


The background of the entire page is a microscopic image of cells, likely from an onion skin, showing a grid-like pattern of cell walls and dark, circular nuclei. In the upper center, there is a yellow graphic consisting of several straight lines radiating from a point, with a series of concentric arcs above them, resembling a stylized sunburst or a physics diagram. The text "2016 highlights der physik" is overlaid on this graphic.

2016
highlights der physik

Mikro kosmos

In the lower right corner, there are black silhouettes of three people. One person is standing and pointing their right index finger upwards towards the word "kosmos". Two other people are crouching or sitting in front of them, also looking upwards. The background behind them is a dark blue, textured area that contrasts with the lighter blue cell background on the left.

Wissenschaftsmagazin

Physik und Leben



Was ist Leben?

Was unterscheidet eine Pflanze von einem Stein?

Die Antwort: Pflanzen, Tiere und Menschen können wachsen und sie haben Nachkommen.

Das ist ein großes Wunder.

Biologen und Physiker arbeiten heute eng zusammen,
um dieses Wunder des Lebens besser zu verstehen.



Lebewesen bestehen aus sehr vielen kleinen Zellen.

Die Forscher versuchen zu verstehen, wie eine Zelle funktioniert.

Das ist sehr schwierig.

Denn eine Zelle ist so klein, dass wir sie mit unseren Augen nicht sehen können.

Durch moderne Mikroskope können wir heute ins Innere der Zellen hineingucken.

Da sieht man noch kleinere Dinge: Eine winzige Zelle enthält Millionen von Proteinen.

Proteine sind Eiweiße.

Und diese Eiweiße sind für alle Lebensfunktionen wichtig.



Wir wissen alle, dass Bäume wachsen und immer größer werden.

Aber wie machen die das eigentlich? Wie wächst ein Baum?

Die Antwort: Ein Baum holt sich Energie aus dem Sonnenlicht

und verwandelt das Kohlendioxid aus der Luft zu Kohlenstoff.

Das ist sein Baumaterial. So kann er viele Tonnen schwer werden.



Leben benötigt bestimmte Substanzen. Wasser ist besonders wichtig.

Es besteht aus Wasserstoff und Sauerstoff.

Wasser alleine reicht aber noch nicht.

Ein Lebewesen braucht auch Kohlenstoff.

Das heißt: Wasserstoff, Sauerstoff und Kohlenstoff sind die drei zentralen Elemente des Lebens.



Wie ist überhaupt das Leben auf die Erde gekommen?

Die Suche nach dem Ursprung des Lebens ist ein spannendes Gebiet der Biophysik.

Kamen die ersten Bausteine des Lebens aus dem Weltall?

Oder aus heißen vulkanischen Quellen im Meer?



Gibt es vielleicht auch Leben auf weit entfernten Planeten?

Auch das ist eine Frage, mit der sich die Wissenschaft beschäftigt.

In diesem Heft zeigen wir Beispiele für die Zusammenarbeit von Biologen und Physikern.

Wir zeigen, wie die Physik mithelfen kann, schwierige Fragen der Biologie zu lösen.

INHALT

Rekorde
aus dem
Mikrokosmos
Seite 14

Wir sind Sternenstaub 4

**Jonglieren
mit Ungleichgewichten** 6

Geburt auf dem Vulkan 10

Raumschiff Zelle 16

**Im Maschinenraum
des Lebens** 20

Am Quantenpuls 24

IMPRESSUM

HERAUSGEBER

Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF)
Deutsche Physikalische Gesellschaft e. V. (DPG)

AUTOR

Roland Wengenmayr

WISSENSCHAFTLICHE BERATUNG

Prof. Dr. Eberhard Wassermann

REDAKTION

Prof. Dr. Eberhard Bodenschatz, Dr. Axel Carl, Dr. Ralph Dieter,
Ruben Düchting, Dr. Jens Kube, Maike Pollmann, Prof. Dr. Arnulf Quadt

KONZEPT UND GESTALTUNG

iserundschmidt GmbH (ius)
Agentur für Wissenskommunikation
(Verantwortlich: Ruben Düchting, Marleen-C. Schwalm)
ius.pr@dpg-physik.de

September 2016

Die Highlights der Physik im Internet:
www.highlights-physik.de



HINWEIS

Einige Stellen im Heft
verweisen auf
interessante Video-Clips.
Wer sein Smartphone
oder sein Tablet mit
einem QR-Code-Scanner
ausgestattet hat, kommt
leicht auf die verknüpften
Seiten. Für externe
Inhalte sind die Urheber
verantwortlich.



Wir sind Sternenstaub

Wir sind Sternenstaub, und in uns steckt der Urknall. Alle Materie besteht aus chemischen Elementen, die entweder am Anfang des Universums oder im Inneren von Sternen entstanden sind. Die Atome in unserem Körper sind Produkte gigantischer kosmischer Prozesse.



Die Frage nach unserem Alter beantworten wir mit der Zahl der Jahre seit unserer Geburt. Aber wie alt sind die Atome, aus denen wir bestehen? Und woher kommen sie? Machen wir ein Gedankenexperiment zu Beginn unserer Reise in den Mikrokosmos des Lebens. Stellen wir uns vor, wir könnten die chemischen Elemente in unserem Körper voneinander getrennt wiegen. Wir würden feststellen: Umgerechnet auf unser Gewicht bestehen wir aus rund 56 Prozent Sauerstoff, 28 Prozent Kohlenstoff, neun Prozent Wasserstoff, zwei Prozent Stickstoff und 1,5 Prozent Calcium, hinzu kommen verschiedene Spurenelemente.

Alle diese Elemente stammen aus Sternen. Nur der Wasserstoff als Nummer Eins im Periodensystem der Elemente hat eine andere Vergangenheit. Er entstand kurz nach dem Urknall vor 13,8 Milliarden Jah-

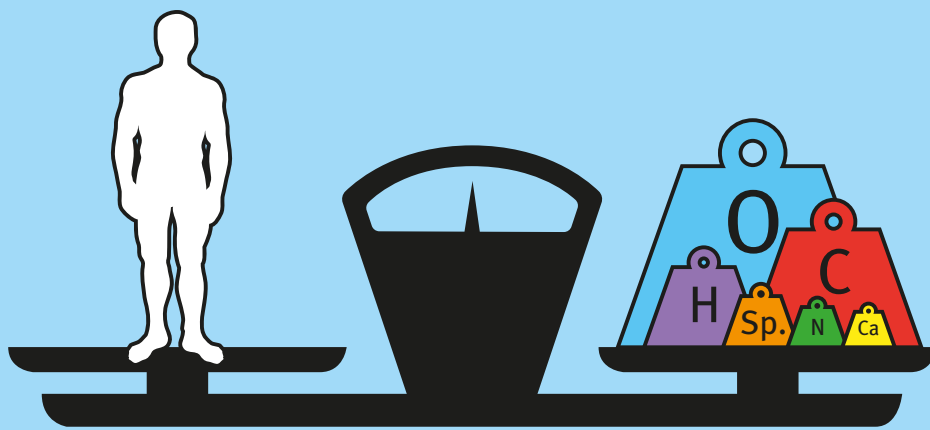
ren. Wir können also zu Recht sagen, dass wir zu neun Prozent fast so alt wie das Universum sind. Die restlichen 91 Prozent der schwereren Elemente sind zwar jünger. Aber auch sie existierten schon eine ganze Weile, als sie vor 4,6 Milliarden Jahren die Erde mitformten.

Die Atome in unseren Körpern sind also Zeugnisse von gigantischen kosmischen Geburten oder Sterbentoden. In den 1930er Jahren entdeckten die beiden deutschen Physiker Hans Bethe und Carl Friedrich von Weizsäcker eine Verschmelzungsreaktion für Atomkerne, die bevorzugt in schwereren Sternen abläuft. Sie erzeugt bedeutende Bausteine des Lebens: Kohlenstoff, Stickstoff und Sauerstoff.

Der für uns lebenswichtige Sauerstoff bringt uns zum Eisen, das im Blut für den

Sauerstofftransport sorgt. Im Kosmos spielt Eisen eine zentrale Rolle, denn es ist das schwerste Element, das Sterne erbrüten können. Das liegt daran, dass nur Eisen und die 25 leichteren Elemente im Periodensystem bei der Kernverschmelzung Energie freisetzen. Diese Energie hält den Verschmelzungssofen des Sterns in Gang. Durch den Druck ihrer Strahlung verhindert diese Energie zudem, dass der Gigant unter seiner Schwerkraft zusammenbricht. Genau das passiert, wenn sein Brennstoffvorrat aufgebraucht ist. Ist ein Stern mindestens achtmal schwerer als unsere Sonne, dann schleudert er sein Äußeres in einer gewaltigen [Supernova](#) davon. Damit verteilt er die von ihm produzierten Elemente ins All. Von dort kommen viele Grundbausteine im Baukasten des Lebens.

In unserem Körper gibt es aber noch schwerere Elemente als Eisen. Zink zum Beispiel hält unser Immunsystem fit. Solche Elemente benötigen Energie, wenn sie durch Kernverschmelzung entstehen. Supernovae erbrüten einige schwere Ele-

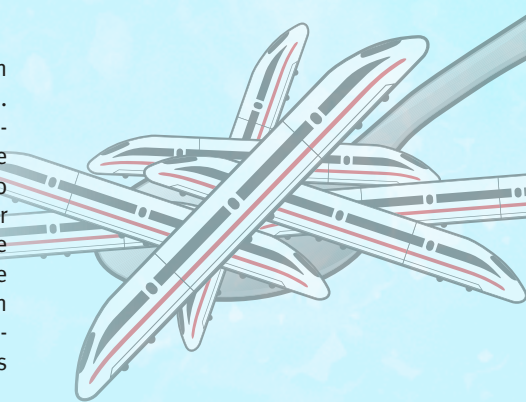


	Sauerstoff:	42 kg
	Kohlenstoff:	21 kg
	Wasserstoff:	7 kg
	Spurenelemente:	2,5 kg
	Stickstoff:	1,5 kg
	Calcium:	1 kg

◀ Das erste vollständige Bild der Erde, aufgenommen 1968 während der „Apollo 8“-Mission. Die dreiköpfige Crew drang tiefer in den Weltraum vor als je ein Mensch vor ihnen. Milliarden Jahre zuvor nahmen Bausteine des Lebens den umgekehrten Weg auf unseren Planeten. (Bild: NASA, CCO)

▲ Ein 75 Kilogramm schwerer Mensch, gedanklich zerlegt in seine chemischen Elemente: Unsere Bestandteile kamen von den Sternen und formten den jungen Planeten Erde mit – Wasserstoff stammt gar aus der Zeit kurz nach dem Urknall. (Grafik: ius)

mente. Sehr schwere Elemente entstehen wahrscheinlich auf Neutronensternen. Neutronensterne sind von der Eigengravitation extrem zusammengequetschte Reste größerer Sterne. Ihre Materie ist so dicht, dass ein Kaffeelöffel davon auf der Erde etwa so viel wiegen würde wie eine Million ICEs. Sehr schwere Elemente könnten zum Beispiel entstehen, wenn zwei solcher Monsterzwerg in Doppelsystemen ineinander stürzen. Das zeigen Modelle der Astrophysik.



▼ Falschfarbenaufnahme des Krebsnebels, den Überresten einer Supernova. Der Neutronenstern mit der rund zweifachen Masse unserer Sonne ist als heller Punkt in der Bildmitte zu sehen – er besitzt einen Durchmesser von etwa 30 Kilometern. (Bild: NASA, CCO)

INFO

Lebensspur im Planetenlicht

Die Astronomie entdeckt immer mehr erdähnliche Planeten in anderen Sternsystemen. Vielleicht wird sich darunter auch ein belebter Planet befinden. Doch wie könnte man die Existenz der Aliens feststellen? Unsere Raumschiffe sind zu langsam für solche Fernreisen. Über Funksignale würden sich nur technisch hochentwickelte Zivilisationen verraten. Leben hinterlässt aber Spuren im Licht, das ein von seinem Zentralstern beleuchteter Planet ins All zurückreflektiert. Dessen Spektrum, also die spezielle Mischung aus Farben – die Physik spricht von Wellenlängen – trägt diese Spuren in sich.

Von der Erde wissen wir, dass Organismen ihren Planeten radikal umbauen können. Das Strahlungsspektrum der Erde verrät freien Sauerstoff in der Atmosphäre als Fingerabdruck des Lebens. Sauerstoff ist aggressiv und würde auf einem unbelebten Planeten durch chemische Reaktionen schnell aus der Atmosphäre verschwinden. Pflanzen sorgen aber für dauernden Nachschub. Auch die aus Sauerstoff entstandene Ozonschicht, die uns vor harter UV-Strahlung schützt, ist so ein Fingerabdruck.

Allerdings wird das schwache Licht von erdähnlichen Planeten von ihrem viel helleren Zentralstern massiv überstrahlt. An Techniken, diese Planeten trotzdem direkt beobachten zu können, wird intensiv geforscht. Das schwache Licht erfordert sehr lange Beobachtungszeiten und extrem empfindliche Teleskope. Besonders geeignet sind Weltraumteleskope, die außerhalb der flimmernden Erdatmosphäre den Himmel absuchen.



Jonglieren mit Ungleichgewichten



Was ist Leben? Lebende Organismen besitzen viele faszinierende Eigenschaften. Aus Sicht der Physik sticht eine besonders hervor: So wie Artisten mit mehreren Bällen jonglieren, müssen lebende Organismen permanent Ungleichgewichte in ihrer molekularen „Maschinerie“ aufrecht erhalten. Dazu benötigen sie Energie in Form von Nahrung.

Biologie erforscht Leben, Physik die unbelebte Materie: Dieses Klischee trifft nicht zu. Die Physik gibt mit ihren Methoden der modernen Biologie wichtige Impulse – und umgekehrt. Vor allem trainiert das Physikstudium die Fähigkeit, komplexe Systeme auf möglichst wenige, grundlegende Eigenschaften zu reduzieren. Deshalb können Biophysikerinnen und -physiker wichtige Beiträge zur Entschlüsselung der molekularen Grundlagen des Lebens leisten.

Moleküle bestehen aus verschiedenen Atomen. Bei Biomolekülen sind es vor allem Kohlenstoff und Wasserstoff, hinzu kommen Sauerstoff, Stickstoff und andere chemische Elemente. Große Biomoleküle können komplex sein, aber noch viel komplexer ist eine einzige lebende Zelle. Eine einfache Hefezelle etwa enthält über hundert Millionen Proteine. Proteine sind Eiweiße, über sie laufen nahezu alle wich-

tigen Lebensfunktionen in Zellen ab. Wirkungskvolle Methoden zur Erforschung des Lebens liefern verschiedene Gebiete der Physik, von der Mechanik, der Wärmelehre bis hin zur Quantenphysik.

Mit der Erfindung des Lichtmikroskops hat ein physikalisches Gerät sogar zur Entdeckung geführt, dass es mikroskopisches Leben gibt. Allerdings können herkömmliche Lichtmikroskope längst nicht stark genug vergrößern, um einzelne Moleküle sichtbar zu machen – selbst wenn es sich um große Biomoleküle aus vielen tausend Atomen handelt. Wenn Atome die Grundbausteine im Baukasten des Lebens sind, dann entsprechen Biomoleküle kompletten Maschinenbausätzen.

Heute kennen wir viele Biomoleküle schon recht genau. Dazu zählt die Desoxyribonukleinsäure (DNS) als Träger der Erb-

information, also des genetischen Bauplans eines Lebewesens. Auch dieses Wissen über ihren Aufbau aus Atomen verdanken wir den Methoden der Physik. Vor allem die Entdeckung der Röntgenstrahlen und der Elektronenstrahlen führte zu Techniken, die Bilder von extrem kleinen Strukturen liefern können. Damit lässt sich die chemische Struktur, die Gestalt, von Biomolekülen entschlüsseln. Aber auch die optische Mikroskopie hat die Physik bis zur Auflösung feinsten Strukturen getrieben. Einige solcher Techniken stellt dieses Heft in Infokästen vor.

Was zeichnet Leben aus? Lebende Organismen können wachsen und sich reproduzieren. Das heißt, dass sie sich selbst „herstellen“ können. Schon das ist gerade aus Sicht der Physik fantastisch, denn eine Maschine aus unbelebter Materie kann das bis heute nicht. Die Reproduktion erfordert eine Reihe von besonderen Fähigkeiten. Eine ist „Selbstorganisation“: Die Moleküle müssen sich von selbst zu hoch geordneten, biologisch funktionsfähigen Strukturen zusammenfinden. Überdies



müssen lebende Organismen ihren Bauplan und das Rezept für alle Lebensprozesse über die DNS an ihre Nachkommen weitergeben können. „Replikation“ nennt sich dieser Kopiervorgang. Dabei schleichen sich kleine Fehler ein, die neue Arten entstehen lassen. Diese Fähigkeit zur Evolution zeichnet Leben ebenfalls aus.

All dies funktioniert nur, weil Leben Energie und molekulare Bausteine aus der Umwelt „ernten“ kann. Pflanzen leben von **Sonnenlicht**, das eine physikalische Energieform ist. Damit und mit Molekülen bauen sie ihre Strukturen auf, besonders wichtig ist Kohlendioxid aus der Luft. Mit dem daraus gewonnenen Kohlenstoff als Baumaterial können Pflanzen Verblüffendes leisten: Die Stämme einiger Baumarten können über **tausend Tonnen** schwer werden. Die aus dem Licht gewonnene Energie speichern Pflanzen in chemischer Form, in kohlenstoffhaltigen Molekülen: Zucker, Kohlenhydrate oder Fette. Von die-

◀ Wie ein Jongleur seine Keulen müssen Organismen physikalische Ungleichgewichte permanent in Gang halten. Die geordneten Strukturen lebender Systeme würden sonst schnell in sich zusammenfallen. (Bild: Vladimir Gjorgiev/Shutterstock.com)

► Nachbildung eines Leeuwenhoek-Mikroskops: Das untersuchte Objekt wurde auf eine scharfe Spitze montiert und mittels Schrauben vor der Linse ausgerichtet und fokussiert. Wer etwas Substanzielles durch die winzige Öffnung erkennen wollte, brauchte allerdings gute Lichtverhältnisse und viel Geduld. (Bild: Jeroen Rouwkema, CC BY-SA 3.0)

ser gespeicherten Sonnenenergie lebt fast die gesamte Nahrungskette der Tiere. Sie beginnt bei den Pflanzenfressern und endet bei Raubtieren. Allerdings gibt es eine Ausnahme: In der Tiefsee existieren von der Sonne unabhängige Ökosysteme, die von der Energie vulkanischer Quellen gespeist werden.

Leben fasziniert Physikerinnen und Physiker schon seit Langem. Erwin Schrödinger, ein Pionier der Quantenmechanik, schrieb in den 1940er Jahren das einflussreiche Buch „Was ist Leben?“. Ihn beschäftigte vor allem die Frage, wie Leben sich selbst in Gang hält. Ein physikalisches System aus unbelebter Materie

▼ Riesenmammutbäume wie dieser aus dem Sequoia-Nationalpark in Kalifornien können 95 Meter hoch wachsen, einen Stammdurchmesser von bis zu 13 Metern erreichen und rund 2000 Tonnen schwer werden. (Bild: werner22brigitte, CCO)



INFO

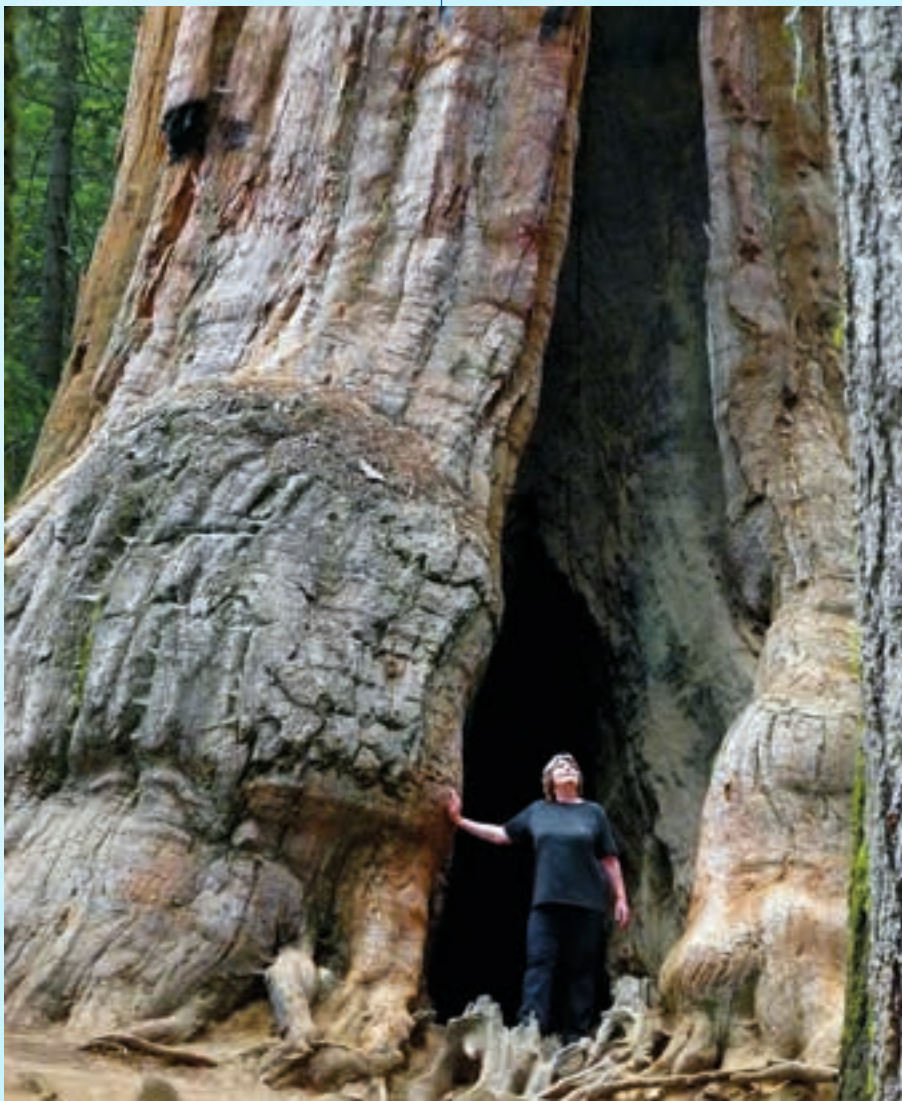
Erleuchtung der Mikrowelt

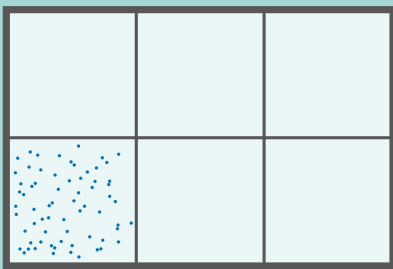


Die ersten Lichtmikroskope entstanden Anfang des 17. Jahrhunderts, 1609 baute Galileo Galilei ein frühes Mikroskop. Wegen der schlechten Linsen waren diese ersten Geräte aber kaum brauchbar. Erst der Niederländer Antoni von Leeuwenhoek (1632-1723) schaffte den Durchbruch. Er vereinfachte das Design radikal auf eine einzige, aber fast perfekt geschliffene Linse. Diese Superlupen konnten immerhin bis zu 300-fach vergrößern. Damit entdeckte Leeuwenhoek in einem Wassertropfen die Welt der Mikroben.

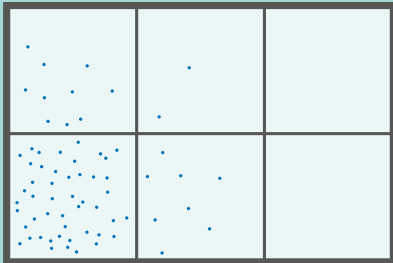


► 300-fache Vergrößerungen erreichte Antoni von Leeuwenhoek bereits mit seinem Mikroskop. Würde man ein Objekt in Gänze um diesen Faktor vergrößern, wäre ein Regentropfen zum Beispiel rund 75 Zentimeter groß. (Grafik: ius)

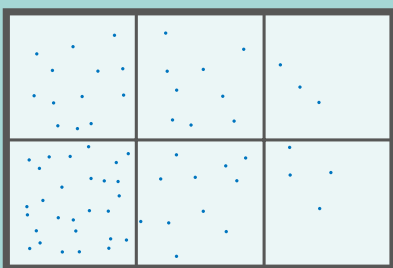




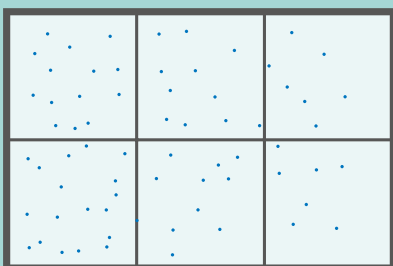
0 Millisekunden



2 Millisekunden



4 Millisekunden



6 Millisekunden

▼ Lupe auf Lupe auf Lupe. Könnte man, wie in diesem Beispiel, Abbildungen von einem zwei Millimeter großen Objekt immer wieder um den Faktor 10 vergrößern, würde man nach vier Lupen vom Abbe-Limit gebremst. Mit STED-Mikroskopie, noch einmal etwa um den Faktor 100 genauer, ginge es noch zwei Lupen weiter. (Grafik: ius)

◀ **Wahrscheinliche Unordnung:** In dieser Simulation aus dem Buch „Entropie“ von H. Dieter Zeh starten 50 Gas-Atome in der linken unteren Ecke; um ein Kästchen zu durchqueren, brauchen sie zwei Millisekunden. Bereits nach sechs Millisekunden ändert sich trotz Grenzübertritten die Verteilung grundsätzlich kaum noch. Rechnet man aus, wie lange es dauern würde, bis sich alle Atome zufällig in einem beliebigen Feld versammeln, erhält man Erstaunliches: Es ist 200 Milliarden Mal die Zeitspanne vom Urknall bis heute.

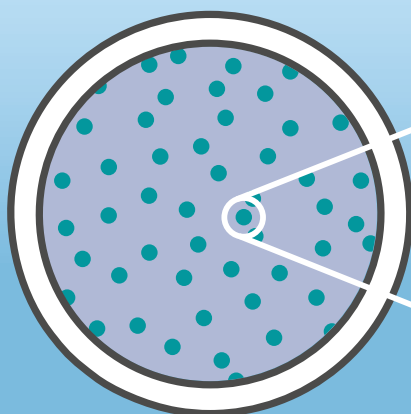
kann das nicht. Worum es geht, verdeutlicht folgendes Gedankenexperiment.

Wir füllen eine Flasche mit warmem Wasser und stellen sie in ein Bad aus kaltem Wasser. Dort kühlt die Flaschenfüllung ab und erwärmt im Gegenzug das Wasserbad. Wegen des Temperaturgefälles zwischen beiden fließt Wärmeenergie aus der Flasche ins Bad – so lange, bis sich die Temperaturen der beiden angeglichen haben. Dieses Streben nach Gleichgewichten ist typisch für Systeme aus unbelebter Materie. Die Prozesse in ihnen starten mit einer einmal gespeicherten Energiemenge und laufen dann solange, bis sich ein Gleichgewicht eingestellt hat. Dort verharren sie, solange sie keine Energie von außen nachgeliefert bekommen.

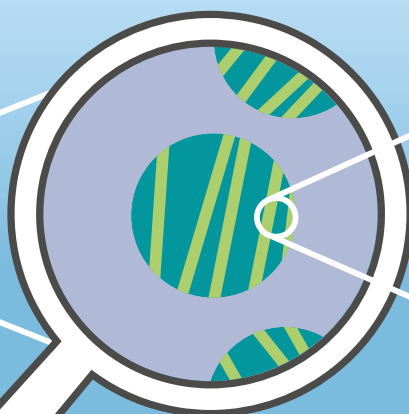
Wie unbelebte Materie drängen die Gesetze der Physik auch lebendige Orga-

nismen zu solchen Gleichgewichten hin. Doch dagegen kämpfen sie an. Um das zu erfahren, tauchen wir nun unseren Unterarm ins kalte Wasserbad. Unser Kreislauf pumpt sofort mehr warmes Blut in den Arm, um eine Unterkühlung des Gewebes zu verhindern. Der Körper führt dem Arm also aus Nahrung gewonnene Energie zu, um ihn gegen niedrigere Temperatur des Bads möglichst lange warm zu halten. Wenn das Bad klein ist, wird unser Körper es sogar schnell aufwärmen.

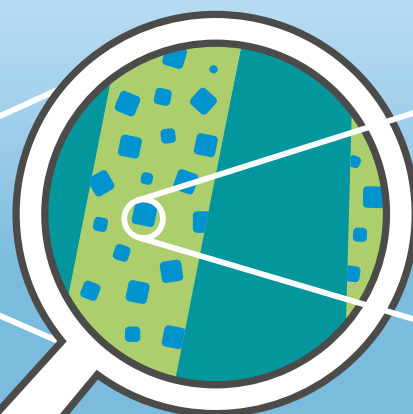
▼ Aus Sicht der Umwelt haben Städte mit ihren geordneten Strukturen etwas Unnatürliches. Wie unsere Umgebung aussehen würde, wenn die Entropie die Oberhand gewinnt, zeigen fiktive Serien wie „Zukunft ohne Menschen“ des TV-Senders „History“ in eindrucksvollen Bildern. Bereits nach wenigen Jahren würde die Natur ihre angestammten Gebiete zurückerobern. (Bild: DVD „Zukunft ohne Menschen“, polyband)



2 Millimeter



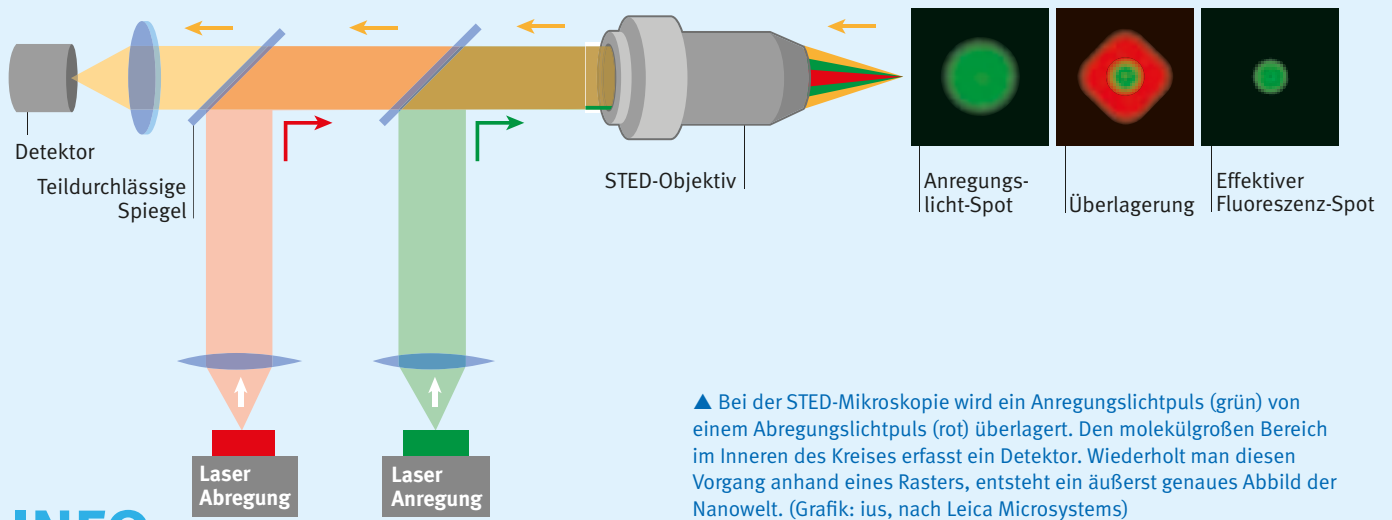
200 Mikrometer



20 Mikrometer



2 Mikrometer



INFO

Schärfer als das Licht erlaubt

Die Welleneigenschaft von Licht begrenzt das Auflösungsvermögen von Lichtmikroskopen. Details, die kleiner als die Wellenlängen des verwendeten Lichts sind, können sie nicht darstellen. Blaues Licht hat die kürzeste Wellenlänge von sichtbarem Licht und erlaubt die höchste Auflösung von etwa 200 Nanometern (Milliardstel Meter). Einzelne Biomoleküle sind aber grob hundert Mal kleiner.

Diese Auflösungsgrenze packte der deutsche Physiker Ernst Abbe 1873 in eine berühmte Formel. Mehr als 120 Jahre später konnte ein anderer deutscher Physiker sie durchbrechen: Stefan Hells Technik basiert darauf, einzelne Moleküle mit Farbstoffen zu markieren, die im passenden Laserlicht leuchten.

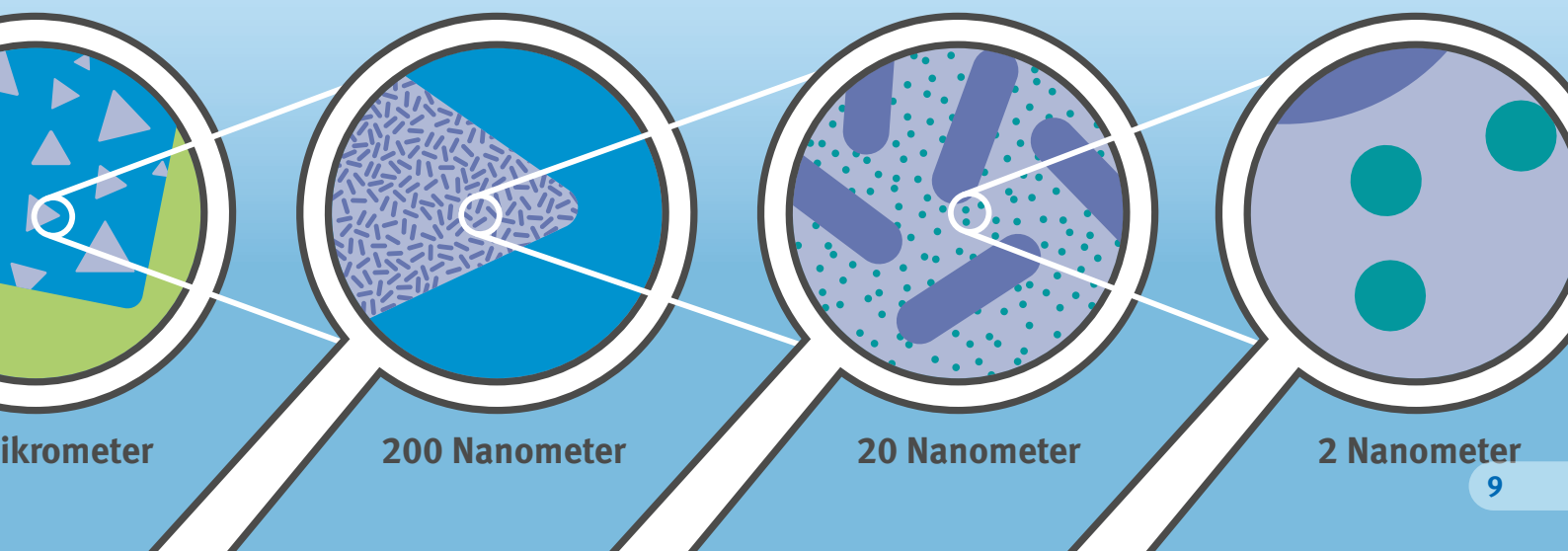
Hells STED-Mikroskop rastert eine Probe mit einem feinen Laserstrahl ab. Wegen des Abbe-Limits kann dieser zunächst auch nur einen 200-Nanometer-Fleck auflösen. Erst ein zweiter, dem ersten überlagerter Laserstrahl bringt den Gewinn. Sein Licht unterdrückt das Aufleuchten der farbmarkierten Moleküle. Zusammen formen beide Strahlen ein Lichtfeld, das die Moleküle im Außenring des Flecks dunkel schaltet, innen aber hell lässt. So wird der Fleck kleiner und damit das Bild schärfer, als es Abbe erlaubte. Dieser Trick heißt Stimulated Emission Depletion (STED). Das STED-Mikroskop kann auch an lebenden Organismen feinste Strukturen sichtbar machen. Für diesen Geniestreich erhielt Stefan Hell 2014 zusammen mit zwei US-Forschern den Nobelpreis für Chemie.

Wie Jongleure mehrere Bälle durch die Luft wirbeln, müssen lebendige Organismen solche physikalischen Ungleichgewichte permanent in Gang halten. Man kann also sagen: Das Gleichgewicht ist der Tod! Warmblüter machen das Ungleichgewicht fühlbar, weil ihre Körpertemperatur höher als die der Umgebung ist. Auch im Mikrokosmos, im molekularen Maschinenraum lebender Zellen, treiben Nichtgleichgewichte Lebensprozesse an. Lebende Systeme halten auf diese Weise geordnete Strukturen gegen die Tendenz zum Zerfall aufrecht.

In der Physik nennt man diese Tendenz „Entropieerhöhung“. Grundsätzlich beschreibt sie die Tatsache, dass Unordnung viel wahrscheinlicher als Ordnung ist. In Kinderzimmern gibt es extrem viele Zustände mit unterschiedlich chaotisch über den Boden verteilten Bausteinen. Aber es gibt weniger Zustände mit zum Beispiel sauber nach Farben in Kästen einsortierten Steinen. Also ist es wesentlich wahrscheinlicher, dass die Unordnung sich durchsetzt, so wie man mit zwei Würfeln nur selten einen Pasch würfelt. Mit der Unordnung wächst die

Entropie im Zimmer. Die Steine einzusortieren kostet dagegen Energie, macht also Mühe.

Genauso muss ein lebender Organismus oft gegen die Macht der Entropie kämpfen, um seine geordneten Strukturen zu erhalten. Dies beginnt im Kleinsten bei den Molekülen und reicht bis zu großen Strukturen wie etwa Muskelfasern, in denen nach dem Sport kleine Risse geheilt werden müssen.



Geburt auf dem Vulkan

Leben basiert auf großen Biomolekülen. Aber wie entstanden sie? Kamen ihre Bausteine aus dem Kosmos? Die Geburtsorte des Lebens könnten heiße vulkanische Quellen im Meer gewesen sein, etwa Schwarze Raucher. Die Biophysik versucht, diese Umweltbedingungen im Labor nachzubauen. Könnten Aliens im Kosmos auch mit alternativen Lebensmolekülen funktionieren?



Die Suche nach dem Ursprung des Lebens ist ein spannendes Gebiet der Biophysik. Leben, wie wir es von der Erde kennen, benötigt bestimmte chemische Zutaten. Wegen seiner [einzigartigen Eigenschaften](#) spielt Wasser eine zentrale Rolle. Bei den auf der Erde herrschenden Temperaturen ist es überwiegend flüssig. Für lebende Organismen ist vor allem wichtig, dass Wasser viele unterschiedliche Stoffe sehr gut in sich lösen kann. Damit kann es zum Beispiel gelöste Salze oder Energieträger wie Zucker in Zellen hinein transportieren. Diese Fähigkeit verdankt Wasser der Tatsache, dass seine Moleküle elektrisch positiv und negativ geladene Stellen besitzen. Das macht Wasser zu einem idealen Lösungsmittel für Salze, Zucker, Säuren und andere Stoffe, die lebende Organismen benötigen. Wasser ist also eine entscheidende Basis für Leben auf der Erde.

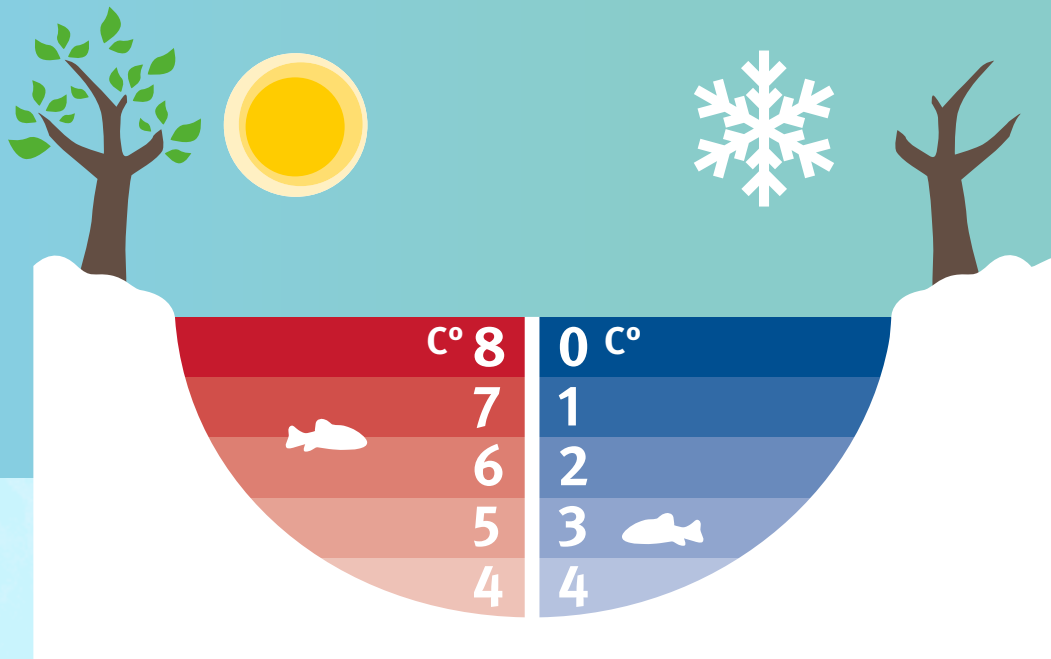
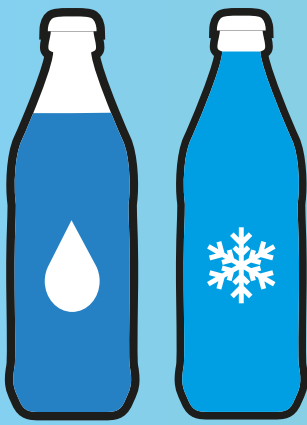
Es besteht aus den Elementen Wasserstoff und Sauerstoff.

Das dritte, für irdisches Leben wichtige Element ist Kohlenstoff. Der Grund liegt in den besonderen chemischen Eigenschaften des Elements mit der Nummer sechs. In seiner Hülle besitzt es vier Elektronen, die liebend gerne chemische Bindungen zu vier anderen Atomen eingehen. Mit deren vier Bindungselektronen kann der Kohlenstoff alle acht verfügbaren Plätze in seiner äußeren Elektronenhülle besetzen. Das spart Energie. Die Quantenphysik macht also Kohlenstoff zu einem besonders anschlussfreudigen Baustein des Lebens. Er kann deshalb lange Molekülketten aufbauen.

Genau darauf basieren alle großen, komplexen Moleküle des Lebens. Dazu gehö-

ren die Nukleinsäuren, RNS und DNS, welche die genetische Information kodieren. Lebensprozesse werden von Proteinen gesteuert, die ebenfalls aus einem Gerüst aus Kohlenstoffatomen bestehen. Das gilt auch für die chemischen Energiespeicher Zucker, Kohlenhydrate oder Fette.

Wir kennen Leben bislang nur von der Erde, und für irdische Organismen sind flüssiges Wasser und Kohlenstoff unverzichtbar. Aber könnte es irgendwo im Kosmos Leben auf einer alternativen chemischen Basis geben? Der nächstbeste Kandidat für eine Rolle, die dem Kohlenstoff vergleichbar ist, wäre Silizium. Es gehört zur gleichen Gruppe im Periodensystem und besitzt ähnliche chemische Eigenschaften. Allerdings ist das mehr als doppelt so schwere Silizium chemisch längst nicht so flexibel wie Kohlenstoff. Deshalb bildet es auf der Erde nur anorganische Mineralien wie Quarz. Aus diesem Grund hätte Leben auf Siliziumbasis wohl nur dort Chancen, wo es nicht genug Kohlenstoff gibt. Lebensformen in fremden Welten könnten zudem statt Wasser an-



▲ ► Aus physikalischer Sicht verhält sich Wasser ungewöhnlich. Anders als andere Stoffe dehnt es sich beim Gefrieren aus und beansprucht rund 10 Prozent mehr Raum. Seine höchste Dichte erreicht es bei vier Grad Celsius, was in stehenden Gewässern dazu führt, dass weniger dichte Schichten nicht zum Grund gelangen. Seen frieren nicht komplett zu, Fische überstehen den Winter. (Grafiken: ius, rechts nach Klaus-Dieter Keller)

◀ Schwarze Raucher am Grund der Tiefsee erinnern an Industrieschornsteine. Das heiße, giftige Wasser, das sie ausstoßen, ist allerdings nicht für alle lebensfeindlich: Bakterien nutzen den Schwefelwasserstoff als Energiequelle und dienen wiederum anderen Lebewesen als Nahrung. Muscheln, Würmer und Fische siedeln sich an den hydrothermalen Quellen an. (Bild: GEOMAR)

dere polare Lösungsmittel nutzen. Zwei Kandidaten wären Ammoniak oder Methan, das auf dem [Saturnmond Titan](#) sogar für Wolken und Regen sorgt.

Auf der Erde hat sich Leben auf Wasserbasis durchgesetzt, weil es chemisch besonders vielseitig und in großer Menge vorhanden ist. Zudem hat die Erde auch genau den richtigen Abstand zur Sonne, damit es überwiegend flüssig bleibt. Die Sonne ist auch ein eher kleiner, langlebiger und gutmütiger Stern, der die Erde stabil mit Lichtenergie versorgt.

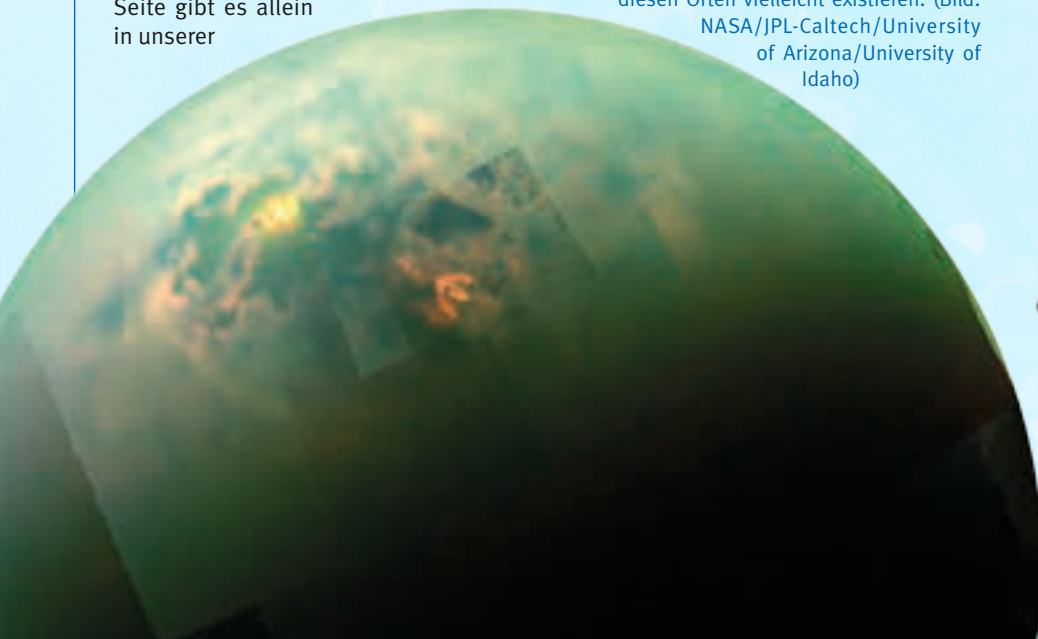
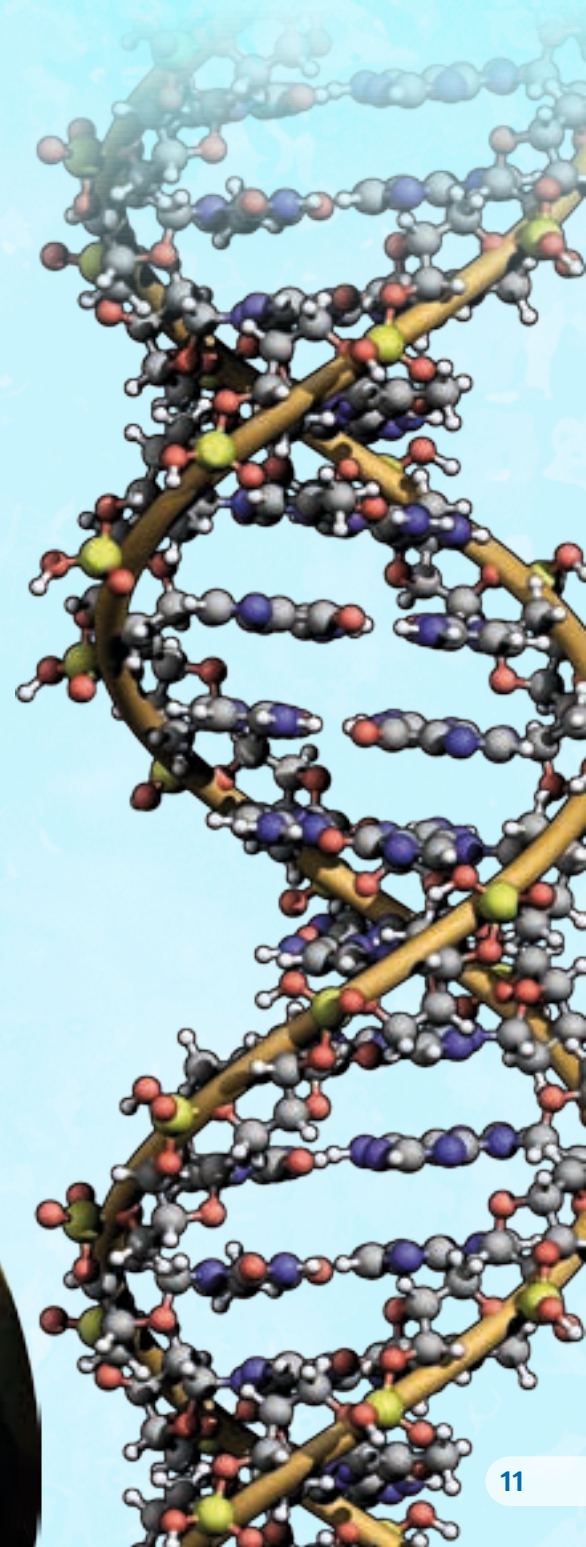
So lebensfreundliche Orte dürften im All äußerst dünn gesät sein. Auf der anderen Seite gibt es allein in unserer

Galaxie, der Milchstraße, schätzungsweise mehrere hundert Milliarden Sterne. Im ganzen Universum existieren wiederum mutmaßlich Hunderte von Milliarden Galaxien. Es wäre also extrem unwahrscheinlich, wenn es nur auf der Erde Leben gäbe. Aber wie kam das Leben hierher?

Wasser existiert auf der Erde seit 4,3 Milliarden Jahren. Wahrscheinlich fing sie es über Himmelskörper ein, die in der wilden Jugendphase des Sonnensystems häufig mit ihr kollidierten. Über Kometen und Meteoriten könnten zudem komplexe organische Moleküle auf die Erde gekommen sein. Die Stardust-Sonde der NASA fand 2009 im Kometen Wild 2 die Aminosäure

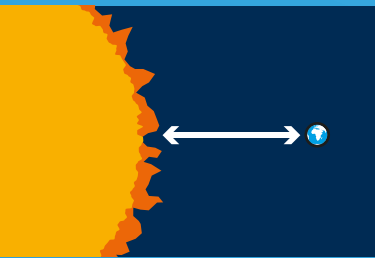
► Komplexe Lebensmoleküle besitzen ein Gerüst aus Kohlenstoff. Das gilt auch für die Trägerin der genetischen Information, die DNS. Die Kohlenstoffatome in ihrer Doppelhelix sind als graue Kugeln dargestellt. (Grafik: Richard Wheeler, CC BY-SA 3.0)

▼ Auf (kolorierten) Aufnahmen der Cassini-Sonde sind an der Oberfläche des Titans Bereiche mit flüssigem Methan zu erkennen. Gäbe es Leben auf Methanbasis, dann könnte es an diesen Orten vielleicht existieren. (Bild: NASA/JPL-Caltech/University of Arizona/University of Idaho)

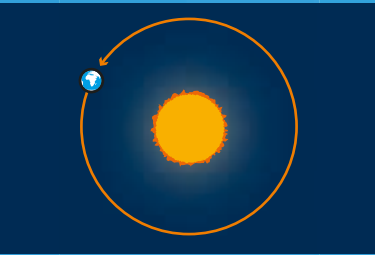




Unser Sonnensystem liegt nicht zu nah am Zentrum der Milchstraße mit seiner tödlichen Röntgen- und Gammastrahlung.



Die Entfernung der Erde zur Sonne ist lebensfreundlich; die Sonnenstrahlung ist weder zu stark noch zu schwach.



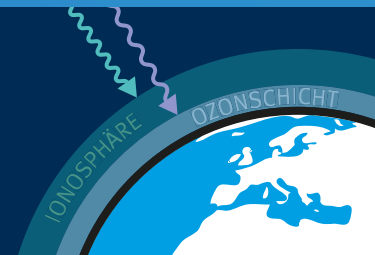
Dies bedingt die richtige Umlaufgeschwindigkeit um die Sonne. Die Erde würde sonst zum Eis- bzw. Wüstenplaneten werden.



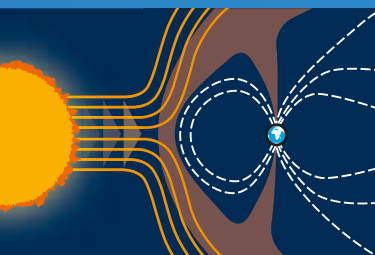
Die Neigung der Erdachse ermöglicht die Jahreszeiten. Andernfalls würden Teile der Erde sehr heiß und andere sehr kalt.



Unser Planet ist nicht zu klein, so kühlt er nicht aus und seine Schwerkraft kann die Atmosphäre aus flüchtigen Gasen halten.



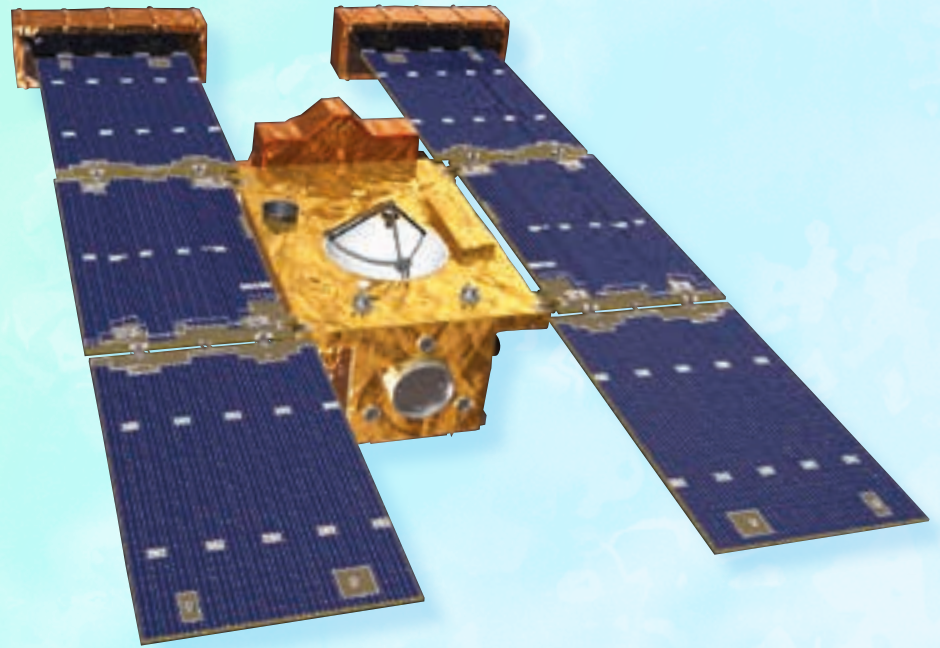
Die Ionosphäre der Erde schützt uns vor kosmischer Strahlung, die Ozonschicht vor UV-Strahlung von der Sonne.



Zudem schützt das Erdmagnetfeld, erzeugt durch Konvektionsbewegungen im Erdkern, vor Sonnenwinden und kosmischer Strahlung.



Die Weltmeere haben seit rund vier Milliarden Jahren die passende Temperatur für komplexe organische Moleküle.



▲ Die Sonde Stardust startete 1999 mit einer Trärrakete von der Erde. 2004 näherte sie sich dem Kometen Wild 2 auf 240 Kilometer und sammelte Material von ihm ein, das sie 2006 mit einer Kapsel auf die Erde absetzte. 2011, nach einem knapp sechs Milliarden Kilometer langen Flug, brach der Funkkontakt zur Sonde ab, sie treibt seitdem auf einer Umlaufbahn um die Sonne. (Bild: LMSS)

◀ Der perfekte Planet: Würde der Erde nur eine dieser Eigenschaften fehlen, hätte sich das Leben auf ihr nicht in der uns bekannten Form entwickelt. Daher wurde lange gezweifelt, ob Lebewesen auf anderen Himmelskörpern eine vergleichbare Entwicklung genommen haben könnten. Inzwischen wurden zumindest zahlreiche erdähnliche Planeten entdeckt. (Grafik: ius)



Glycin, die Rosetta-Mission 2015 ebenfalls auf dem Kometen 67P/Tschurjumow-Gerassimenko. Sie gehört zu den 23 Aminosäure-Bausteinen der Proteine in unserem Körper. Im Kosmos kommen viele komplexe organische Moleküle mit hohem Kohlenstoffanteil vor. Das beweisen die Spektren des Lichts von Sternen und kosmischen Staubwolken. Die Erde könnte also von Lebensmolekülen aus dem Kosmos wie mit einer Saat „befruchtet“ worden sein. Bewiesen ist das allerdings nicht.

Es ist schwierig, genaue Informationen über die Bedingungen auf der frühen Erde zu finden. Noch heute gibt es aber Orte, die zum Ursprung des Lebens zurückführen könnten. Das sind die heißen vulkanischen Quellen in der Tiefsee, zum Beispiel Schwarze Raucher. Die dort lebenden Ökosysteme sind vollkommen un-

abhängig von der Sonne, denn das heiße Wasser versorgt sie mit der nötigen Energie und gelösten Nährstoffen. Mit Mineralien baut das aufsteigende Thermalwasser in Jahrtausenden hohe Röhren oder Kegel aus porösem Gestein auf.

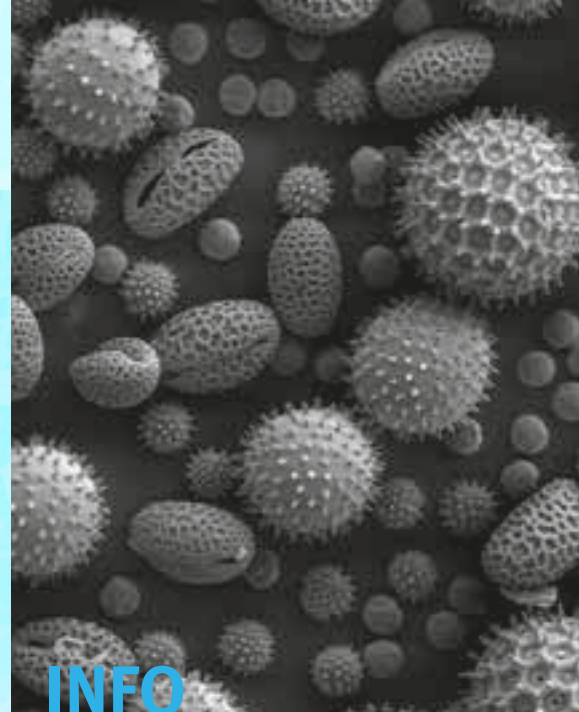
Die Poren in diesem Gestein könnten „Brutreaktoren“ für das erste Leben gewesen sein. Sie erfüllen wichtige Bedingungen. Eine ist ein fast geschlossener Raum. In den Poren gefangene Moleküle treffen permanent aufeinander und interagieren. Genau dies geschieht auch in lebenden Zellen. Zugleich sind Poren zum Meer hin offen und können neue Moleküle als „Nahrung“ aufnehmen. Bei Zellen sorgt die Membran für diesen Austausch mit der Umwelt.

Ganz entscheidend ist aber das Nichtgleichgewicht. Auch diese Bedingung erfüllen die Poren perfekt. Eine Seitenwand wird vom heißen Wasser beheizt, die gegenüberliegende Seite vom Meerwasser gekühlt. Dadurch kreist das Wasser in ihnen, und in der Strömung wirbeln kleinere organische Molekülbruchstücke herum. Größere Moleküle neigen dazu, sich unten auf der kalten Seite des Porenbodens anzusammeln. Aus diesen überlagerten Bewegungen können tatsächlich größere Biomoleküle heranwachsen. Das konnten biophysikalische Experimente mit künstlichen „Poren“ zeigen.

In der Entstehungsgeschichte des Lebens spielte vermutlich die Ribonukleinsäure (RNS) eine besondere Rolle. Experimente haben gezeigt, dass RNS tatsächlich auf nichtbiologische Weise aus einfacheren Molekülen entstehen kann. Das könnte

▼ Brachten Kometen wie Tschurjumow-Gerassimenko das Leben auf die Erde? Bewiesen ist diese Theorie nicht, aber durch Missionen wie Rosetta der ESA, in deren Rahmen im November 2014 erstmals eine Sonde auf einem Kometen niederging, werden immer mehr Einzelheiten über die beeindruckenden Himmelskörper bekannt. (Bild: ESA/Rosetta/NAVCAM, CC BY-SA 2.0)

► Pollen verschiedener Pflanzen unter einem Rasterelektronenmikroskop. Die Objekte sind auf der Aufnahme rund 500-fach vergrößert, die bohnenförmigen Pollen sind zum Beispiel in der Realität etwa 50 Mikrometer lang. (Bild: Dartmouth College, CC0)



INFO

Schärfer mit Elektronen

Die Wellenlänge von sichtbarem Licht ist zu lang, um einzelne Moleküle oder Atome darzustellen. Deshalb muss man zu kürzeren Wellenlängen wechseln. Das ist die Idee hinter dem Elektronenmikroskop. Als Quantenteilchen können Elektronen sich auch wie Wellen verhalten. Im Gegensatz zu Lichtquanten, Photonen, besitzen Elektronen eine Masse. Dank ihrer Masse haben Elektronen schon bei geringer Geschwindigkeit einen viel größeren „Impuls“ als Photonen. In der Quantenwelt gilt: je größer der Impuls, desto kürzer die Wellenlänge. Daher können Elektronenmikroskope sogar einzelne Atome abbilden. Aber auch elektromagnetische Strahlung kann viel kürzere Wellenlängen als sichtbares Licht besitzen, zum Beispiel Röntgenstrahlung.

Es gibt verschiedene Elektronenmikroskope. Transmissions-Elektronenmikroskope durchleuchten die Probe für ein Bild. Raster-Elektronenmikroskope tasten eine Oberfläche mit einem feinen Strahl ab. Zeile für Zeile entsteht so ein Bild mit besonders großer Tiefenschärfe. Allerdings haben Elektronen einen Nachteil: Ihr Bombardement lädt das betrachtete Objekt elektrostatisch auf. Um das zu verhindern, müssen biologische Strukturen mit einer dünnen, elektrisch leitenden Metallschicht überzogen werden. Das verdeckt Feinheiten.

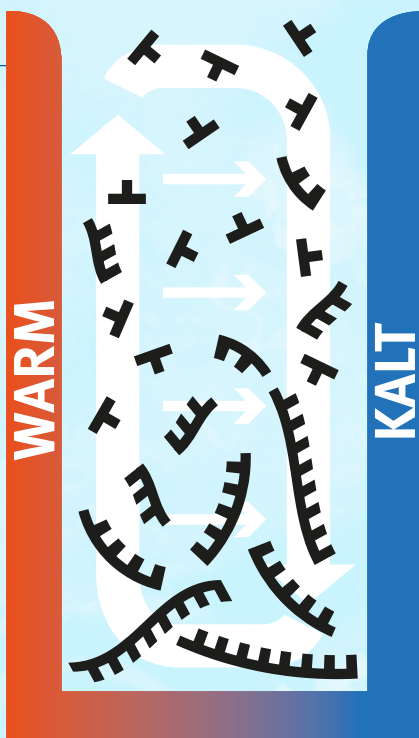
Eine Alternative sind Heliumionen-Mikroskope. Sie verwenden elektrisch positiv geladene Heliumatome (Helumionen) und kommen ohne Metallbedampfung aus. Zusätzliches Bestrahlen mit negativen Elektronen gleicht die Aufladung durch Helumionen aus. Deshalb können sie noch feinere biologische Details abbilden.

auf der Urerde passiert sein. In heutigen Lebensformen übernimmt die RNS mehrere wichtige Funktionen. Vor allem übersetzt sie als Transfer-RNS (tRNS) die genetische Information aus der DNS in

Proteine, die Lebensprozesse in Zellen ausführen. Das deutet darauf hin, dass eine „RNS-Urwelt“ eine zentrale Rolle in der Entstehung des Lebens gespielt haben könnte. Tatsächlich konnten die Experimente mit künstlichen Poren zeigen, dass darin aus kurzen RNS-Stücken längere Ketten entstehen können. Nur lange Molekülketten können komplexere genetische Information speichern. Die „Festplatte“ sozusagen muss groß genug sein.

Große Biomoleküle, die sich selbst reproduzieren können, spielen in der Entstehung des Lebens eine entscheidende Rolle. Natürlich müssen viele andere Prozesse hinzukommen, bis eine richtige Zelle entsteht. Vor allem braucht sie einen funktionierenden Energiestoffwechsel. Wie dies geschah, ist noch nicht verstanden. Aber aus heutiger Sicht sprechen viele Indizien dafür, dass das Leben in den Poren heißer vulkanischer Quellen entstand.

◀ Poren in Schwarzen Rauchern funktionieren wie Bioreaktoren: Wasser zirkuliert im rund 150 Mikrometer breiten Raum zwischen der beheizten und der kalten Seite. Allmählich bauen sich Molekülbausteine zu längeren Molekülketten zusammen, die sich unten ablagern. Dort könnten Lebensprozesse starten. (Grafik: ius, nach: Mast, Möller und Braun)



Rekorde aus dem Mikrokosmos



Haftmeister

Geckos sind Weltmeister im intelligenten Kleben. Der Tokay (Gekko gecko) als größte Art kann sich theoretisch so fest an eine Decke heften, dass ein Mensch sich an ihn hängen könnte. Diesem Zugriff würde sich der Gecko allerdings durch blitzschnelle Flucht entziehen. Geckos beherrschen auch das flinke „Entkleben“ perfekt. Die geniale abschaltbare Klebetechnik der Geckos setzt auf eine extrem schwache Kraft. Benannt ist sie nach dem niederländischen Physiker Johannes Diderik van der Waals. Sie basiert auf der Beweglichkeit der elektrischen Ladungen in Molekülhüllen: Kommen sich zwei Moleküle näher, so verschieben sich ihre Ladungen so, dass beide Moleküle sich gegenseitig anziehen.

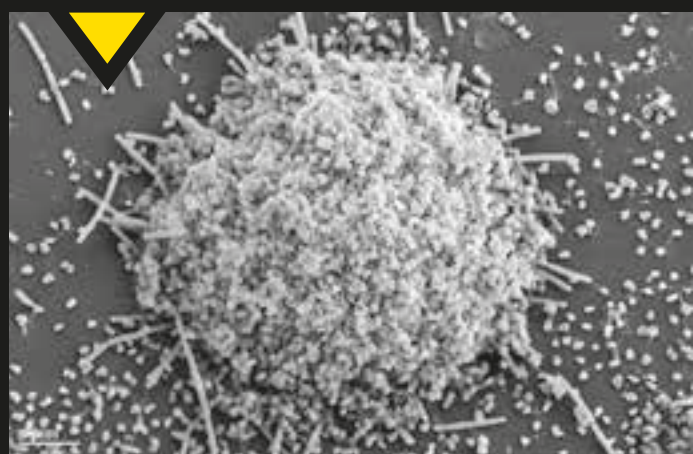
Die Van-der-Waals-Kraft hat den Vorteil, dass sie auf nahezu allen Oberflächen funktioniert. Um diese schwache Kraft zu steigern, besitzen Tokays unter ihren Zehen ungefähr zehntausend Hafthaare pro Quadratmillimeter. Jedes davon ist etwa ein Zehntelmillimeter lang und spaltet sich an seiner Spitze viermal auf. Diese Enden verzweigen sich dann in hundert bis tausend winzige Dreiecke. Zusammen ergeben sie eine riesige Klebefläche, wenn der Gecko seine Zehen an den Untergrund drückt. Das gleicht die Schwäche der Van-der-Waals-Kraft mehr als aus und sorgt in Summe für die hohe Klebekraft. Beim Haftensind die Haare schräg an den Untergrund angelegt. Leichtes Anwinkeln genügt, um sie locker abzulösen.

Seit Jahren wird an künstlichen Geckostrukturen geforscht. Im Film „Mission Impossible – Phantom Protokoll“ klettert Agent Ethan Hunt mit Geckohandschuhen die Glasfassade des Hotels Burj Khalifa in Dubai hinauf. In der Realität allerdings scheitern die künstlichen Strukturen zum Beispiel noch an einem brauchbaren Klebe-Abschaltmechanismus.



Überlebenskünstler

Extrem im Nehmen: Bärtierchen können Bedingungen überstehen, die für andere vielzellige Organismen tödlich wären. Dazu fahren die weniger als einen Millimeter kleinen Tiere ihren Stoffwechsel praktisch auf null herunter. So überleben sie Temperaturen von -272 bis $+150$ °C, sechsfach höhere Drücke als in den tiefsten Meerestiefen herrschen sowie ionisierende (radioaktive) Strahlung in einer für Menschen hundertfach tödlichen Dosis. Sie kommen 30 Jahre ohne Nahrung aus und können auf bis zu 3 Prozent ihres normalen Wassergehalts austrocknen. 2007 überlebten einige Bärtierchen an Bord der unbesetzten FOTON-M3-Raumkapsel das Vakuum des Welt-raums. „Astro-Bär“ wäre also ein möglicher Astronaut für kosmische Fernreisen.





Zäher als Stahl

Spinnenseide kann 1,4-mal zugfester als die festesten Stahlsorten sein. Dabei kann sie sich um 60 Prozent dehnen, während Stahl bei spätestens 5 Prozent Dehnung reißt. Große Spinnenarten können bis zu sieben unterschiedliche Spinnenseiden zu verschiedenen Zwecken produzieren.



Miniflieger

Kleinstes flugfähiges Tier: Die auf Hawaii, Trinidad und in Costa Rica beheimatete Zwergwespe Kikiki huna ist mit nur 0,15 mm Länge das kleinste bisher entdeckte Insekt der Welt, das flugfähig ist.



Das weißeste Weiß

Der südostasiatische Cyphochilus-Käfer sitzt gerne auf weißen Pilzen und will für seine Fressfeinde unerkant bleiben. Deshalb tarnt er sich mit einer extrem weißen Farbe.

Eine besondere Anordnung von Chitinmolekülen auf seinem Panzer reflektiert das Tageslicht in allen seinen Lichtwellenlängen, also Farbanteilen, besonders effizient: Der Wellenlängenmix ergibt reines Weiß.

Es handelt sich also wie bei schillernden Schmetterlingsflügeln um eine „Strukturfarbe“, keinen chemischen Farbstoff. Die Rekorderffizienz erlaubt es dem Käfer, mit einer besonders dünnen „Farbschicht“ auszukommen. Das spart Gewicht und damit beim Fliegen Energie.

Hitzerekordhalter

Das Bakterium Methanopyrus, das auf Schwarzen Rauchern in 2000 m Tiefe im Golf von Mexiko lebt, übersteht 122 °C bei voll aktiven Lebensfunktionen und kann sich sogar noch reproduzieren. Das Bärtierchen (→ S. 14) überlebt so hohe Temperaturen nur im „Trockenschlaf“. Normalerweise verändern sich lebenswichtige Proteine bei so hohen Temperaturen wie gerinnende Eiweiße beim Eierkochen. Solche hitzefesten Bakterien schützen die empfindlichen Proteine durch intelligentes Verpacken in temperaturstabilen „Hitzeschockproteinen“.



Ultraklein

In der Natur sind Ultramikrobakterien oder Nanobakterien die kleinsten Organismen, die unabhängig wachsen und sich reproduzieren können. Sie sind nur 200 bis 300 Nanometer winzig. Zum Vergleich: Komplexe Einzeller wie Amöben sind gut tausend Mal größer.



Raumschiff Zelle

Leben braucht einen Schutzraum: die Zelle. Sie hält alle an Lebensprozessen beteiligten Biomoleküle zusammen, damit diese effizient miteinander wechselwirken. Ihre Membran sorgt für den Austausch von Stoffen mit der Außenwelt. Bei der Zellteilung spielt sie eine wichtige Rolle.

Irgendwann in der Urgeschichte löste sich das erste primitive Leben aus mineralischen Poren und wurde mobil. Dazu benötigte es ein Vehikel: die Zelle. Ein entscheidendes Element der Zelle ist ihre Hülle, die Membran. Sie schließt die Biomoleküle in ihrem Inneren ein, sodass diese oft aufeinandertreffen und alle Lebensprozesse, etwa den Energiestoffwechsel, in Gang halten können. Zudem besitzt die Membran spezielle Proteine, die wie Schleusen oder Ventile einen Austausch von Wasser und lebensnotwendigen Nährstoffen mit der Umwelt erlauben. Das entspricht der Öffnung der Gesteinspore zum Meer hin.

Zellen sind die kleinsten Einheiten des Lebens. Ihre Vielfalt reicht von Bakterien bis zu hochspezialisierten Zellen von Pflanzen oder Tieren. Wegen ihrer Einfachheit eignen sich Bakterien am besten, um

zu erforschen, wie Leben aus unbelebter Materie entstehen kann. Eine „Labormaus“ der Biophysik ist das Darmbakterium *Escherichia Coli* (E.Coli). Doch selbst ein winziges Bakterium von wenigen Mikrometern (Millionstel Meter) Länge ist ungeheuer komplex.

Hinzu kommt, dass die [Evolution](#) keinesfalls immer optimal arbeitet. Sie scheint eher auf verschlungenen Pfaden Lösungen zu finden. Was einmal funktioniert, benutzt die Natur dann gerne auch für ganz andere Zwecke. Das verschleiert die Entstehungsgeschichte von Lebensprozessen und erschwert ihre Erforschung enorm. Evolution erinnert ein bisschen an die berühmten Nonsense-Maschinen des amerikanischen Cartoonisten Rube Goldberg. Diese bestehen aus Elementen, die ihrer ursprünglichen Funktion entfremdet sind. Da rutscht zum Beispiel ein Mann

auf einer Bananenschale aus und lässt über eine komplizierte Funktionskette am Schluss einen Mob eine Schaufenster Scheibe wischen. Wozu Bananenschalen ursprünglich dienen, würde man aus dieser Maschine nie lernen.

Vor einer ähnlichen Situation stehen Forscherinnen und Forscher, wenn sie die Grundfunktionen einer Zelle entschlüsseln wollen. Deshalb versuchen einige, einfachstmögliche Leben herzustellen, in dem sie aus der DNS primitiver Bakterien Stück für Stück genetische Information entfernen. Es gibt auch die umgekehrte Strategie: Aus unbelebter Materie konstruiert man ein möglichst simples System und beobachtet, ob sich darin der gewünschte Lebensprozess von selbst organisiert. Diese Strategie des gezielten Vereinfachens ent-

► Ereignisreiche Zeiten liegen hinter dem fünftgrößten Planeten unseres Sonnensystems: Zunächst war die Erde fundamentalen Umwälzungen unterworfen, später wurde sie zur Heimat von immer weiter entwickeltem Leben. (Grafik: ius)

◀ Künstliche Darstellung einer Stammzelle. Aus diesen Ursprungseinheiten des Körpers können sich spezialisierte Zelltypen wie Muskelzellen, Nervenzellen oder Blutzellen bilden. (Bild: PublicDomainPictures, CC0)

▼ Während ihrer jungen Jahre war die Erde einem wahren Asteroiden-Bombardement ausgesetzt. Wissenschaftler vermuten, dass diese Einschläge große Mengen an organischem Material und Wasser auf den Planeten gebracht haben. (Bild: NASA Goddard Space Flight Center, CC BY 2.0)

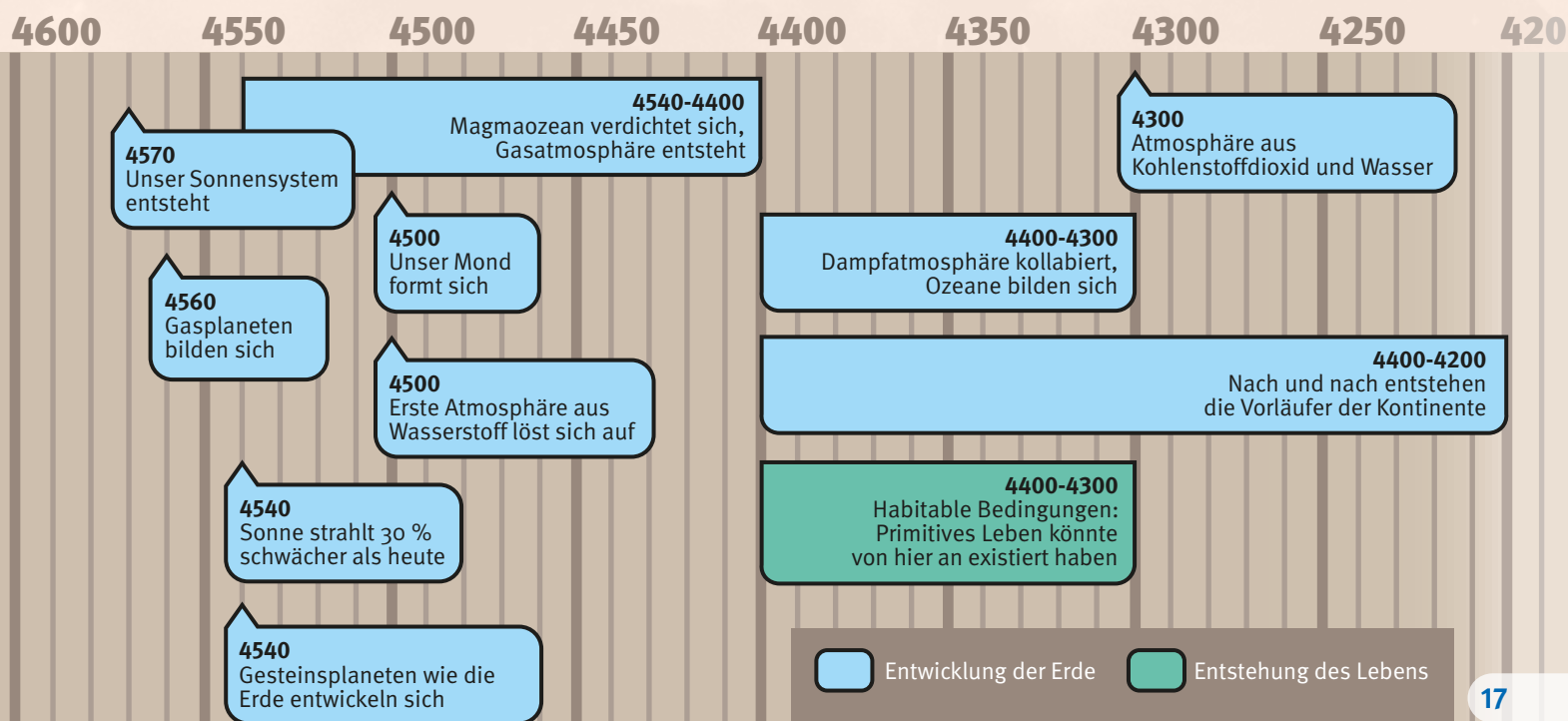
spricht der Denkweise der Physik. Damit untersuchen zum Beispiel deutsche Biophysikerinnen und -physiker, wie der Teilungsmechanismus von Zellen funktioniert. Sie suchen nach dem minimalen Bausatz an Proteinen, der nötig ist, damit die Zellteilung selbstorganisiert anspringt.

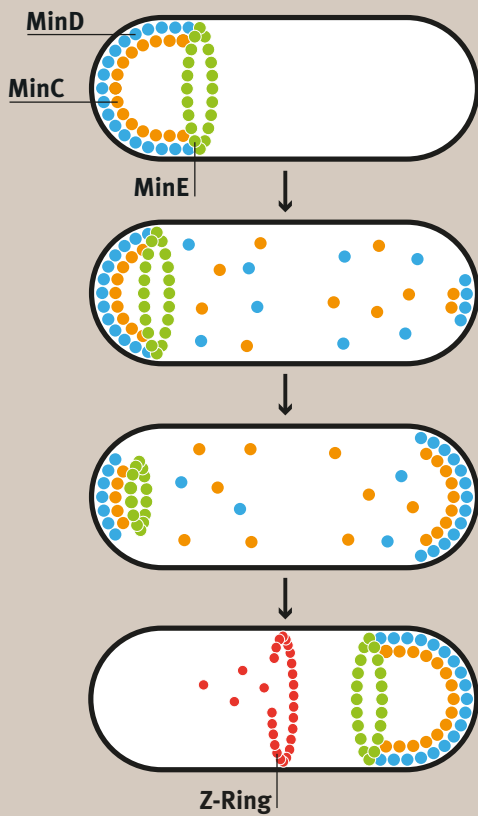
Ein Bakterium wie das stäbchenförmige E. Coli teilt sich, wenn es auf eine bestimmte Länge angewachsen ist. Dazu verdoppelt es zunächst seine DNS und andere le-

benswichtige Moleküle. Diese zwei Pakete schiebt es dann in seine beiden Enden. Danach schnürt es sich in der Mitte ein und bildet zwei Tochterzellen. Dazu darf es aber nicht eines der beiden Molekülpakete versehentlich zerschneiden, denn das wäre tödlich für die betroffene Tochterzelle. Deshalb ist es wichtig, dass es sich exakt in seiner Mitte teilt. Dort lagert es dann einen „Z-Ring“ aus speziellen Proteinen an, der sich zusammenzieht. Wie aber findet das Bakterium seine Mitte?



Vor 4600 Millionen Jahren ...





▲ Das MinCED-System: MinD zieht MinC an einen Zellrand, während MinE es von dort wieder verdrängt. Die beiden gegenläufigen Prozesse provozieren eine Pendelbewegung, die MinC von dem Zellzentrum fernhält. Ein sogenannter Z-Ring bildet sich; die Zelle teilt sich genau in der Mitte. (Grafik: ius)

Die Lösung ist verblüffend. Um sich selbst zu vermessen, benutzt das Kolibakterium ein „Molekülpendel“. Beteiligt daran sind drei Proteine, MinC, MinD und MinE genannt. Hinzu kommt Adenosintriphosphat, dieses ATP ist der universelle Energietreibstoff der Zellen. Das MinC verhindert den Teilungsring. Ist E. Coli reif zum Teilen, dann muss es das MinC also exakt in seiner Mitte von der inneren Zellwand fernhalten, damit sich dort der Z-Ring ausbilden kann.

Für das korrekte Verteilen von MinC sorgen MinD und MinE gemeinsam. Das MinD zieht das MinC wie ein Schlepper mit sich. MinD verankert sich gerne innen mit Energie aus ATP an die Zellwand, das MinE löst es wieder ab. Bei der richtigen Länge des

INFO

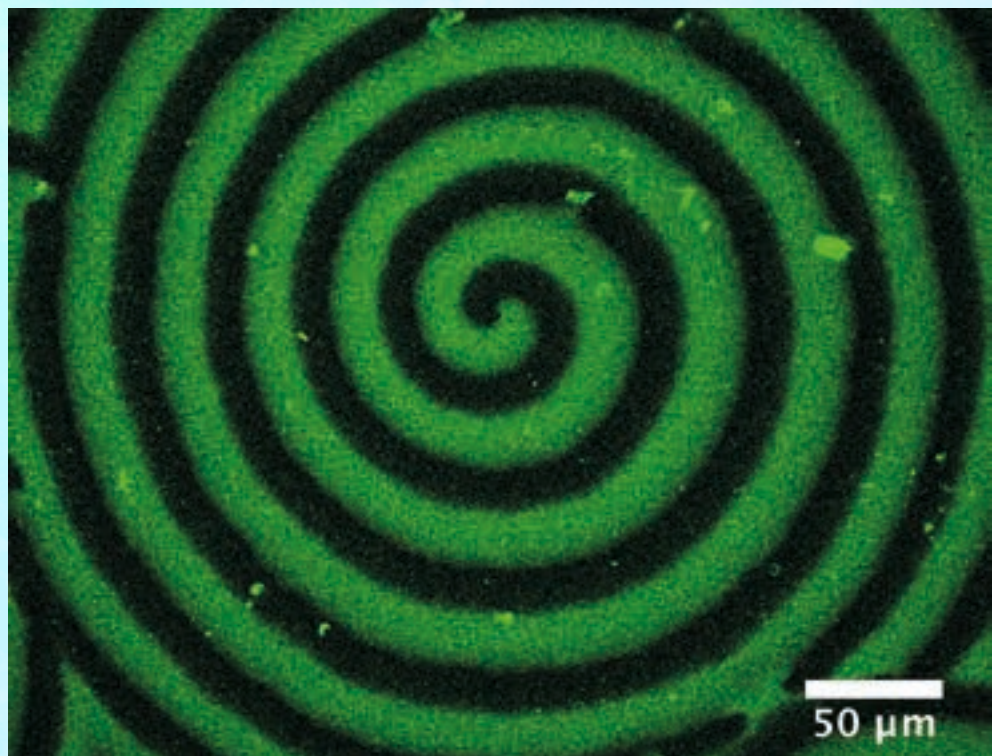
Membranwelt

Zellwände bestehen aus einer einfachen Grundbauform, der Doppellipid-Membran. Ihre Bausteine sind Phospholipid-Moleküle. Diese besitzen einen Wasser liebenden Kopf und zwei Beine, die Fett mögen. Im wässrigen Lebensumfeld organisieren sie sich von selbst zu einem Membran-Sandwich, in dessen Inneren die fettliebenden Füße wie eine Butterschicht geschützt sind. Eine solche Doppelmembran ist maximal zehn Nanometer (Milliardstel Meter) dünn, ein Menschenhaar ist grob zehntausend mal dicker.

Membranen müssen gewisse Stoffe durchlassen, etwa Wasser. Das kommt aber nur schwer durch die fettige Zwischenschicht. Manche Zellen müssen Wasser aber sehr schnell aufnehmen oder abgeben können, zum Beispiel in Drüsen oder in Pflanzen.

In den Membranen sind dazu enorm effiziente Kanalproteine, Aquaporine, eingebaut. Sie wirken wie intelligente Siebe. Während sie Wassermoleküle durch den engen Kanal leiten, müssen sie andere Moleküle am Durchflutschen hindern, selbst wenn diese kleiner sind. Sonst würde die Zelle lebenswichtige Stoffe verlieren.

Das gilt vor allem für Protonen, die Kerne von Wasserstoffatomen. Protonen sind wichtige elektrische Ladungsträger im Energiesystem von Zellen. Sie dürfen nicht wie bei einer kurzgeschlossenen Batterie durch die Membrane auf die falsche Seite gelangen. Das müssen die Aquaporine verhindern, und wie das funktioniert, konnten biophysikalische Computersimulationen demonstrieren. Sie zeigten, dass das Aquaporin die Protonen über ein elektrisches Gegenfeld blockiert.



4000

3750

3500

3250

3000

2750

2500

2250

4100-3800
Starkes Asteroiden-Bombardement

3800
Möglicher Beweis von Leben auf der Erde

3500
Frühester direkter Beweis für Leben

3000
Erste richtige Kontinente entstehen

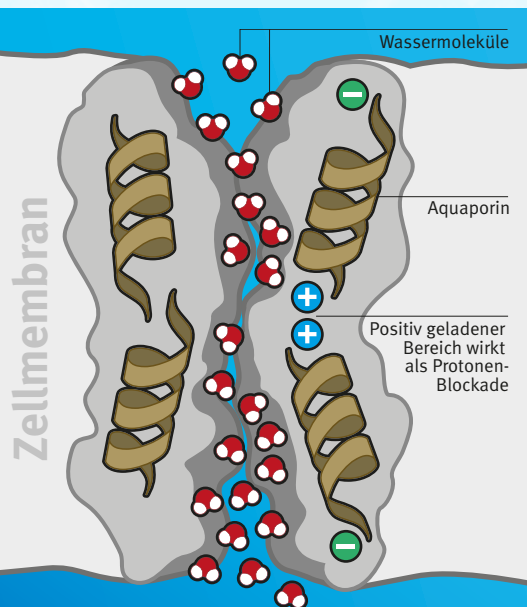
3700
Möglicherweise erste Sauerstoff erzeugende Photosynthese

2400
Freier Sauerstoff in der Atmosphäre steigt deutlich an

2400-2100
Erste globale Eiszeit

Entwicklung der Erde

Entstehung des Lebens



▲ Aquaporine bilden eine Pore, durch die Wassermoleküle hindurchgleiten können. Protonen hingegen wird der Austritt aus der Zelle verweigert – dafür sorgen positive Ladungen in der Mitte des Kanals. (Grafik: ius)

Bakteriums schaukeln sich nun beide gegenläufigen Prozesse zu einer Pendelbewegung auf. Diese läuft zwischen beiden Polen des Bakteriums hin und her. Über die Zeit gemittelt ergibt sie ein Konzentrationsprofil, bei dem die Bakterienmitte frei von MinC bleibt. So kann sich dort der Z-Ring ausbilden und das Einschnüren beginnen. Das Biophysik-Team aus Deutschland konnte zeigen, dass allein MinD und MinE genügen, damit das Molekülpendel selbstorganisiert anschwingt. Es braucht dazu nur ATP als Energielieferant.

Aber wie kann man das Treiben winziger Moleküle verfolgen? Dazu setzt die Forschung ein wichtiges Werkzeug aus der Biophysik ein. Dabei werden die zu beobachtenden Proteine „eingefärbt“. Im Laserlicht leuchten dann das so behandelte MinD und MinE verschiedenfarbig. So

◀ Wenn Zellen sich teilen, dann finden sie ihre Mitte über ein Molekülpendel, an dem die beiden Proteine MinD und MinE beteiligt sind. Setzt man beide auf eine flache, künstliche Zellmembran, dann organisieren sie sich zu einem spiralförmigen Wellenmuster. Solche Muster beschreibt die Chaostheorie. (Bild: Zieske und Schwill, CC BY 4.0)

► Wie die Enden eines Wollknäuels wird ein Molekül mittels mikroskopischer Nadel und Feder auseinandergezogen. Als Lohn erhalten die Forscher beispielsweise Aufschluss über die Ursachen von Muskelerkrankungen. (Bild: MPI für Biophysikalische Chemie, Göttingen)

lassen sich beide Proteine als Leuchtpunkte unter dem Mikroskop verfolgen. Nun brauchte das Team noch ein passendes Spielfeld. Zunächst experimentierte es mit flachen künstlichen Membranen. Auf diesem organisierte sich der Mix aus MinD, MinE und ATP von selbst zu laufenden Wellenmustern – wie eine La-Ola-Welle im Stadion. Sind die Membranen rechteckig beschnitten, entstehen spiralförmige Wellenmuster.

Solche Bilder kennt die Physik auch in anderen Forschungsgebieten. Wenn sich zum Beispiel auf der Oberfläche von Platinkatalysatoren Kohlenmonoxid mit Sauerstoff zu Kohlendioxid verbindet, läuft diese Reaktion dort ebenfalls in schwingenden Spiralmustern ab. Die mathematische Beschreibung solcher Muster liefert ein Gebiet der Physik, das als „Chaostheorie“ bekannt ist. Aber wie entsteht beim Koli-bakterium daraus das Molekülpendel? Dazu musste das Team die Membrane zu einem geschlossenen Raum „aufrollen“. Es konstruierte Mikrobehälter in der Form der Bakterien und kleidete diese mit künstlichen Membranen aus. Darin gerieten MinD und MinE tatsächlich genau in die gesuchte Pendelbewegung.

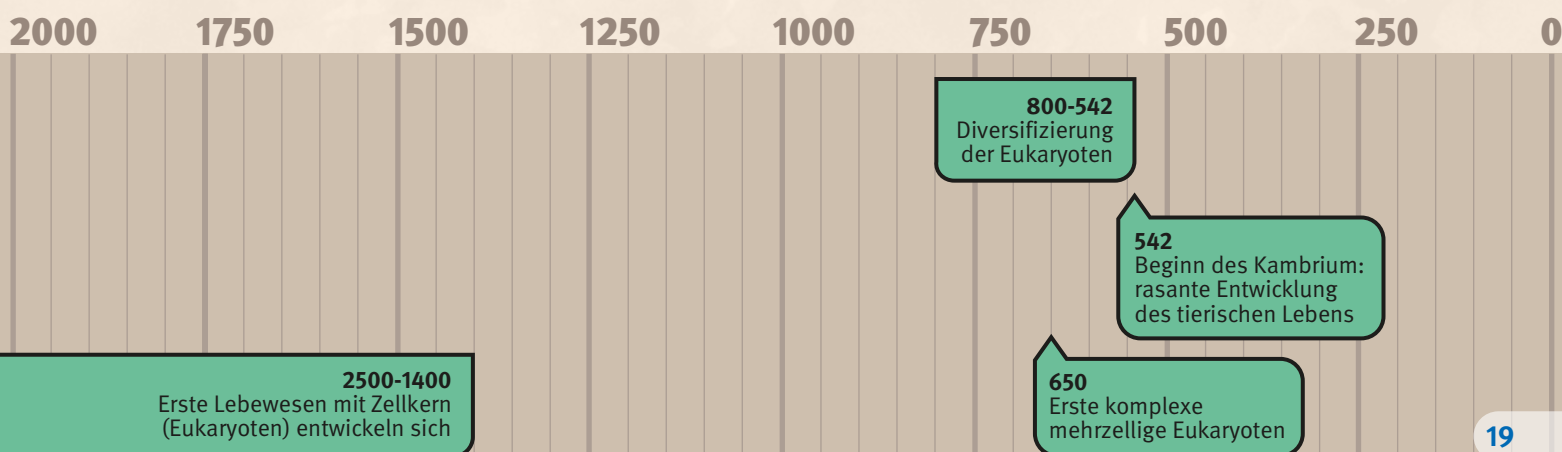
An solchen Experimenten verblüfft vor allem, dass sie nur ganz wenige Zutaten plus Energie benötigen. Wie durch Zauberhand organisiert sich der Prozess dann von selbst. Das Selbstorganisieren von Molekülen zu geordneten Mustern ist also ganz entscheidend für Leben.



Zupfen an Lebensfäden

Über den Aufbau von Lebensmolekülen kann man viel lernen, indem man an ihnen zieht. Doch wie macht man das bei Objekten der Nanowelt? Dazu eignet sich ein Rasterkraftmikroskop. Dieses raffinierte Werkzeug hat die Biophysik in die biologische Forschung eingebracht. Im Prinzip besteht es aus einer superfeinen Nadel an einer sehr empfindlichen Feder. Ein Laserstrahl erfasst ihre Auslenkung. Damit kann das Rasterkraftmikroskop winzige Kräfte messen, die auftreten, wenn man mit seiner Spitze an einem Biomolekül zieht. Dazu bringt man die Spitze an ein Ende des Moleküls, das wie ein Knäuel auf einer Unterlage liegt.

Ein Beispiel ist die hier gezeigte Titinkinase. Sie sitzt als molekularer Sensor in Muskelfasern. Wird eine solche Faser durch starkes Ziehen beansprucht, dann ploppt ein molekularer Stöpsel (rot) aus der Mitte der Titinkinase heraus. Er löst eine Signalkaskade aus, die die Produktion von Muskelproteinen ankurbelt. Mit dem Rasterkraftmikroskop untersuchten Biophysikerinnen und Biophysiker, wie „stark“ die Kraft sein muss, um die Titinkinase zu aktivieren. Aus ihr lässt sich ableiten, welche Beanspruchung Muskelwachstum auslöst. Diese Erkenntnisse sind für die Sportmedizin interessant. Vor allem helfen sie, die Ursachen gefährlicher Muskelerkrankungen zu erforschen.





Im Maschinenraum des Lebens

Proteine sind für alle Lebensfunktionen wichtig. Ein Wunderwerk, das alle Prozesse in einer Zelle mit Energie versorgt, ist die F_0F_1 -ATPase. Sie ist eine winzige molekulare Maschine der Nanowelt des Lebens. Eine andere faszinierende Nanomaschine ist das Ribosom, die Proteinfabrik der Zelle.



Leben braucht Energie aus Nahrung oder Licht. Um den Stoffwechsel in Gang zu halten, werkelt unermüdlich der kleinste Motor der Welt in den Zellkraftwerken. Diese „Mitochondrien“ besitzen eine innere Membrane, auf der eine molekulare Maschinerie läuft, die nie still stehen darf. Sonst wären wir binnen Minuten tot. Diese Maschinerie stellt aus der chemischen Energie, die der Stoffwechsel liefert, den universellen Molekültreibstoff her: Das Adenosintriphosphat (ATP) hält alle Prozesse in den Zellen in Gang. Pro Tag setzt unser Körper 50 Kilogramm ATP um, unter starker Belastung sogar bis zu einer Tonne!

In den Mitochondrien läuft ein wichtiger Teil des Energiestoffwechsels ab, die „Atmungskette“. Sie ist im Prinzip eine kontrollierte Knallgasreaktion: Energiereicher Wasserstoff reagiert mit Sauerstoff zu Wasser. Mit

der freigesetzten Energie lädt sich das Mitochondrium wie eine elektrische Batterie auf. Dazu sammelt es Atomkerne des Wasserstoffs (Protonen) auf einer Seite seiner inneren Membrane an. Als elektrischer Strom treiben diese dann die molekularen Motoren an, die ATP herstellen.

Dieser lebenswichtige molekulare Motor heißt F_0F_1 -ATP-Synthase oder kurz F_0F_1 -ATPase. Intensive biophysikalische Forschung hat entscheidend mitgeholfen, dass seine Funktionsweise heute schon recht gut entschlüsselt ist. Doch nach wie vor steht diese faszinierende Nanomaschine im Fokus der biophysikalischen Forschung.

Die F_0F_1 -ATPase besteht aus [zwei Teilen](#). Der F_0 -Teil steckt in der inneren Membran des Mitochondriums, der F_1 -Teil ragt als Kopf heraus. Zusammen sind beide Teile

nur 25 Nanometer hoch, ein menschliches Haar ist viertausend Mal dicker. Der F_0 -Teil funktioniert als ein vom Protonenstrom betriebener Elektromotor und dreht eine molekulare „Kurbelwelle“. Diese reicht in den F_1 -Kopf hinein, der die eigentliche ATP-Fabrik enthält. Wenn ATP irgendwo in der Zelle seine Energie abliefern, dann klinkt es eine Phosphatgruppe aus. So wird aus dem Adenosintriphosphat mit drei Phosphorgruppen energiearmes Adenosindiphosphat (ADP) mit nur noch zwei solcher Gruppen. Der F_1 -Kopf lädt nun „verbrauchtes“ ADP und einzelne Phosphatgruppen in seine Bindungstaschen und „spannt“ sie dort wieder zu energiereichem ATP zusammen. Dazu muss die Kurbelwelle rotieren.

Wie aber schafft es die Forschung, solche winzigen Mechanismen zu enträtseln? Der erste Schritt ist ein möglichst präzises Bild von der Struktur eines Biomoleküls, mit genauer Lage jedes seiner vielen tausend Atome. Diese Information liefern zum Beispiel Röntgentechniken der Physik. Um die Struktur in 3D zu entschlüsseln,

◀ Wie es in der Feuerbüchse einer alten Dampflokomotive immer brennen muss, damit sie nicht stehen bleibt, hält im menschlichen Körper eine molekulare Maschinerie lebensnotwendige Prozesse permanent in Gang. Stillstand wäre der Tod. (Bild: Multistock/Shutterstock.com)

▼ Eine der ersten Röntgenstruktur-Aufnahmen einer Ribosom-Untereinheit des salzliebenden Bakteriums *Haloarcula marismortui*, das im Toten Meer lebt. (Bild: F. Schlünzen, J. Harms, Physik in unserer Zeit)



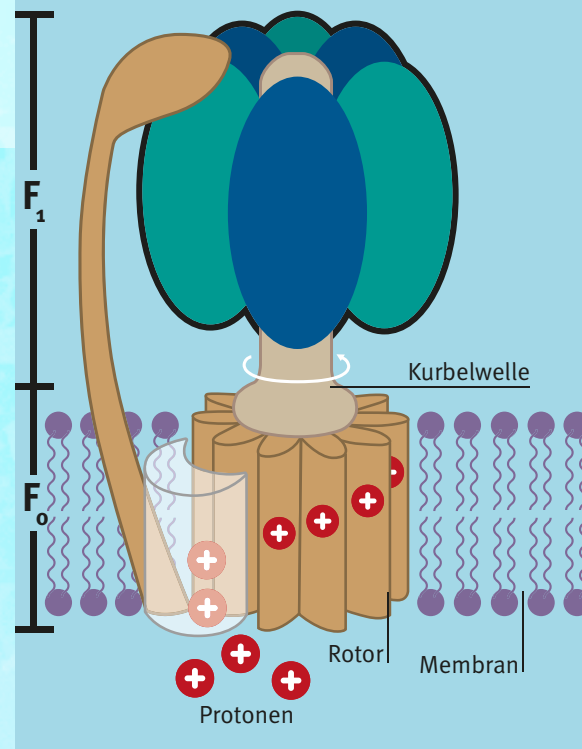
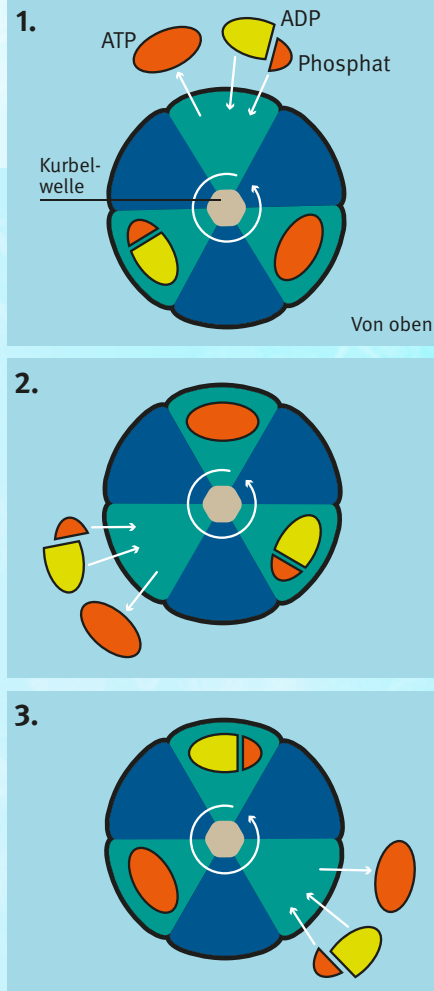
INFO

Lesen im Kristall

Um molekulare Strukturen aufzulösen, eignen sich kurzwellige Röntgenstrahlen. Allerdings liefert ein einzelnes Molekül ein nur sehr schwaches Röntgensignal. Man braucht also viele Moleküle zugleich.

Deshalb hat sich in den Biowissenschaften ein Verfahren aus der Festkörperphysik etabliert. Dabei schickt man das Röntgenlicht durch viele gleichartige Biomoleküle, die zu einem regelmäßigen Kristall geordnet sind. So ein Kristall bildet ein räumliches Gitter, das die Röntgenstrahlen „beugt“. Jeder Gitterpunkt wirkt wie ein kleiner Sender, der eine Kugelwelle abstrahlt. In bestimmten Richtungen überlagern sich die Wellen benachbarter Gitterpunkte so, dass Wellenberg auf Wellenberg trifft und sich verstärkt. Das ergibt ein „Beugungsbild“ aus einem regelmäßigen Punktmuster. Das Muster liefert Informationen über den inneren Aufbau der Moleküle.

Allerdings ist es gerade bei großen Molekülen aufwendig, daraus die chemische Struktur zu rekonstruieren. Als Anfang der 1950er Jahre die ersten Röntgenstruktur-Analysen an Biomolekülen gemacht wurden, setzte man deshalb bereits frühe Computer ein. Heute ist diese Methode für viele Forschungsgebiete unverzichtbar. Neben der Biophysik sind es die Chemie, Physik, Mineralogie, Materialwissenschaften und Pharmaforschung,



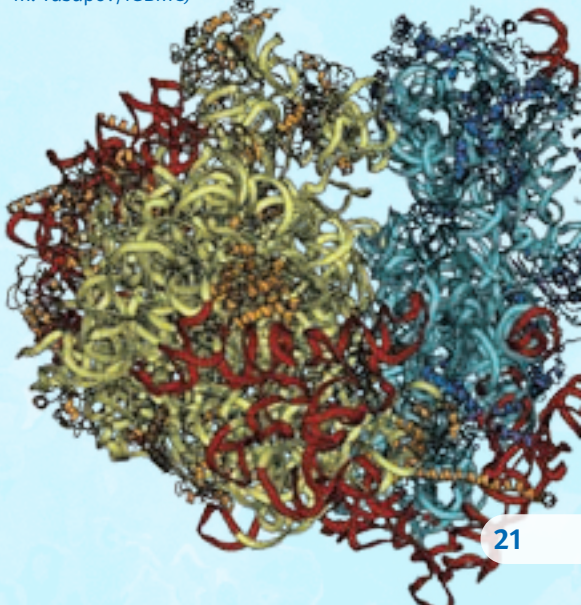
◀ ▲ Aufbau der ATP-Fabrik: Wie bei einer Wasserturbine wird ein Rotor durch den Protonenstrom in eine Drehbewegung versetzt. Er treibt eine zentrale Kurbelwelle an, die reihum die drei grünen Taschen des (starken) Kopfes öffnet. Einem Dreiecksmotor gleich wird dort zeitversetzt ADP in ATP zurückverwandelt. (Grafik: ius)

müssen die Forscher die Biomoleküle zunächst in Kristalle „sortieren“. Diese Kristalle durchleuchten sie mit Röntgenstrahlung. Ihre Wellenlänge ist so kurz, dass sie die Position einzelner Atome erfassen kann. Atome verhalten sich hier ein bisschen wie Bojen: Auf kurzen, kabbelligen Wasserwellen hinterlassen sie eine deutliche Spur, auf eine langwellige Dünung haben sie kaum Einfluss. Besonders gut eignet sich intensives, gebündeltes Röntgenlicht aus sehr leistungsfähigen Strahlungsquellen, Synchrotron genannt (→ Info S. 23). Diese großen Geräte kommen ursprünglich aus der Teilchenphysik. Heute sind sie als „Supermikroskope“ zum Zoomen in die Nanowelt unverzichtbar.

Allerdings liefern solche Methoden bislang nur Schnappschüsse einer eingefrorenen, dreidimensionalen Molekülstruktur. Proteine bewegen sich jedoch, wenn sie im Maschinenraum des Lebens arbeiten. Diese winzigen Bewegungen muss die Forschung enträtseln, um die Funktionsweise zu verstehen. Tatsächlich gibt es Methoden, solche Bewegungen sichtbar zu machen. Zwei wichtige davon hat das vorige Kapitel vorgestellt. Eine Methode versieht Moleküle – oder Teile von ihnen – mit einem Farbstoff, der im Licht aufleuchtet. Damit hat die Biophysik in den 1990er-Jahren nachweisen können, dass sich die Kurbelwelle der F₀F₁-ATPase tatsächlich dreht. Die andere Methode besteht darin, winzige molekulare Bewegungen mit einem Rasterkraftmikroskop zu erfassen (→ Info S. 19).

Solche Techniken können aber nur sehr begrenzt offenlegen, was alle an der Molekülbewegung beteiligten Atome genau treiben. Hier hilft die theoretische Biophysik mit dreidimensionalen Computeranimationen. Dazu programmieren die Forscherinnen und Forscher die Molekülstruktur aus einem Röntgen-Schnappschuss in einen sehr leistungsfähigen Computer ein. Im Idealfall stehen ihnen mehrere Schnappschüsse aus verschiedenen Bewegungsstadien zur Verfügung.

▼ Ribosomen sind die Proteinfabriken der lebenden Zellen – und selbst hoch komplexe Biomoleküle. 2011 gelang es erstmals, die Struktur von Ribosomen in eukaryotischen Zellen – komplexe Zellen, die über einen Zellkern verfügen – aufzuklären. (Bild: M. Yusupov/IGBMC)



Forschung mit Neutronen

Um mehr über die innere Struktur und die Eigenschaften von Materialien zu erfahren, setzen Wissenschaftler neben elektromagnetischen Wellen auch Neutronen ein – die elektrisch neutralen Bestandteile von Atomkernen.

Diese Teilchen können tief in die Materie eindringen, prallen dort an den Atomkernen ab und ändern dabei Richtung und Geschwindigkeit. Aus der genauen Art dieser Streuung kann die Anordnung der Atome und ihre Bewegung ermittelt werden – wichtige Informationen für die Materialforschung und die Biowissenschaften.

Besonders die leichten Elemente des Periodensystems können mit Neutronen genau untersucht und unterschieden werden. So ist etwa das chemische Element Lithium, das beispielsweise in modernen Batterien steckt, mit dem Neutron als Sonde sehr gut zu erkennen. Auch magnetische Eigenschaften lassen sich erkunden, da das Neutron selbst wie ein kleiner Stabmagnet wirkt.

Anders als Protonen – die Kerne des Wasserstoffs – zerfallen freie Neutronen nach rund einer Viertelstunde wieder. Daher müssen sie an den Experimenten frisch erzeugt werden: Entweder in Kernspaltungsreaktoren oder in sog. Spallationsquellen. In Deutschland stehen in Berlin und in Garching bei München zwei leistungsfähige Forschungsreaktoren zur Verfügung. Und an der neuen europäischen Spallationsquelle, die zurzeit in Schweden errichtet wird, sind deutsche Forscher intensiv beteiligt.



▲ Oben: Blick in das Innere des Hochfluss-Forschungsreaktors am Institut Laue-Langevin (ILL) in Grenoble. Das ILL wird zu einem Drittel von Deutschland finanziert. (Bild: ILL/Jean-Luc Baudet)

▲ Unten: Gemeinsam mit zahlreichen internationalen Partnern wird zurzeit im südschwedischen Lund die Europäische Spallationsquelle ESS errichtet. Ab 2019 werden hier Neutronen aus Atomkernen herausgeschlagen. Die ESS soll 2025 komplett fertiggestellt sein. Sie ist dann die leistungsfähigste Neutronenquelle weltweit. (Bild: ESS/Team Henning Larsen Architects.)

Mit Hilfe von physikalischen Modellen rechnet der Computer dann alle Zwischenstadien der molekularen Bewegung aus. Gelingt das, dann zeigt die 3D-Animation die entscheidende Bewegung des Moleküls, etwa eines Proteins. In Zukunft sollen leistungsstarke „Freie-Elektronen-Laser“ (→ Info S. 23) sogar detaillierte 3D-Bilder aller Bewegungsstadien realer Moleküle aufnehmen können. Zusammengesetzt werden sie zu „Filmen“ dieser Bewegungen.

Proteine haben vielfältige Aufgaben. Bis zu 100.000 verschiedene solcher molekularer Maschinen gibt es geschätzt im menschlichen Körper. Sie alle stammen aus genialen Proteinfabriken, den Ribosomen. Mit 25 bis 30 Nanometern ist ein Ribosom ungefähr so winzig wie eine F_0F_1 -ATPase. Ribosomen sind die größten Energieverbraucher in Zellen. Eidechsen

können ihre Ribosomen in Hungerphasen weitgehend abschalten. Ihre Zellen „parken“ sie dazu in einer kristallähnlichen Ordnung. Diese Fähigkeit zum Kristallisieren konnte das Team der israelischen Strukturbiologin Ada Yonath nutzen, zu dem auch Deutsche gehörten. Damit gelang es ihnen, die genaue chemische Struktur von Bakterien-Ribosomen mit Röntgenstrahlung aufzuklären. Am Deutschen Elektronen-Synchrotron DESY in Hamburg schickten sie dazu Synchrotron-Strahlung durch Ribosomenkristalle.

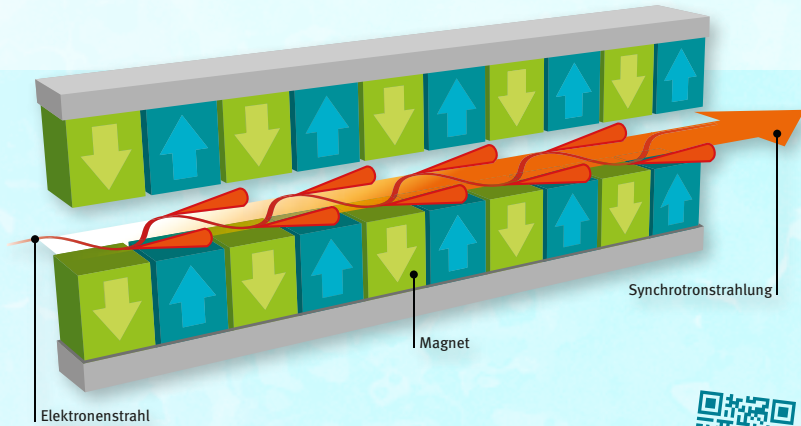
Yonath wurde dafür 2009 mit dem Chemie-Nobelpreis geehrt. Diese Forschung ist auch für die Entwicklung neuer Antibiotika wichtig, denn sie liefert die genaue Ribosomenstruktur des Krankheitserregers, den man bekämpfen will. Mit diesen Daten lassen sich Moleküle designen, die dieses Ribosom passgenau

blockieren und die Proteinfabrik des Erregers ausschalten. Die Ribosomen der menschlichen Zellen bleiben dagegen unbehelligt, weil sie eine andere Struktur besitzen. Das ist immer wichtiger, weil herkömmliche Antibiotika gegen resistente Keime versagen. So kann die Grundlagenforschung der Medizin wieder einen lebenswichtigen Vorsprung vor den Erregern verschaffen.

Physikerinnen und Physiker waren immer von Lebensmolekülen fasziniert. An der Entschlüsselung der Doppelhelix der DNS waren sogar zwei Physiker beteiligt, die Briten Francis Crick und Maurice Wilkins. Sie erhielten 1962 den Nobelpreis für Physiologie oder Medizin gemeinsam mit dem Mikrobiologen James Watson. Die Biochemikerin Rosalind Franklin, die entscheidende Daten geliefert hatte, starb tragi-scherweise schon 1958 mit nur 37 Jahren.

► Durch die spezielle Magnetanordnung in einem Undulator werden hindurchfliegende Elektronen auf eine periodische, meist sinusförmige Bahn gezwungen. Die so beschleunigten Elektronen erzeugen Synchrotronstrahlung in Flugrichtung. (Grafik: ius, nach DESY)

▼ Orte mit Erkenntnisgewinn: Der ESRF-Elektronenspeicherring im französischen Grenoble (oben). Im mit 2304 Metern größten Speicherring der Welt für Synchrotronstrahlung von PETRA III bei DESY in Hamburg können Teilchen auf annähernd Lichtgeschwindigkeit beschleunigt werden (Mitte). 2017 geht dort zudem der 3,4 Kilometer lange European XFEL (unten) an den Start. (Bilder: P. Ginter, ESRF | DESY | Blunck+Morgen Architekten, European XFEL)



INFO

Forschung mit Photonen

Das Sonnenlicht, mit dem wir alltäglich unsere Umgebung wahrnehmen, hat eine Wellenlänge von rund 400 bis 800 Nanometern. Um jedoch die Struktur von Molekülen zu erforschen, benötigt man Wellenlängen, die viel kleiner sind, nämlich höchstens so groß wie die Abstände zwischen den Atomen. Röntgenstrahlung erfüllt diese Bedingung und wird beispielsweise zur Röntgenstrukturanalyse eingesetzt (→ Info S. 21 „Lesen im Kristall“). Besonders gute Ergebnisse lassen sich erzielen, wenn dieses Licht möglichst hell ist und nur einen kleinen Wellenlängenbereich umfasst.

Das für wissenschaftliche Analysen nötige Röntgenlicht lässt sich an Synchrotronstrahlungsquellen mit besonders hoher Qualität erzeugen. Elektronen werden in diesen Ringbeschleunigern zunächst auf nahezu Lichtgeschwindigkeit beschleunigt und schließlich – durch die Kraft von Magneten – auf einen Slalomparcours gelenkt. In diesen sogenannten Undulatoren werden die elektrisch geladenen Elektronen hin und her beschleunigt und senden dadurch die gewünschte Strahlung aus. Wegen der extrem hohen Geschwindigkeit der Elektronen ist das Licht außerdem stark in Flugrichtung der Teilchen gebündelt. Die Wellenlänge der ausgesandten Strahlung lässt sich durch die Anordnung der Magnete im Undulator oder die Energie der Elektronen je nach Bedarf einstellen, bis hin zum Röntgenlicht. Wichtige Synchrotronstrahlungsquellen sind PETRA III in Hamburg, BESSY II in Berlin oder die ESRF in Grenoble (Frankreich).

Verlängert man die Undulatorstrecken, so erhält man noch stärker fokussiertes und kohärentes – also im Gleichtakt schwingendes – Synchrotronlicht. Da diese Strahlung dem Laserlicht in seinen Eigenschaften sehr ähnlich ist, nennt man diese Lichtquellen auch „Freie-Elektronen-Laser“, kurz FEL. Anders als bei den Synchrotronquellen müssen hier Linearbeschleuniger verwendet werden, um Platz für die langen Undulatorstrecken zu haben. In der Metropolregion Hamburg entsteht derzeit der European XFEL, der mit einer Länge von 3,4 Kilometern einen der weltgrößten Linearbeschleuniger enthalten wird.

Ein besonderer Clou des European XFEL wird die kurze Leuchtdauer seiner intensiven Röntgenpulse sein. Wie bei einem Stroboskop kann man durch schnell aufeinanderfolgende Lichtpulse nämlich die Filme des Nanokosmos aufnehmen und so beispielsweise die Vorgänge biochemischer Reaktion im Detail nachvollziehen. Die Hoffnung der Forschenden: Mit diesen Informationen können beispielsweise maßgeschneiderte Medikamente gegen bestimmte Krankheitserreger entwickelt werden.





Am Quantenpuls

Was hat Biologie mit Quantenphysik zu tun? Erstaunlich viel. Pflanzen schicken bei der Photosynthese die umgewandelte Energie der eingefangenen Lichtquanten auf eine „Quantenfahrt“. Auch unser Geruchssinn nutzt mutmaßlich Quanteneffekte – und Vögel haben einen Quantenkompass im Auge.

Die Evolution hat gelernt, Quanteneffekte geschickt zu nutzen. Das untersucht die Quantenbiologie, ein Gebiet der Biophysik. Quanten sind in der Physik kleinstmögliche Portionen, zum Beispiel an Energie, die Licht und Materie miteinander austauschen. Das spielt eine Rolle, wenn Pflanzen Lichtquanten, Photonen, einfangen und in Energie für ihren Stoffwechsel umwandeln. Allerdings sind in der Natur an solchen Abläufen immer viele Akteure beteiligt: Elektronen, Atome und Moleküle.

Wenn die Natur also Quantenphänomene zum Vorteil nutzt, dann sind diese komplex und nur schwer dingfest zu machen. Vor allem sind Quantenzustände, an denen mehrere Quantenteilchen beteiligt sind, hochempfindlich gegen Störungen durch sich bewegende Moleküle. Diese vollführen aber einen wild bewegten Wärmetanz bei den Wohlfühltemperaturen

des Lebens. Trotzdem stößt die Forschung in der Natur auf Vorgänge, hinter denen offenbar Quantenphysik steckt.

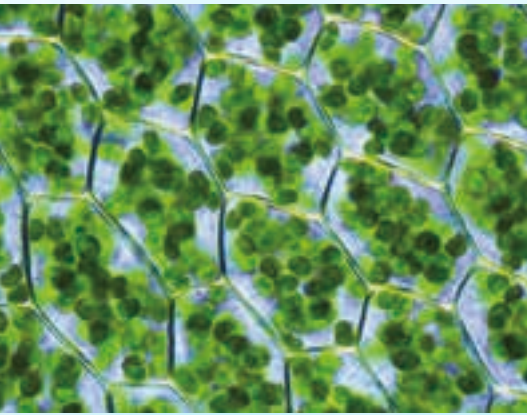
In der Quantenwelt besitzen Teilchen auch Welleneigenschaften. Diese Materiewellen können sich überlagern. Trifft ein Wellenberg auf einen anderen, verstärken sie sich, rutscht er in ein Wellental, können sich beide neutralisieren. „**Interferenz**“ heißt diese konstruktive oder destruktive Überlagerung in der Physik. Einfach gesagt reitet ein Teilchen am wahrscheinlichsten dort auf seiner Materiewelle, wo diese Welle besonders stark ausschlägt. Mit den raumgreifenden Wellen können Quantenteilchen sogar hohe Energiebarrieren durchtunneln, etwa zwischen Molekülen.

Zudem können die Teilchen ein eng verwobenes Quantenkollektiv bilden – ein bisschen wie Ruderer in einem Boot, die

sich im Gleichtakt eingeschwungen haben. Allerdings wurde lange bezweifelt, dass gerade solche Vielteilchen-Quanteneffekte in biologischen Systemen existieren können. Sie sind besonders empfindlich gegen Störungen durch das ständige „Wärmegerappel“ der Moleküle. Doch die Natur hat offenbar gelernt, solche Störungen sogar geschickt zu nutzen, um sensible Quantenzustände aus mehreren Teilchen zu stabilisieren. Die Theorie der Quanteninformation, ein boomendes Gebiet der Physik, hat gezeigt, dass das geht. Allerdings funktioniert diese Stabilisierung nur sehr kurz und über winzige Distanzen. Doch für manche Funktionen genügt dieser kleine Spielraum.

Mit diesem Ansatz versucht die Quantenbiologie, ungelöste Rätsel der Biologie zu knacken. Eines ist der Geruchssinn. In den Membranen von Riechsinneszellen stecken große Proteine, die als Geruchsrezeptoren fungieren. Dazu besitzen sie taschenförmige Andockstellen für bestimmte Moleküle. Passt ein Duftmolekül in eine solche Tasche wie ein Schlüssel in





▲ Mikrofotografie des Laubmooses *Plagiomnium affine*. Photosynthese findet bei den Landpflanzen in den Chloroplasten statt, einem Teilbereich der Zelle. (Bild: Kristian Peters, CC BY-SA 3.0)

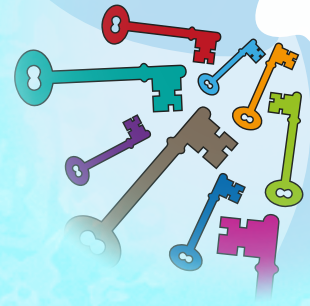
◀ Zugvögel wie dieser Weißstorch nutzen auf ihren langen Reisen das Erdmagnetfeld zur Orientierung. Ein Kompass in ihren Augen bedient sich dabei auf raffinierte Weise der Quantenphysik. (Bild: Carlos Delgado, CC-BY-SA)

ein Schloss, dann löst das ein Nervensignal aus. Dieses elegante Schlüssel-Schloss-Prinzip kann aber ein Problem nicht lösen: Es gibt weit mehr Schlüssel als Schlösser. Menschen können mit nur ein paar hundert verschiedenen Geruchsrezeptoren viele tausend Gerüche unterscheiden! Ein Rezeptor ist also nicht nur ein tolerantes Schloss, das viele Schlüssel

akzeptiert – er kann sogar jeden Schlüssel genau erkennen. Wie macht er das?

Hier kommt Quantenphysik ins Spiel. Rezeptoren scheinen verschiedene Duftmoleküle an ihren individuellen Schwingungen unterscheiden zu können. Jedes Molekül hat ein charakteristisches Schwingungsspektrum, so wie eine Geige anders als eine Gitarre klingt. Diesen „Sound“ nutzt die physikalische Technik der Spektroskopie, um bestimmte Molekülsorten nachzuweisen. Das Prinzip scheinen auch Geruchsrezeptoren zu nutzen, wie Experimente mit *Drosophila melanogaster* zeigten. Diese Taufliegen konnten eine Molekülsorte von einer raffiniert manipulierten Variante unterscheiden. In deren Molekülgerüst wurde der leichte Wasserstoff durch schweren ersetzt. Das Deuterium verstimmt die Molekülschwingungen wie eine dickere, schwerere Saite ein Instrument. Genau diesen feinen Unterschied konnten die Taufliegen riechen. Wie ihre Geruchsrezeptoren das machen, ist noch unklar. Offenbar ist aber Quantenphysik im Spiel.

Ein weiteres Forschungsfeld ist eine mutmaßliche „Quanten-Rennstrecke“ in der [Photosynthese](#) in Pflanzen, Algen oder Bakterien. Die Photosynthese funktioniert im Prinzip wie eine Solarzelle mit angeschlossenem Bioreaktor. Den Anfang macht eine Art Lichtantenne. Dieser Lichtsammelkomplex besteht aus Proteinen,



in die Farbstoffmoleküle eingebettet sind, bei Pflanzen grüne Chlorophylle. Er fängt Lichtquanten ein und leitet ihre umgewandelte Energie über eine Reihe von Elektronen zum „Reaktionszentrum“. Dort startet die eigentliche Photosynthese.

Das Verblüffende ist die Effizienz dieses Energietransports, beim grünen Schwefelbakterium zum Beispiel erreicht sie fast hundert Prozent. Tatsächlich weisen Experimente darauf hin, dass ein kollektiver Quantenzustand dahinter steckt. Über diese „Quantenpost“ schickt der Lichtsammelkomplex die umgewandelte Energie der Lichtquanten so flink zum Reaktionszentrum, dass es kaum Verluste gibt.

▼ Interferenz, also die Überlagerung von Wellen, ist ein wichtiger Aspekt der Quantenphysik. Sehen kann man sie aber auch beim Sonntagsspaziergang – etwa, wenn ein Wasserläufer auf einem See unterwegs ist. (Bild: Michael Becker, CC BY-NC 2.0)





INFO

Nanodiamanten gegen Eisenmangel

Zu wenig oder zu viel Eisen im Körper ist nicht gut. Im ersteren Fall ist Anämie die Folge: Im Blut ist zu wenig Hämoglobin, das Eisen zum Transport von Sauerstoff benötigt. Zu viel Eisen im Blut kann dagegen auf eine akute Entzündung hinweisen. Der Körper von gesunden Menschen speichert 20 Prozent seines Eisenvorrats im Protein-komplex Ferritin, der deshalb auch Eisen-Depot heißt. Bis zu 4500 Eisenatome kann ein Ferritinkomplex enthalten.

Für die medizinische Blutuntersuchung ist es also wichtig, den Eisengehalt richtig zu bestimmen. Das ist aber derzeit nur in aufwendigen Labortests möglich, in denen das Eisen aus dem Ferritin herausgelöst werden muss. Ein Team der Universität Ulm arbeitet daher an einem Biosensor, der den Eisengehalt direkt bestimmen kann. Er nutzt eine raffinierte Quantentechnik, die das extrem schwache Magnetfeld der Eisenatome im Ferritin aufspürt. Als Sensoren fungieren winzige Nanodiamanten. In ihre Kristallgitter sind Stickstoffatome gezielt als Fehler eingebaut. Das macht Diamanten farbig, deshalb heißen diese Fehler Farbzentren. Sie bilden Quantendetektoren für extrem schwache Magnetfelder. Damit können die Biosensoren die Menge des im Ferritin gespeicherten Eisens genau ermitteln.



Ein faszinierendes Quantenphänomen der Natur ist die Navigation. Vögel benutzen das [Erdmagnetfeld](#) zur Orientierung. Experimente zeigten, dass dieser „Kompass“ nur im blaugrünen Lichtspektrum funktioniert. Er sitzt im Vogelauge, doch wie er funktioniert, blieb lange ein Rätsel.

Auf die Lösung kam die Biophysik: Das Erdmagnetfeld verändert die chemischen Eigenschaften bestimmter Farbstoffmoleküle in der Netzhaut, und damit können die Vögel es „sehen“. Da das Erdmagnetfeld schwach ist, braucht der Kompass

◀ Mit Hilfe von ca. 100 Mikrometer kleinen Diamanten gelang es Ulmer Forschern, den Eisengehalt in Blut sehr genau zu bestimmen. (Bild: 3. Physikalisches Institut, Uni Stuttgart)

▶ Große Entdeckungen berühmter Forscher: Die „Ahnentafel“ zeigt, dass viele bahnbrechende Erkenntnisse nur durch ein enges Zusammenspiel von Biologie und Physik möglich wurden. (Grafik: ius)



▼ *Drosophila melanogaster*. Von der rund 2,5 Millimeter großen Taufliege wird vermutet, dass sie mit Hilfe von Quantenphysik feinste Unterschiede von Molekülsorten riechen kann. (Bild: Géry Parent/CC by-ND 2.0)

▲ Sowohl die magnetischen Pole als auch der magnetische Äquator weichen von ihren geographischen Pendanten ab. Zugvögel können die erdumspannenden Magnetfeldlinien dennoch nutzen, um perfekt zu navigieren. (Grafik: ius)



einen hochempfindlichen Quantenmechanismus. Aktiviert wird er durch Lichtquanten, die genügend Energie mitbringen müssen – also durch kurzwelliges, blaugrünes Licht. Das Photon schlägt ein Elektron aus einem Farbstoffmolekül heraus. Dieses bildet zusammen mit einem zweiten Elektron kurzzeitig den superempfindlichen Quantenkompass. Damit kann der Vogel wahrnehmen, wie steil das Magnetfeld aus der Erdoberfläche ragt: je steiler, desto näher ist er an einem der Pole. Die Natur nutzt also längst raffinierte Quantentechnologien.

Die in diesem Heft vorgestellten Beispiele zeigen, wie die Methoden und Techniken der Physik helfen, komplexe Fragen der Biologie zu lösen. Physik ist keinesfalls auf die Erforschung „toter“ Materie beschränkt. Sie hat mit der Erfindung verschiedenster mikroskopischer Techniken die Tür zum Mikrokosmos immer weiter geöffnet. Heute ist die Biophysik sogar auf der Spur der Quantentricks, die die Evolution seit Jahrmillionen geschickt einsetzt. Menschen können von der Natur noch viel lernen.



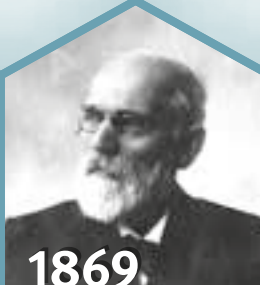
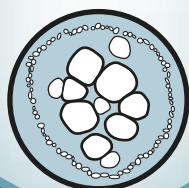
1609

Galileo Galilei
baut Anfang des 17. Jahrhunderts eines der ersten Lichtmikroskope auf Basis eines Teleskops.



1673

Antoni van Leeuwenhoek
schafft den Durchbruch in der Mikroskopie: Mit einer fast perfekt geschliffenen Linse blickt er erstmals in den Mikrokosmos.



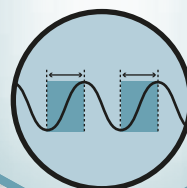
1869

Johannes Diderik van der Waals
ergründet die Anziehungskräfte zwischen unpolaren Atomen bzw. Molekülen – die nach ihm benannten Van-der-Waals-Kräfte.



1873

Ernst Abbe
erkennt, dass die Auflösung optischer Mikroskope nie über die halbe Wellenlänge des Lichts steigen kann.



1931

Ernst Ruska
baut das erste Elektronenmikroskop, das Elektronenstrahlen bricht wie Licht in Linsen, aber viel höhere Auflösungen erreicht.



1940

Max Delbrück
erforscht Bakteriophagen und begründet damit die moderne Bakteriengenetik und Molekularbiologie.



1944

Erwin Schrödinger
erklärt in seinem Buch „Was ist Leben?“ biologische Themen physikalisch und stößt so die Entstehung der Molekularbiologie an.



1951

Rosalind Franklin Maurice Wilkins
Die Pionierin der DNS-Kristallographie trägt mit ihrem Kollegen Wilkins wesentlich zur Strukturaufklärung der DNS bei.



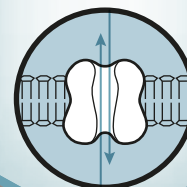
1953

Francis Crick James Watson
klären auf Basis der Forschungen von Franklin und Wilkins das Doppelhelixmodell der Desoxyribonukleinsäure (DNS) auf.



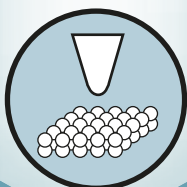
1976

Erwin Neher Bert Sakmann
entwickeln die Patch-Clamp-Technik, mit der sich einzelne Ionenkanäle und ihre Funktion in der Zellmembran abbilden lassen.



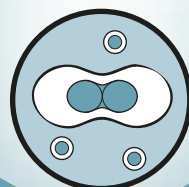
1981

Gerd Binnig Heinrich Rohrer
öffnen mit ihrer Erfindung des Rastertunnelmikroskops die Tür zu den Nanowissenschaften.



1999

Petra Schülle
entwickelt fluoreszenzspektroskopische Verfahren, um Biomoleküle sichtbar zu machen und die Zellteilung zu entschlüsseln.



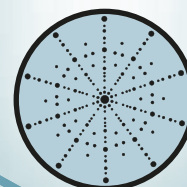
1999

Stefan Hell
entwickelt das STED-Mikroskop, das Bilder jenseits der Abbe'schen Auflösungsgrenze ermöglicht.



2000

Ada E. Yonath
entschlüsselt mit Hilfe der Röntgenstrukturanalyse die atomare Struktur von Ribosomen.



2010

Marina Rodnina
filmt mittels der 3D-Kryo-Elektronenmikroskopie erstmals ein Ribosom live bei der Proteinbiosynthese.



2016 highlights der physik

Inspiziert und begeistert durch den Erfolg des „Jahres der Physik 2000“ veranstalten das Bundesministerium für Bildung und Forschung und die Deutsche Physikalische Gesellschaft seit 2001 ein jährliches Physikfestival: die „Highlights der Physik“. Das Festival zieht mit jährlich wechselnder Thematik von Stadt zu Stadt. Mitveranstalter sind stets ortsansässige Institutionen. Die vorliegende Broschüre erscheint zu den „Highlights der Physik 2016: Mikrokosmos“ (Ulm, 27.9. – 01.10.2016).
Infos: www.physik-highlights.de

Veranstalter



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung



ulm university universität
uulm

Partner



Klaus Tschira Stiftung
gemeinnützige GmbH



We make it visible.

Carl Zeiss Stiftung



Medienpartner

SÜDWEST PRESSE

Förderer



extreme lithography

