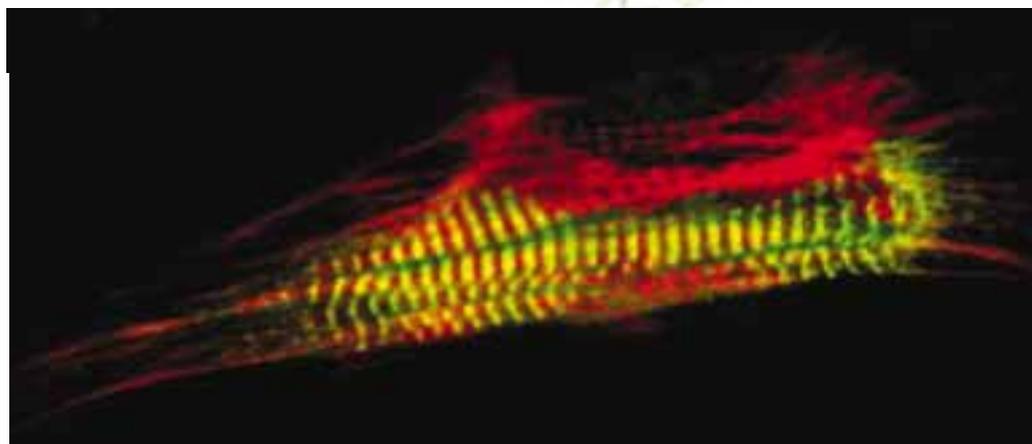
nenlichts in feste Form umwandeln. Ludwig Boltzmann, der Physiker und Begründer der Thermodynamik, schrieb 1886: „Diesen Übergang (das heißt die Wärmeübertragung von der Sonne zur Erde) möglichst auszunutzen, breiten die Pflanzen die unermessliche Fläche ihrer Blätter aus und zwingen die Sonnenenergie in noch unerforschter Weise ... chemische Synthesen auszuführen, von denen man in unseren Laboratorien noch keine Ahnung hat.“

Das sollte noch für viele Jahrzehnte so bleiben. Die chemische Reaktionsgleichung der Photosynthese fand sich in den 1930er Jahren, doch in ihren Details ließ sie sich erst zwanzig Jahre später experimentell bestätigen. In Worten lautet sie: Die Lichtenergie aus der Sonne wandelt Kohlendioxid und Wasser in Zucker und Sauerstoff um. Zwar sieht dies auf den ersten Blick sehr einfach aus, doch die Biologen stießen auf immer komplexere Zusammenhänge. Sie identifizierten und präparierten zunächst die größeren Funktionseinheiten des gesamten Photosynthese-Reaktionszentrums. Erst Physik und Chemie tasteten sich nach und nach bis in den molekularen Bereich vor, in dem sich die ersten Reaktionsschritte der Photosynthese abspielen. Näherungsweise darf man sich diese primären Reaktionen in den Chloroplasten wie bei einer Solarzelle

vorstellen. In einer üblichen Halbleitersolarzelle setzt das Sonnenlicht Elektronen frei, die als elektrischer Strom fließen, mit dem sich etwa ein Computer antreiben lässt. In Pflanzen spaltet das Licht dagegen Wasser in Sauerstoff, Protonen (das heißt Wasserstoffkerne) und Elektronen. Doch dabei fließt kein elektrischer Strom. Die nächsten Schritte müssen fast unmessbar schnell dafür sorgen, dass die Ladungsträger nicht verloren gehen, denn ein Elektron hat in der wässrigen Umgebung einer Zelle nur eine Lebensdauer von wenigen Nanosekunden (Milliardstel Sekunde). Die einzelnen Schritte beim Elektronentransfer benötigen denn auch nur Pikosekunden, ein Zeitraum, der so kurz ist, dass selbst Licht gerade einmal einen Weg zurücklegt, welcher der Dicke eines Haares entspricht. Solche ultraschnellen Prozesse lassen sich nicht mehr mit elektronischen Messmethoden untersuchen. Dies gelingt jedoch mit extrem kurzen Laserpulsen, die zunächst den zu untersuchenden Prozess anregen. Indem man anschließend weitere Pulse mit verschiedenen Verzö-

eine besondere Herausforderung, denn je größer die beteiligten Moleküle sind, um so stärker steigt der rechnerische Aufwand, wenn man versucht, ihr Verhalten quantenmechanisch zu beschreiben. Außerdem sind quantenmechanische Prozesse normalerweise enorm empfindlich gegen äußere Einflüsse etwa in Form der zufälligen Wärmebewegung der Umgebung. Deshalb ist es eine noch unbeantwortete Frage, wie die fundamentalen Vorgänge der Photosynthese anscheinend ungestört trotz der relativ hohen Temperatur in Lebewesen funktionieren. Menschliche Entwicklungsingenieure können nur vor Neid erblassen, wenn sie auf die cleveren Erfindungen der Natur schauen. Kein Wunder bei etwa 3 Milliarden Jahren Entwicklungsvorsprung!

◀ *Nicht nur Pflanzen, sondern auch bestimmte Bakterien betreiben Photosynthese, wenn auch mit einem etwas einfacheren Lichtsammelapparat. Hier sieht man das Photosynthese-Zentrum (RC) des Purpur-Bakteriums, umgeben von den Lichtsammelkomplexen (LH I und II). Fast vier Jahre benötigten die deutschen Forscher Johann Deisenhofer, Robert Huber und Hartmut Michel, um die vertrackte Struktur des Reaktionszentrums mit der Röntgenstrukturanalyse in allen atomaren Details aufzuklären. Erst damit lassen sich die weiteren Details der Photosynthese erschließen. Dabei könnten sich auch neue Wege eröffnen, um leistungsfähigere technische Solarzellen zu entwickeln.*



gerungszeiten durch die Probe hindurchstrahlt, lassen sich die Änderungen auch auf den lange als unmessbar geltenden Zeitskalen verfolgen.

Quantenphysik bei Zimmertemperatur

Die Umwandlung der Sonnenphotonen in freie Ladungsträger, die so genannte Quantenausbeute, liegt bei der Photosynthese fast bei hundert Prozent und erfolgt damit extrem effizient. Die komplizierte Abfolge der einzelnen Schritte von der Ladungstrennung bis zur Erzeugung des Energieträgers Adenosintriphosphat (ATP) sind dabei quantenmechanischer Natur. Für die theoretischen Physiker ist das

▶ *Die leuchtend grüne Färbung in einer Herzmuskelzelle markiert Bereiche des Riesenproteins Titin. Dieses sorgt dafür, dass andere Eiweiße an den richtigen Stellen im Muskel positioniert werden. Indem man an ein einzelnes Titin-Molekül eine Kraft anlegt, lässt sich dieses Stück für Stück entfalten und so Aufschluss über die Molekülbindungen gewinnen.*

Sinne und Signale

„Wenn einem etwas wie ein Blitz in die Glieder fährt“, diese Redewendung beinhaltet durchaus etwas Wahres. Zwar holen wir uns keinen Schlag wie an einem schlecht isolierten Elektrogerät, wenn wir etwa überrascht jemandem ausweichen, aber die Impulse, die unsere Bewegungen steuern, sind nicht nur in Schrecksekunden letztendlich elektrisch.

Die Wissenschaft ist noch längst nicht in der Lage, alle Signale, die sich selbst bei der einfachsten Regung in unserem Körper ausbreiten, bis ins letzte Detail zu verstehen und quantitativ zu beschreiben. Aber die mit den Lebensvorgängen befassten Physiologen machten schon vor geraumer Zeit die Nervenzellen (Neuronen) und -fasern als Ort der fundamentalen Vorgänge aus. Kurz nach 1900 kamen Hypothesen auf, die den Weg zum heutigen Verständnis des Nervensystems entscheidend bestimmt haben. Der deutsche Physiologe Julius Bernstein vermutete 1902, dass die Membran der Zelle eine Ionenlösung umgibt. Eine bestimmte Durchlässigkeit der Membran sollte demnach für die elektrischen Nervenimpulse verantwortlich sein. 1904 schlug der schwedische Pharmakologe Ernst Overton vor, dass die Nervenimpulse einen Austausch von Natriumionen von außerhalb und Kaliumionen von innerhalb der Nervenfasern beinhalten. Aber ihm fehlten die experimentellen Methoden, um dies zu beweisen.

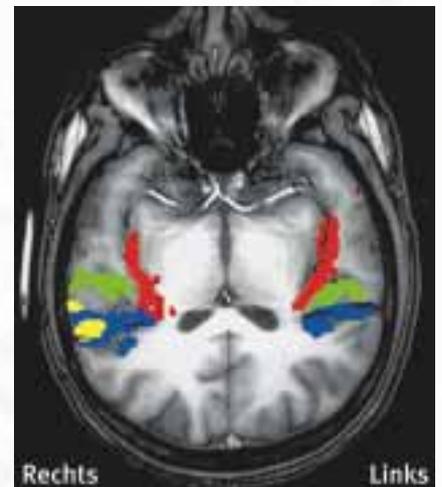
Tintenfischnerven unter Strom

1939 begannen die britischen Physiologen Alan Hodgkin und Andrew Huxley, an so genannten Axonen des Tintenfischs zu experimentieren. Bei den Axonen handelt es sich um die langen Fortsätze der Neuronen, auf denen die Nervenimpulse von Zelle zu Zelle geleitet werden. Beim Tintenfisch fallen diese Axonen besonders groß aus, groß genug, um feine Elektroden einführen zu können.

Hodgkin und Huxley gelang die Pionierleistung, erstmals die elektrischen Vorgänge in Nervenzellen zu messen und Overtons Hypothese zu bestätigen. Dafür erhielten sie 1963 den Nobelpreis für Physiologie oder Medizin. In der Laudatio hieß es überschwänglich: „Die visuellen und akustischen Eindrücke, die wir von dieser festlichen Gelegenheit erhalten, ja sogar unser Denken, unsere Reden, unser Lesen, liegen im zentralen Nervensystem begründet, das heißt in der Sprache der elektrischen Nervenimpulse“.

Wie es das Ohmsche Gesetz der klassischen Elektrizitätslehre gebietet, maßen sie mit Hilfe der Mikroelektroden zunächst Spannung und Strom und berechneten daraus die Leitfähigkeit der Zellmembran. Ein kniffliges Unterfangen, denn die winzigen Ströme mussten millionenfach verstärkt werden, damit sie sich überhaupt nachweisen ließen. Hodgkin und Huxley gelang es, eine mathematische Gleichung zu entwickeln, die den Ionenaustausch der Nervenzelle beschreibt.

▶ *Mit den Ohren einer Schleiereule: Anhand konkreter Beispiele versuchen Neurophysiker, das Zusammenspiel der Nervenzellen und die Informationsverarbeitung im Gehirn zu verstehen. Man geht dabei von der Vorstellung aus, dass Aspekte der Wahrnehmung durch „Karten“ im Hirn repräsentiert werden, das heißt durch eine bestimmte Verschaltung und Wechselwirkung von Nervenzellen in einer begrenzten Hirnregion – etwa bei der Beurteilung der Schleiereule. Der nachtaktive Jäger muss sich in der Dunkelheit völlig auf akustische Signale verlassen und ist in der Lage, aus dem Laufzeitunterschied zwischen den Ohren die Richtung der Beute außer-ordentlich genau zu „errechnen“.*



▶ *Mit der Positronenemissions-Tomographie lässt sich dem Hörzentrum unseres Gehirns beim Stereohören zusehen. Der gelb markierte Bereich zeigt ein Zentrum für die Erkennung bewegter Schallquellen im Raum.*

▼ Die Patch-Clamp-Methode ermöglicht das Messen kleinster Ströme, wie sie im Innern eines Ionenkanals fließen. Dazu wird eine Mikropipette in Kontakt mit der Membran der Zelle (hier eine Nervenzelle) gebracht. Mit einem Unterdruck wird ein Teil der Zellmembran eingesogen und damit auch der auf ihr befindliche Ionenkanal. Die Pipette dient außerdem als Elektrode, mit der sich beobachten lässt, unter welchen Bedingungen der Ionenfluß abbricht oder verstärkt wird.



Neuronen in der Klemme

Lange Zeit war es ungewiss, wie Ionen die Membran durchdringen können. Denn eigentlich trennt die Membran das Innere der Zelle schützend von der Umgebung und ist undurchlässig für elektrische Ladungen. Den deutschen Forschern Erwin Neher und Bert Sakmann gelang es als erste, dem Austausch der Ionen durch die Zellmembran auf die Spur zu kommen, wofür sie 1991 den Nobelpreis für Physiologie oder Medizin erhielten. Ausgangspunkt war dabei die Vorstellung, dass so genannte „Ionenkanäle“ die kleinsten Einheiten der Leitfähigkeit von Zellmembranen darstellen.

Die beiden Forscher entwickelten eine Technik, um die unglaublich winzigen Ströme, die dabei auftreten, zu messen. Eine dünne Glasmikropipette, die nur einen Tausendstel Millimeter Durchmesser hat, wird dabei in Kontakt mit der Zellmembran gebracht. Die Öffnung der Pipette vermag, einen einzelnen Ionenkanal zu umschließen. Erst dann lassen sich die Veränderungen in der Leitfähigkeit der Membran auf molekularer Ebene beobachten. Bei einem Ionenkanal handelt es sich um ein komplexes Proteinmolekül, das wie ein Filter immer nur eine Sorte Ionen passieren lässt, die es anhand ihrer Ladung (positiv oder negativ) und ihrer spezifischen Größe erkennt.

Die Entwicklung der Patch Clamp genannten Methode durch Neher und Sakmann hat nicht nur die Zellbiologie revolutioniert, indem sie die Messung der grundlegenden physikalischen Vorgänge ermöglicht, sondern sie ist auch ein Meilenstein der Physik, denn damit ließ sich erstmals die Funktion eines einzelnen Moleküls beobachten. In der Medizin änderte sich die Sicht auf viele Krankheiten, als man feststellte, dass bei diesen die Fehlfunktion von Ionenkanälen eine besondere Rolle spielt. Beispiele sind die Mukoviszidose, die Epilepsie oder verschiedene Herzgefäßerkrankungen. Erst durch diese Erkenntnis wurde es möglich, maßgeschneiderte Medikamente dafür zu entwickeln.

Da die Nervenleitung elektrischer Natur ist, lässt sie sich modellmäßig wie eine Schaltung aus elektronischen Bauteilen wie Widerständen und Kondensatoren beschreiben. Damit kann man versuchen, das Verhalten größerer Mengen miteinander verbundener Nervenzellen im Computer zu simulieren, um etwa Vorgänge im Gehirn besser zu verstehen. Das „Ich“ lässt sich so sicherlich nicht aufspüren. Aber herauszufinden, wie die Welt in unseren Kopf findet, ist immer noch eine faszinierende Aufgabe.

Der Patch-Clamp-Messplatz von Erwin Neher und Bert Sakmann, Baujahr 1976.



Was ist Leben?

▼ Ein Blick auf die Versuchsanlage von Stanley Miller, mit der er die Bildung organischer Moleküle in einer künstlichen Ursuppe mit Hilfe von Blitzen in Gang setzte.



Es gibt nur wenige Fragen, an denen sich die Wissenschaft so beharrlich die Zähne ausbeißt, wie die Frage „Was ist Leben?“, der sich Erwin Schrödinger in seinem gleichnamigen Buch vom Standpunkt des Physikers aus genähert hat. Von einer befriedigenden und schlüssigen Antwort, so scheint es, sind wir trotz aller Erkenntnisse über Proteine, Gene und Zellen immer noch weit entfernt.

Der Funke des Lebens

Die Entstehung des Lebens aus der unbelebten Materie vor etwa vier Milliarden Jahren ist eine spannende Schnittstelle zwischen Physik, Chemie und Biologie. Vielleicht lässt sich das Leben von seinem Ursprung aus enträtseln? Anfang der fünfziger Jahre zeigte Stanley Miller in einem aufsehenerregenden Experiment, wie aus anorganischen Stoffen Aminosäuren und andere Grundbausteine des Lebendigen entstehen können. Mit Blitzen setzte er in einer Art künstlichen Ursuppe Reaktionen in Gang, wie sie vielleicht auch in den Ur-Ozeanen der Erde stattgefunden haben. Doch ein Cocktail aus organischen Molekülen ist nur die Voraussetzung für das Leben. In einem weiteren Schritt müssen sich diese zu den ersten einzelligen Lebewesen zusammengefunden haben. Der Physikochemiker Manfred Eigen entwickelte eine Theorie, in der das Leben als Resultat

einer Art molekularen Evolution aufgefasst werden kann. In nuklein- und aminosäurehaltigen Lösungen hätten sich demnach Reaktionsmechanismen gebildet, so genannte Hyperzyklen, die wie Lebewesen einer Art evolutionären Auslese unterlagen und Mutationen aufweisen konnten. Die „erfolgreichen“ Hyperzyklen wären dann die Vorläufer der ersten einzelligen Organismen gewesen. Dem zündenden Funken von Miller wäre somit eine Ära der Selbstorganisation gefolgt.

Muster ohne Bauplan

Das Phänomen der Selbstorganisation und Strukturbildung eint belebte und unbelebte Welt. Es ist eine charakteristische Eigenschaft von Systemen, die aus vielen Teilchen oder Individuen bestehen. Langgestreckte Molekülketten von Proteinen falten sich ohne Anleitung von außen zu ihrer funktionsfähigen Form, Zellen organisieren sich zu vielzelligen Organismen und Bakterienkulturen bilden fraktal verzweigte Strukturen aus. Stets spielen dabei physikalische Faktoren eine grundlegende Rolle, etwa in Form von Kräften zwischen den Molekülen. Faszinierend dabei ist, wie universell viele Muster sind; so bilden sich in Bakterienkulturen wie in Kristallen, beim Pflanzenwachstum oder gar in großen Flusssystemen fraktale Muster aus. Dabei sind diese

Muster selbstähnlich in dem Sinne, dass jeder Teil fast dieselbe Struktur zeigt wie das Ganze. Viele der zugrundeliegenden Gesetzmäßigkeiten hat man in den letzten Jahrzehnten entdeckt und verstanden. Dabei folgen vertrackte Muster wie die Fraktale erstaunlich einfachen Bildungsprinzipien, während Prozesse in zunächst simpel erscheinenden Systemen wie etwa Sand, der von Wasser überspült wird und dabei Rippeln ausbildet, noch in vieler Hinsicht unverstanden sind.

Ordnung ohne Umkehr

Nach einem ehernen Prinzip der Physik strebt jedes System unweigerlich einem Zustand höherer Unordnung zu, beschrieben durch eine Größe namens Entropie, die zwar gleich bleiben oder wachsen kann, aber niemals abnimmt. Doch widerspricht das nicht dem Leben? Schließlich ist jeder Organismus eine hochkomplexe, wohlgeordnete Struktur, die sich fortpflanzen und vermehren kann. Dabei können Lebewesen durchaus zumindest lokal die Entropie erniedrigen. Doch das hat seinen Preis. Ständig muss Material und Energie aus der Umgebung zugeführt werden. All die Prozesse, die dabei eine Rolle spielen, von der Photosynthese bis hin zum Zubereiten eines Steaks, sind unumkehrbar und vergrößern die Entropie, schaffen somit Unordnung. „Im Ringen mit der Entropie“, wie es Erwin Schrödinger ausgedrückt hat, entsteht somit Ordnung aus Unordnung. Lebewesen gehören zu den so genannten dissipativen Strukturen. Auch eine Kerzenflamme ist eine solch dissipative Struktur, die nur unter ständiger Zufuhr von brennbarem Material und Sauerstoff aufrecht erhalten werden kann.

Ist da draußen wer?

Ob Leben außerhalb der Erde möglich ist, bleibt eine faszinierende Spekulation. Vermeintliche Funde auf dem Mars stellten sich zwar als falscher Alarm heraus, aber immerhin finden sich neue und immer komplexere organische Moleküle etwa in Kometen oder Sternenswolken. Wenn die physikalischen Gesetze unverändert im ganzen Universum gelten, und davon ist auszugehen, könnte auch woanders im All Leben entstanden sein.



▲ Anhand dieser Wanderwellen schließt sich eine große Anzahl einzelner Zellen des Schleimpilzes *Dictyostelium discoideum* bei Nahrungsmangel zu einem schneckenartigen Wesen zusammen, das in der Lage ist, sich über größere Distanzen zu bewegen.

Erste und letzte Fragen

Die Frage nach Ursprung und Wesen des Lebens ist ebenfalls eine bleibende Herausforderung für die Forscher. Moderne Methoden der Molekularbiologie und Physik ermöglichen dabei immer neue Ansätze. So geht man neuerdings etwa der Frage nach, ob geordnete Kristalloberflächen eine Rolle bei einer selbstorganisierten Entstehung des genetischen Codes gespielt haben könnten. Aber selbst, wenn sich diese Frage beantwortet lassen sollte, werden die Wissenschaftler immer noch Grund genug haben, um über die Wunder des Lebens zu staunen. Oder wie es der Reisegefährte von James Cook, der Schriftsteller und Naturwissenschaftler Georg Forster, einst schrieb: „Ein Blick, eine einzige Berührung durch die Sinnesorgane, und das Bild ist auf immer seiner Phantasie unauslöschlich eingepägt. Was ich hier sage, gilt noch in höherem Grade von Dingen, die man vergebens in Worte zu kleiden versucht. Das Leben ist ein Proteus, der sich tausendfältig verschieden in der Materie offenbart.“

Weiterführende Links

Die Webpage zum Jahr der Lebenswissenschaften:

<http://www.lebenswissen.de/>

Die Physik-Ausstellung des Deutschen Museums in München führt auch online in die Grundlagen der Physik ein:

<http://www.deutsches-museum.de/ausstell/dauer/physik/physik.htm>

Eine sehr umfangreiche Einführung in die moderne Biologie auf Oberstufen-Niveau. Viele Schaubilder und weiterführende Links laden zum Weiterstöbern ein:

<http://www.biokurs.de/skripten/>

Eine Übersicht über biophysikalische Methoden:

<http://www.mpi-dortmund.mpg.de/deutsch/abteilungen/abt1/methoden/methoden.php3>

Informationen zum Studium der Biophysik:

http://www.prakt.physik.tu-muenchen.de/studienbetrieb/_informationsschriften/biophysik/

Biophysikalisches Praktikum (MPI für Biophysik Frankfurt):

<http://atlas.biophys.uni-frankfurt.de/barth/prakt/praktikum.html>

Vorlesungsskript über Grundlagen der Medizinischen Physik:

<http://i115srv.vu-wien.ac.at/physik/ws95/w9500000.htm>

Physikalische Grundlagen bildgebender Verfahren in der Medizin:

<http://bio.physik.uni-wuerzburg.de/public/medphys/>

Mendels berühmte Arbeit „Versuch über Pflanzen-Hybriden“:

<http://www.netspace.org/MendelWeb/CollText/MWGerColl.s5.html>

Eine Bildergalerie wichtiger Biomoleküle auf der Homepage der Arbeitsgruppe Theoretische Biophysik an der Universität von Illinois:

<http://www.ks.uiuc.edu/Research/vmd/gallery/>

Einführung in die Grundlagen der Nerven-Physiologie:

<http://www.lrz-muenchen.de/~nerv/vorlesung/lecture.html>

Patch-Clamp-Methode:

http://www.deutsches-museum-bonn.de/exponate/patch-clamp-messplatz/patch_clamp.html

Weitere Links zum Thema „Ursprung des Lebens“ sowie zur Rasterkraftmikroskopie finden sich auf:

<http://www.nano.geo.uni-muenchen.de>

Bildnachweise

Umschlagbild:

Peter Fromherz, MPI für Biochemie, Martinsried

Seite 1: Wolfgang Baumeister, MPI für Biochemie, Martinsried

Seite 2: Rijksmuseum Amsterdam (Leeuwenhoek); Humboldt-Universität zu Berlin (von Helmholtz); Luschnig, MPI für Entwicklungsbiologie; Tübingen (Fruchtfliege)

Seite 3: AIP Emilio Segrè Visual Archives, Margrethe Bohr Collection (Bohr); Institut für Physiologie, Medizinische Fakultät, Westfälische Wilhelms-Universität Münster (Hintergrund); Bildleiste: Cornelia Bock und Alexander Steinbrecht, MPI für Verhaltensphysiologie, Seewiesen; University of Oxford; Arbeitskreis Andrologie der Deutschen Gesellschaft für Urologie; Deutsches Elektronen-Synchrotron (DESY), Hamburg

Seite 4: Siemens Medizintechnik

Seite 5: Deutsches Röntgen-Museum, Remscheid; Siemens Medizintechnik (Hintergrund)

Seite 6: Siemens Medizintechnik; Philips Medizin Systeme (Hintergrund)

Seite 7: MEVIS, Bremen (oben); MPI für neurologische Forschung, Köln (unten); H.-U. Kauczor und W. Schreiber, Klinik für Radiologie, Universität Mainz (rechts)

Seite 8: Rene Kubé, Medizinisches Laserzentrum Lübeck (oben); Institut für Medizinische Physik; Lasermedizin, Freie Universität Berlin

Seite 9: Gesellschaft für Schwerionenforschung (GSI), Darmstadt; Laser-Zentrum Hannover

Seite 10: DESY

Seite 11: Villanova University Archive (Pennsylvania)

Seite 12: Universität Bayreuth (oben links); Wolfgang Heckl, Ludwig-Maximilians-Universität München (Mitte); Photograph by Francis Simon, AIP Emilio Segrè Visual Archives, Francis Simon Collection (rechts)

Seite 13: Maurice Wilkins, King's College, London; DESY

Seite 14 und 15: Helmut Grubmüller, MPI für biophysikalische Chemie, Göttingen; DESY; Institut für Physiologie, Medizinische Fakultät, Westfälische Wilhelms-Universität Münster (Hintergrund unten); Jonathan B. Marder, Hebrew University, Jerusalem

Seite 16: Tobias Bonhoeffer, MPI für Neurobiologie, Martinsried

Seite 17: Jürgen Berger, MPI für Entwicklungsbiologie, Tübingen (oben); Erwin Frey, TU München (Hintergrund); Erich Sackmann, TU München (unten)

Seite 18: MPI für Biophysik, Frankfurt; Klaus Schulten, Theoretical Biophysics Group, University of Illinois

Seite 19: DESY

Seite 20: Albrecht Sigler, MPI für biophysikalische Chemie (oben links); H. Wagner, RWTH-Aachen (oben rechts); Peter Fromherz, MPI für Biochemie, Martinsried (Hintergrund); Henning Schleich, Leibniz-Institut für Neurobiologie, Magdeburg

Seite 21: MPI für biophysikalische Chemie, Göttingen (oben links); Deutsches Museum, München (unten links)

Seite 22: Eshel Ben Jacob, Universität Tel Aviv, Israel (Hintergrund)

Seite 23: Dictyostelium discoideum genome project; NASA

Seite 24: Volker Staiger, MPI für Neurobiologie, Martinsried