

PLANETOLOGIE  Diesen Artikel können Sie als Audiodatei beziehen; siehe www.spektrum.de/audio

Warum der Mars zwei Gesichter hat

Neue Untersuchungen zeigen, dass das ausgedehnte Tiefland auf der Nordhalbkugel des Mars ursprünglich eine elliptische Form hatte. Computersimulationen zufolge könnte es beim Einschlag eines Asteroiden entstanden sein, der ein Drittel so groß war wie der Planet selbst.

Von Jan Hattenbach

Der Mars ist äußerlich zweigeteilt: Den kraterübersäten Hochländern der Südhalbkugel, die knapp zwei Drittel seiner Oberfläche umfassen, steht im Norden eine flache, fast kraterlose Ebene gegenüber, das so genannte Borealisbecken. Diese Dichotomie stellt die Planetenforscher seit ihrer Entdeckung in den 1970er Jahren vor ein Rätsel. Entstand das Becken durch den Einschlag eines großen Himmelskörpers, etwa eines Asteroiden oder Kometen?

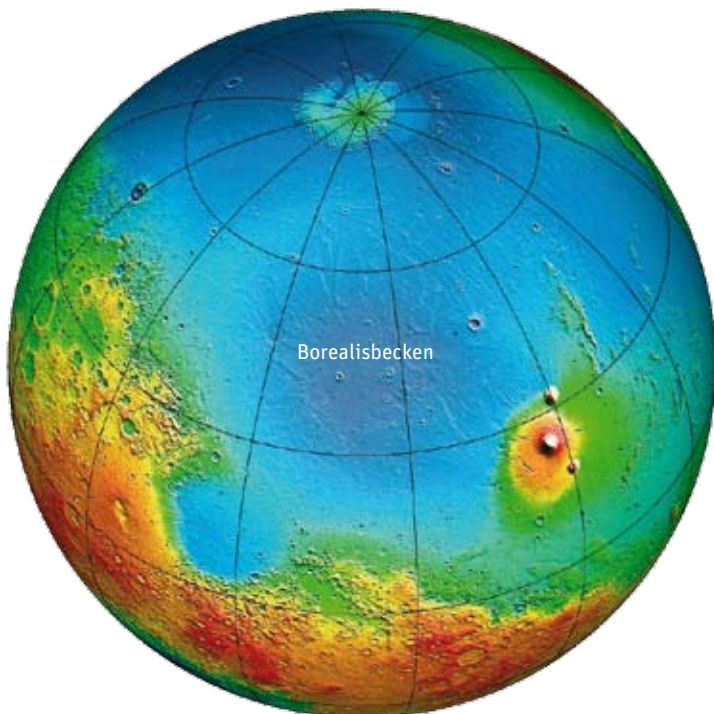
Diese naheliegende Vermutung kam schon früh auf. Dagegen spricht jedoch die Form der Senke, die im Mittel zwei Kilometer tiefer liegt als das Hochland.

Ihr Rand verläuft unregelmäßig; eine Impaktstruktur sollte hingegen annähernd kreisrund sein. Aus diesem Grund haben manche Forscher das Borealisbecken nicht dem Einschlag eines einzelnen, sondern einer ganzen Serie von Asteroiden zugeschrieben. Doch ein solches kosmisches Trommelfeuer scheint sehr unwahrscheinlich – zumal es seltsamerweise nur eine Hälfte des Mars getroffen hätte.

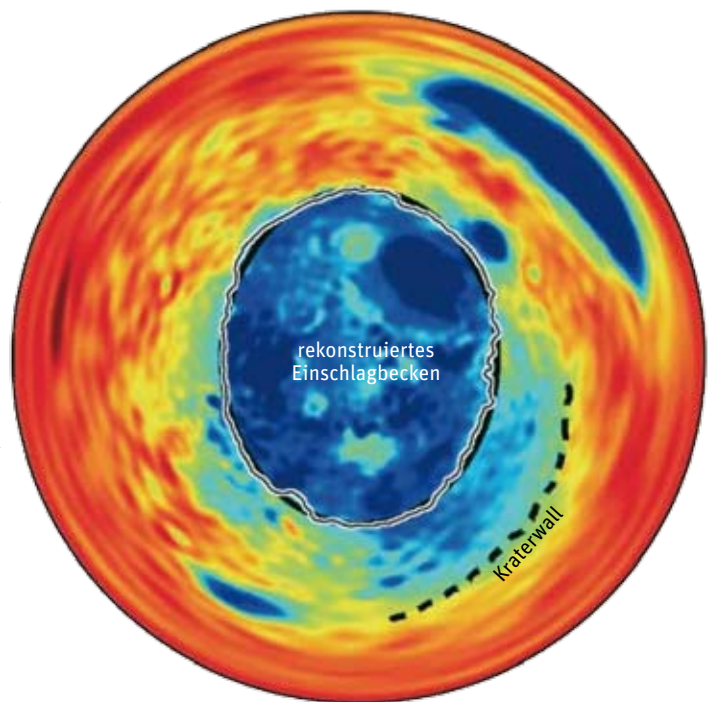
Möglich wäre auch, dass sich die Form des Beckens nachträglich verändert hat. Allerdings galt die Tiefebene lange als nach geologischen Maßstäben junge Struktur, der kaum Zeit für Formänderungen blieb. Dafür sprach das weit gehende Fehlen von Meteoritenkratern, die den Hochländern des Mars oder anderen

Himmelskörpern wie dem Erdmond ein zernarbes Aussehen verleihen. Ihre Zahl und Dichte ist ein guter Indikator für das Alter einer Planetenoberfläche, wenn sie durch Erosion kaum verändert wurde.

Im Jahr 2006 jedoch zeigten Messungen mit dem Bodenradar der Raumsonde Mars Express, dass die Tiefebene fast ebenso viele Kraternarben wie das Hochland hat; nur sind diese – aus welchen Gründen auch immer – unter der Oberfläche verborgen und auf Satellitenbildern daher unsichtbar. Das Borealisbecken ist also kaum jünger als der Rest des Marsbodens; es entstand bereits vor rund vier Milliarden Jahren, als der Rote Planet seiner Kinderstube noch nicht entwachsen war.



LINKS: NASA; RECHTS: MIT, JEFFREY ANDREWS-HANNA UND MARIA ZUBER, NASA, JPL, BRUCE BANERDT





Bei einem so hohen Alter kann man nicht erwarten, dass die Senke die gleiche Form hat wie zum Zeitpunkt ihrer Entstehung. In vier Milliarden Jahren ist viel passiert: Starker Vulkanismus während der Noachischen Epoche, also vor etwa 4,3 bis 3,5 Milliarden Jahren, überprägte das Antlitz des Planeten und begrub die

Diese Höhenkarte eines Ausschnitts vom Mars (links), die auf Messungen des Laser-Altimeters MOLA an Bord der Sonde Mars Global Surveyor beruht, verdeutlicht den krassen Unterschied zwischen dem Borealisbecken auf der Nordhalbkugel des Planeten und dem südlichen Hochland. Forscher haben nun die ursprüngliche Form dieser riesigen Senke rekonstruiert und als Kreisprojektion der gesamten Oberfläche dargestellt (rechts). Dabei erscheint die Tiefebene als elliptisches Einschlagbecken. Die durchgezogene schwarze Linie markiert den ursprünglichen Kraterrand, die gestrichelte einen zusätzlichen äußeren Wall. Die topografische Höhe der dargestellten Regionen nimmt von blau über gelb nach rot zu.

Grenze zwischen Hoch- und Tiefland an manchen Stellen unter bis zu 30 Kilometer hohen Basaltbergen. Damit ließe sich erklären, dass ein einstmaliges rundes Becken heute eine unregelmäßige Form hat.

Mit dieser Idee im Hinterkopf versuchten kürzlich Jeffrey C. Andrews-Hanna vom Massachusetts Institute of Technology in Cambridge und seine Kollegen, den Einfluss des Vulkanismus auf die Krustendicke zu bestimmen und die ursprüngliche Form des Beckens zu rekonstruieren. Indem sie die Topografie des Mars mit seinem Gravitationsfeld verglichen, gelang es ihnen tatsächlich, die verborgene Grenzlinie aufzuspüren. Das ursprüngliche Becken maß demnach 10 600 mal 8500 Kilometer. Es war also rund, aber nicht kreisförmig, sondern elliptisch.

Rekonstruktion einer Katastrophe

Das ist ungewöhnlich für einen Einschlagkrater. Die meisten Impaktstrukturen im Sonnensystem haben Kreisform – im Einklang mit den Ergebnissen gängiger Computersimulationen, wonach nur bei sehr flachem Einschlagwinkel ovale Krater entstehen. Diese Modellierungen erweisen sich jedoch in diesem Fall als unbrauchbar; denn sie gehen allesamt von einem kleinen Projektil aus, für das sich die Planetenoberfläche als eine plane

So könnte der Einschlag eines gigantischen Asteroiden ausgesehen haben, der die Zerteilung der Marsoberfläche erklären würde. Die Illustration beruht auf dem Ergebnis von dreidimensionalen Computersimulationen des Ereignisses.

Ebene darstellt. Das Borealis-Einschlagbecken auf dem Mars, wenn es denn ein solches ist, wäre aber die größte bekannte Impaktstruktur im Sonnensystem, viel gewaltiger als die größten vergleichbaren Meteoritenkrater – schließlich macht es mehr als ein Drittel der gesamten Marsoberfläche aus. Bei solchen Dimensionen spielt die Kugelform des Planeten eine wichtige Rolle; sie bewirkt etwa, dass auch bei steilem Auftreffwinkel ein elliptischer Krater entstehen kann.

Um die Dynamik eines Einschlags von planetaren Ausmaßen verstehen zu können, waren also neue Computermodelle nötig, welche die gekrümmte Planetenoberfläche berücksichtigen. Margarita M. Marinova vom California Institute of Technology in Pasadena und ihre Mitarbeiter führten solche Berechnungen durch. Dabei stellte sich heraus, dass ein Einschlagkrater von der Größe und Form des Borealisbeckens von einem 1600 bis 2700 Kilometer großen Asteroiden verursacht werden kann, der mit einer Geschwindigkeit von 6 bis 10 Kilometern in der Sekunde und unter einem Winkel von 30 bis 60 Grad zur Oberfläche auf den Mars trifft. Das Geschoss wäre demnach fast ein Drittel so groß wie der Mars selbst gewesen, dessen Durchmesser 6780 Kilometer beträgt. Ein solch dramatisches Ereignis ist für das frühe Sonnensystem durchaus vorstellbar.

Die Qualität von Marinovas Simulationen leidet allerdings darunter, dass die räumliche Auflösung wegen der begrenzten Rechenkapazität nur 118 Kilometer betrug – mehr als doppelt so viel wie die angenommene Dicke der Marskruste. Die Ergebnisse darüber, wie viel Materie beim Einschlag ausgeworfen wird und welche Form der Krater letztlich annimmt, sind deshalb sehr ungenau.

Aus diesem Grund haben Francis Nimmo von der University of California in Santa Cruz und seine Kollegen in einer weiteren Untersuchung ein vereinfachtes, zweidimensionales Modell verwendet, das eine weit bessere Auflösung von 25 Kilo-

Dieser Querschnitt durch den Mars fünf Minuten nach dem Einschlag eines riesigen Asteroiden beruht auf einer vereinfachten, zweidimensionalen Computersimulation des Ereignisses mit relativ hoher Auflösung. Teile der Marskruste (orangefarbene Punkte) werden ins All geschleudert, während eine Stoßwelle bis zum geschmolzenen Kern des Planeten vordringt.

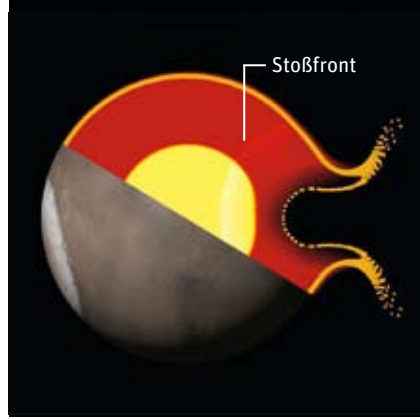


ILLUSTRATION: FRANCES NIMMO, USGS

metern erreicht. Da sie sich auf vertikale Einschläge beschränkten, unterscheiden sich ihre Resultate in Details von denen der Gruppe um Marinova – etwa in der beim Einschlag freigesetzten Energie. Im Endergebnis sind sich die beiden Teams jedoch einig: Das von Andrews-Hanna rekonstruierte Becken lässt sich durch den Aufprall eines großen Asteroiden überzeugend erklären.

Aber hat es sich tatsächlich so abgespielt? Den Beweis dafür bleiben die Simulationen schuldig. Immerhin liefern sie Hinweise zur Prüfung der Einschlaghypothese. So müsste sich die Kruste der Tiefebene in ihrer chemischen Zusammensetzung deutlich von der des Hochlands unterscheiden. Ferner könnten zukünftige Landemissionen seismologische Untersuchungen durchführen, die Aufschluss über die innere Struktur des Untergrunds im Borealisbecken und seiner Grenzregion geben. Daran ließe sich erkennen, ob die Schichten so zertrümmert

sind, wie das bei einem derart gewaltigen Einschlag zu erwarten ist. Parallel dazu könnten neue Marsrover durch die Untersuchung des Tiefland-Grundgesteins feststellen, ob es sich wirklich um die erstarrte Schmelzkruste eines vier Milliarden Jahre alten Impaktkraters handelt.

Ein riesiger Ozean?


Selbst wenn sich bestätigt, dass die Mars-Dichotomie von einem gigantischen Einschlag herrührt, bleiben allerdings Fragen offen. Anschließend war der gesamte Planet noch lange Zeit einem stetigen Bombardement aus dem All ausgesetzt. Wie und wodurch wurden die späteren Meteoritenkrater des Tieflands begraben? Warum sind sie im Hochland intakt geblieben? Irgendetwas muss in der späteren Marsgeschichte dafür gesorgt haben, dass die Entwicklung der beiden Hälften weiter unterschiedlich verlief. War es ein Ozean, der das Borealisbecken füllte, wobei er die Krater zum

Teil erodierte und zum Teil unter Ablagerungen begrub?

Zu dieser Vorstellung passt die Entdeckung, dass Wasser auf dem frühen Mars offenbar weit verbreiteter war als bisher angenommen. Erst vor Kurzem wiesen John Mustard von der Brown University in Providence (Rhode Island) und Kollegen mit Hilfe des CRISM-Spektrometers an Bord der Sonde Mars Reconnaissance Orbiter nach, dass hydratisierte Schichtsilikate über einen großen Teil des Planeten verteilt sind. Sie müssen durch das Einwirken großer Wassermengen über einen langen Zeitraum entstanden sein. Während der Noachischen Periode, als die Vulkane die Marsoberfläche umgestalteten, war Wasser auf dem Roten Planeten demnach so gut wie allgegenwärtig. Demnach könnte es auch – flüssig oder gefroren – die gesamte Tiefebene bedeckt und die Spuren des Meteoritenbombardements verwischt haben.

Auch die neuen Ergebnisse schließen nicht aus, dass die Hemisphären-Dichotomie doch interne Ursachen hat – etwa Vorgänge, die der Plattentektonik auf der Erde ähneln. Obwohl sich die Hinweise auf einen gigantischen Einschlag verdichten haben, ist das Rätsel der unruhigen Vergangenheit unseres roten Nachbarn noch keineswegs endgültig gelöst.

Jan Hattenbach ist freier Wissenschaftsjournalist in Aachen.

TECHNIK  Diesen Artikel können Sie als Audiodatei beziehen; siehe www.spektrum.de/audio

Laserblitze im Rekordtakt

In Konstanz wurde der weltweit schnellste Ultrakurzpulslaser gebaut. Er eröffnet der Präzision von Frequenzmessungen neue Dimensionen. Dadurch erhöht er auch die Chancen zum Aufspüren ferner erdähnlicher Planeten.

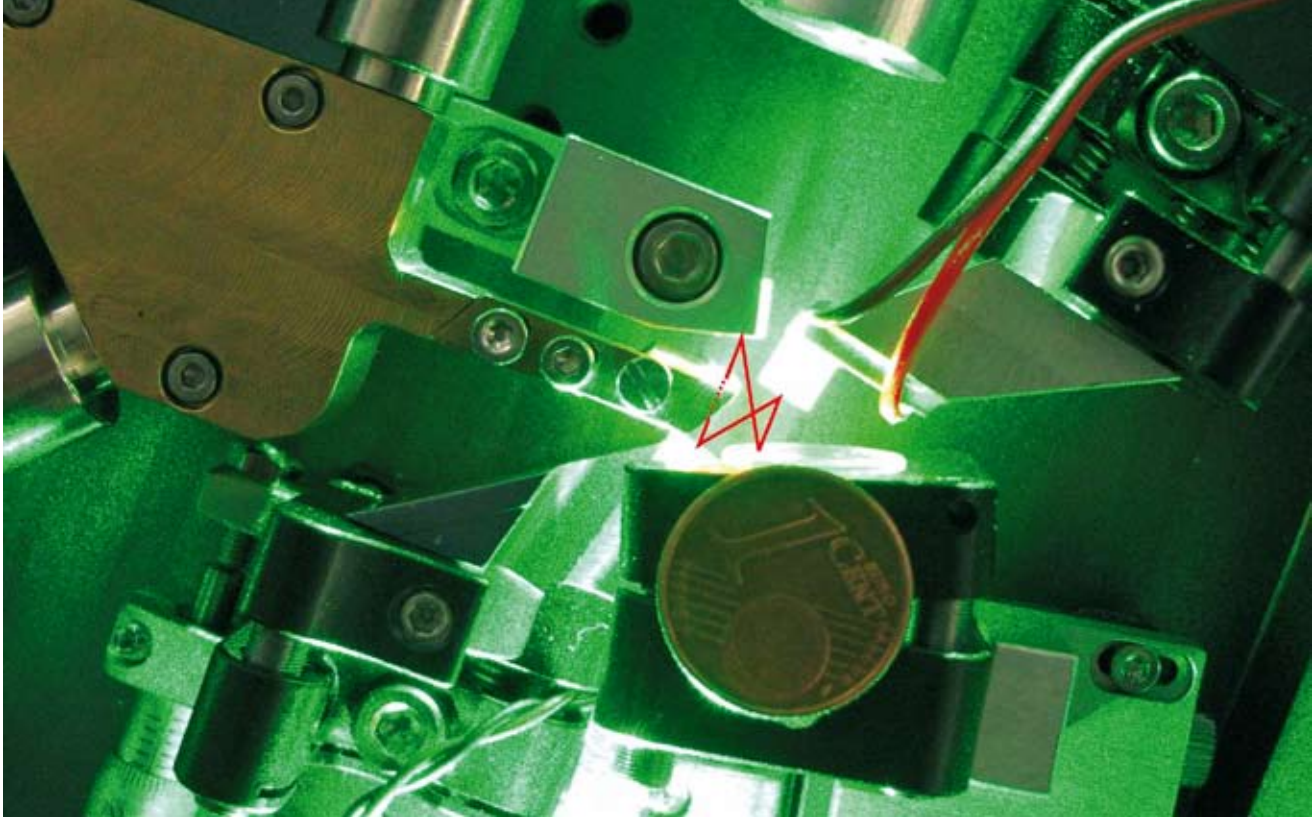
Von Albrecht Bartels und Dirk Heinecke

Zehn Milliarden Lichtblitze pro Sekunde sendet ein Laser aus, den wir am Centrum für Angewandte Photonik der Universität Konstanz und bei der ebenfalls am Bodensee ansässigen Firma Gigaoptics gemeinsam konstruiert haben. Diese Pulsrate von zehn Gigahertz ist Weltrekord: Sie übertrifft die bisherigen Höchstwerte um ein bis zwei Größenordnungen. Jeder einzelne Licht-

puls blitzt dabei nur für die unvorstellbar kurze Zeit von 42 Femtosekunden (0,000 000 000 000 042 Sekunden) auf, weshalb man auch von einem Femtosekundenlaser spricht. In dieser Zeit legt Licht gerade einmal eine Strecke zurück, die dem Durchmesser eines menschlichen Haares entspricht.

Damit sich solch kurze Strahlungspulse bilden, müssen zwischen den Spiegeln des Lasers – im so genannten Resonator – Tausende von stehenden

elektromagnetischen Wellen synchron schwingen. Für sie gilt die Bedingung, dass die Strecke für ihren Hin- und Rückweg exakt einem Vielfachen ihrer Wellenlänge entspricht. Tatsächlich verhält sich unser Femtosekundenlaser dadurch wie ein Ensemble aus Tausenden von Einzellasern, auch Moden genannt, mit exakt definierten und eng benachbarten Frequenzen konstanten Abstands. Die von ihm ausgesandte Strahlung wird daher als Frequenzkamm bezeichnet.



ALLE ABBILDUNGEN DIESES BEITRAGS: ALBRECHT BARTELS UND DIRK HEINECKE

net. Für die Nutzung solcher Frequenzkämme zur hochpräzisen Vermessung von Lichtwellen erhielten der deutsche Physiker Theodor Hänsch und sein US-Kollege John Hall 2005 den Physik-Nobelpreis (Spektrum der Wissenschaft 12/2005, S. 20).

Die Rekordpulsrate erreichten wir im Wesentlichen durch Verkürzung des Spiegelabstands. Das macht unseren Laser auch zum kleinsten jemals gebauten seiner Art. Sein Resonator ist nicht größer als ein Cent-Stück.

Unser Rezept zur Erhöhung der Pulsrate – Verkürzung des Spiegelabstands – klingt naheliegend und im Grund recht einfach. Seine praktische Umsetzung aber wirft erhebliche Probleme auf. Die Hauptschwierigkeit ist, dass sich durch die große Zahl der Lichtblitze pro Zeiteinheit die auf jeden einzelnen entfallende Leistung, das heißt seine Intensi-

tät, dramatisch verringert: Die Pulse werden zu schwach. Die Kunst lag also darin, diese Leistungseinbußen auszugleichen. Das gelang uns, indem wir das Lasermedium (einen üblichen titandotierten Saphir) und die Brennweite der Spiegel sowie ihre Beschichtung (von der ihr Reflexionsvermögen abhängt) optimal aufeinander abstimmten.

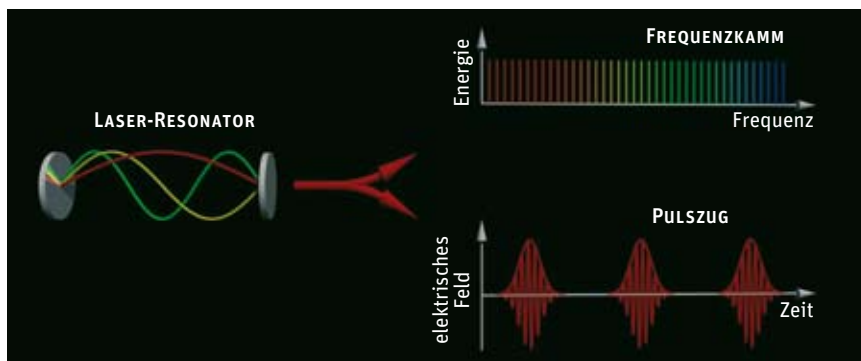
Unser neuer ultraschneller Laser hat vielfältige Einsatzmöglichkeiten überall da, wo es auf die extrem genaue Messung von Frequenzen ankommt – so bei der Spektroskopie von atomaren Übergängen, beim Testen der Invarianz von Naturkonstanten oder bei der Entwicklung neuer, »optischer« Atomuhren.

Eine der interessantesten denkbaren Anwendungen ist sicherlich die Kalibrierung von astronomischen Spektrografen, die zur Suche nach extrasolaren Planeten dienen. Da solche Himmelskörper – im

Im Innern des neuen Ultrakurzpulslasers befindet sich ein Ringresonator mit vier Spiegeln. Der Lichtweg ist rot angedeutet.

Gegensatz zu Sternen – selbst kein Licht aussenden, sind sie nicht direkt beobachtbar. Deshalb greifen Astronomen auf verschiedene indirekte Suchmethoden zurück.

Eine davon bedient sich der Wirkung eines Planeten auf das Spektrum des Lichts, das uns von seinem Zentralgestirn erreicht. Beide Objekte rotieren nämlich gemäß Newtons Gravitationsgesetz um einen gemeinsamen Schwerpunkt. Der befindet sich wegen des extremen Massenunterschieds zwar meist innerhalb des Sterns, fällt aber nicht mit dessen Mittelpunkt zusammen. Dadurch vollführt auch das Zentralgestirn eine schwache Rotationsbewegung, bei der es



Im Resonator eines Femtosekundenlasers oszillieren Tausende von stehenden Wellen synchron. Die ersten drei Grundschwingungen sind hier schematisch dargestellt (links). Die vielen Einzelwellen erzeugen durch Überlagerung einen Zug gepulster Strahlung (rechts unten), während ihre Frequenzen eine regelmäßige Kammstruktur bilden (rechts oben).

ALS ABONNENT HABEN SIE VIELE VORTEILE!



1. Sie sparen gegenüber dem Einzelkauf und zahlen pro Heft nur € 6,60 statt € 7,40. Als Schüler, Student oder Azubi zahlen Sie sogar nur € 5,55.
2. Sie haben online freien Zugang zu allen Spektrum-Ausgaben seit 1993 mit derzeit über 6000 Artikeln.
3. Unter www.spektrum-plus.de finden Sie jeden Monat einen kostenlosen Zusatzartikel, der nicht im Heft erscheint.
4. Sie erhalten für Ihre Bestellung ein Dankeschön Ihrer Wahl.
5. Sie können die Online-Wissenschaftszeitung »spektrumdirekt« günstiger beziehen.
6. Unter www.spektrum-plus.de finden Sie unser Produkt des Monats, das Sie als Abonnent mit Preisvorteil bestellen können, sowie den Spektrum-Mitgliederausweis mit zahlreichen Vergünstigungen.



Zum Bestellen einfach nebenstehende Karte ausfüllen und abschicken oder

per Telefon: 06221 9126-743

per Fax: 06221 9126-751

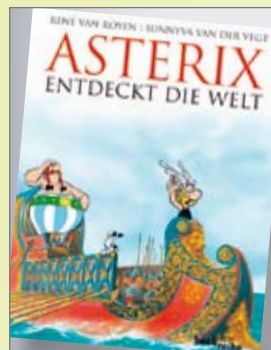
per E-Mail: service@spektrum.com

oder per Internet:

www.spektrum.de/abo

ABONNIEREN ODER VERSCHENKEN

Wenn Sie **Spektrum der Wissenschaft** selbst abonnieren oder verschenken, bedanken wir uns bei Ihnen mit einem Präsent. Wenn Sie ein Geschenkabonno bestellen, verschicken wir das erste Heft zusammen mit einer Grußkarte in Ihrem Namen.



Im Buch »Asterix entdeckt die Welt« zeigen zwei Historiker der Universität Amsterdam auf augenzwinkernde Weise, wie viel historisches Wissen in der beliebten Comiereihe verborgen ist.

LESER WERBEN LESER

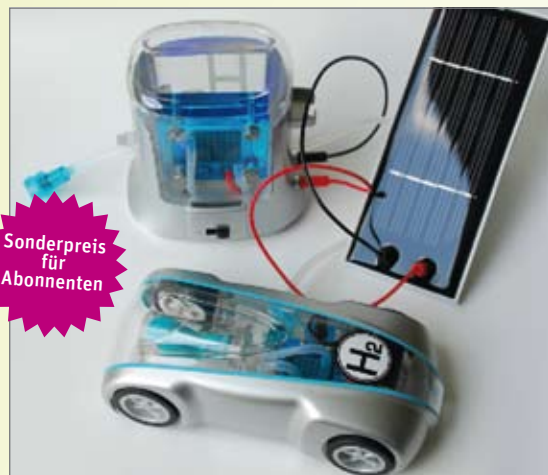
Sie haben uns einen neuen Abonnenten vermittelt? Dann haben Sie sich eine Dankeschön verdient!

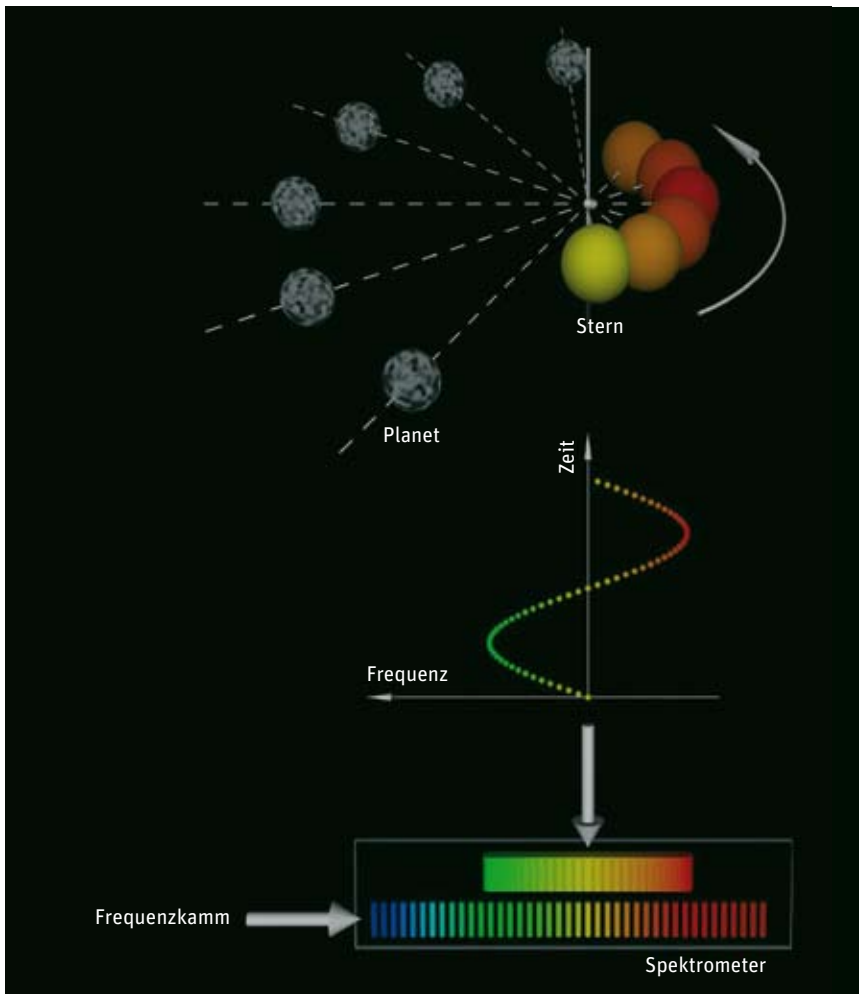
Lamy-Set »Dankeschön«

Die stilvollste Art, »Dankeschön« zu sagen: mit zehn kunstvoll kalligrafierten Büttenkarten und Umschlägen sowie einem Lamy-Schönschreibfüller



PRODUKT DES MONATS





Ein Planet (dunkel) und der zugehörige Stern (hell) rotieren um ihren gemeinsamen Schwerpunkt. Auch der Stern bewegt sich daher periodisch von einem Beobachter weg oder auf ihn zu, was zu einer Rot- beziehungsweise Blauverschiebung des von ihm emittierten Lichts führt. Um sie zu entdecken, überlagert man die vom Teleskop aufgefangene Strahlung im Spektrometer mit einem Frequenzkamm-Lineal und vergleicht beide miteinander.

Standards and Technology der USA (NIST) in Boulder (Colorado) die verwendeten Frequenzkämme mit aufwändigen und unökonomischen Filtermethoden so ausgedünnt werden, dass nur noch jeder zehnte bis zwanzigste »Zinken« übrig war. Der Rest blieb ungenutzt.

Unser neuer Laser bringt hier einen echten Durchbruch; denn sein Frequenzkamm ist wegen der hohen Pulsrate viel weniger dicht. Damit entfällt der Filterschritt: Alle Zinken lassen sich nutzen und haben zugleich eine zeh- bis hundertmal höhere Intensität, was sich positiv auf die Messgeschwindigkeit und -präzision auswirkt.

Im Rahmen einer Kooperation mit dem NIST wollen wir nun untersuchen, ob und wie sich das neue Gerät tatsächlich zum Aufspüren kleiner extrasolarer Planeten eignet. Scott Diddams, Forschungsgruppenleiter am NIST, ist zuversichtlich und nennt auch den Grund: »Der Konstanzer Laser besticht insbesondere durch seine einfache Konstruktion und Kompaktheit. Dabei ist er in der Lage, einen präzisen Frequenzkamm mit einem Leistungsniveau zu erzeugen, das durch keine andere Technologie erreicht wird.«

Selbst wenn die Kalibrierung wie gewünscht funktioniert, bedarf es allerdings weiterer technischer Fortschritte, bis die Methode wirklich funktioniert. Insbesondere muss die Auflösung der Spektrografen noch verbessert werden. Dennoch stehen die Chancen nicht schlecht, dass die Entdeckung der ersten fernen Schwester der Erde anhand von Dopplermessungen nicht mehr lange auf sich warten lässt. Sie wäre jedenfalls eine echte Sensation.

Albrecht Bartels und **Dirk Heinecke** forschen am Centrum für Angewandte Photonik der Universität Konstanz. Bartels ist zugleich Geschäftsführer der Gigaoptics GmbH.

periodisch hin und her sowie auf einen Beobachter zu- und von ihm wegläuft. Synchron dazu wechselt auf Grund des Dopplereffekts das emittierte Licht seine Farbe. An dieser Frequenzänderung lässt sich nicht nur die Gegenwart eines Planeten erkennen; sie ermöglicht auch Rückschlüsse auf seine Masse, Bahn und Umlaufdauer.


Suche nach einer zweiten Erde

Um derartige Änderungen zu ermitteln, fangen Astronomen das Sternenlicht mit einem Teleskop ein und vergleichen es mit dem Spektrum einer Gaslampe mit Emissionslinien genau bekannter Frequenz. Solche Lampen sind allerdings in ihrer Variationsbreite und Präzision begrenzt. Bislang ließen sich mit dieser Methode deshalb nur Planeten mit einem Vielfachen der Erdmasse entdecken.

Frequenzkämme auf der Basis von Femtosekundenlasern ermöglichen eine sehr viel präzisere Kalibrierung der Spektrografen und könnten so helfen, künftig auch Planeten von der Größenordnung

der Erde aufzuspüren. Diese vergleichsweise kleinen Körper verursachen an ihrem Stern nämlich nur Geschwindigkeitsänderungen von wenigen Zentimetern pro Sekunde, was einer relativen Verschiebung der Lichtwellenlänge um zehn Billionstel (10^{-11}) entspricht und die bisher mögliche Messgenauigkeit bei Weitem übersteigt.

Ein Frequenzkamm lässt sich mit einem Lineal vergleichen, bei dem jeder Teilstrich einer der genannten Moden entspricht. Diese Teilstriche haben die enorme Genauigkeit einer Atomuhr. Allerdings war es bislang nicht möglich, ein solches Frequenzkamm-Lineal direkt abzulesen. Die Teilstriche lagen, da ihr Abstand durch die Pulsrate des Femtosekundenlasers gegeben ist, zu dicht beisammen, um sich getrennt voneinander wahrnehmen zu lassen. Daher mussten in jüngsten Experimenten zur Kalibrierung astronomischer Spektrografen an der Harvard University und dem Massachusetts Institute of Technology, beide in Cambridge, sowie dem National Institute of

ÖKOLOGIE  Diesen Artikel können Sie als Audiodatei beziehen; siehe www.spektrum.de/audio

Die Stunde der Schmarotzer

Nach Untersuchungen von US-Forschern haben Parasiten einen deutlich größeren Anteil an der Stoffbilanz von marinen Ökosystemen als vermutet. So entspricht ihre Biomasse derjenigen aller Wirbeltiere ihres Lebensraums.

Von Lars Fischer

Die berühmteste Paarbeziehung der Ökologie – die zwischen Räuber und Beute – ist in Wirklichkeit eine *Ménage à trois*. Während die einen fressen und die anderen gefressen werden, wirkt eine dritte Gruppe im Verborgenen: Parasiten zweigen Energie von ihren Wirten ab und nutzen sie für eigene Zwecke. Den ausgebeuteten Tieren kann dadurch erheblicher Schaden entstehen, was teils sogar ihre Evolution beeinflusst. So gilt es als wahrscheinlich, dass die weite Verbreitung der sexuellen Fortpflanzung unter anderem auf dem Selektionsdruck durch Schmarotzer beruht.

Welches Gewicht Parasiten in den Stoff- und Energiebilanzen ganzer Ökosysteme haben, ist angesichts ihrer komplexen Lebenszyklen und ihrer engen Beziehungen mit den Wirtsarten allerdings nicht leicht zu quantifizieren. »Parasiten sind im Nahrungsnetz schwierig einzuordnen«, erklärt der Biologe Harald Asmus vom Alfred-Wegener-Institut für Polar- und Meeresforschung, der auf Sylt die Nahrungsnetze mariner Ökosysteme erforscht. »Als Beteiligte am Energieaus-

Bei von Trematoden befallenen Meeres-schnecken der Art *Cerithidea californica* machen die Schmarotzer bis zu 40 Prozent der Körpermasse aus. Hier ist ein infiziertes Tier (links) einem parasitenfreien (rechts) gegenübergestellt. Die Schale wurde entfernt.

halt ihrer Wirtsart sind sie in deren Stoffflüssen schon zum Teil enthalten.« Weil die allermeisten Schmarotzer zudem um mehrere Größenordnungen kleiner sind als ihre Wirte, wird ihre Biomasse bei den Bilanzierungen gewöhnlich vernachlässigt.

Nun haben genaue Untersuchungen in einem Ökosystem jedoch ergeben, dass Parasiten unter Umständen einen unerwartet hohen Anteil der tierischen Biomasse ausmachen können (Nature, Bd. 454, S. 515). In einem fünf Jahre andauernden Zensus an drei Flussmündungen im mexikanischen Bundesstaat Baja California und an der kalifornischen Pazifikküste hat ein Team um den Biologen Armand M. Kuris von der University of California in Santa Barbara Daten über Häufigkeit und Biomasse von insgesamt 199 frei lebenden Arten und ihren Schmarotzern gesammelt. An den 69 Untersuchungsstellen bringen die Parasiten demnach, auf die Fläche bezogen, so viel auf die Waage wie alle Wirbeltiere ihres Lebensraums zusammengenommen.

Den größten Anteil stellen dabei die Kastratoren: wenige Millimeter lange Saugwürmer (Trematoden), die ihren Wirten die Fortpflanzungsfähigkeit rauben. Diese werden dadurch zu bloßen Fabriken für Trematodenlarven oder Zerkarien, wie sie auch heißen. Bei einigen Wirtsarten sind mehr als die Hälfte der Tiere befallen.

Als Paradebeispiel kann *Cerithidea californica* gelten. Diese Schnecke ist die häufigste Tierart im untersuchten Gebiet

und Opfer 18 verschiedener Spezies von Saugwürmern. Praktisch alle ausgewachsenen Exemplare sind infiziert, und die Parasiten machen im Schnitt 22 Prozent ihrer Körpermasse aus. Die befallenen Tiere scheiden solche Mengen an Zerkarien aus, dass deren Masse das Gesamtgewicht der Vögel im Untersuchungsgebiet, die dort an der Spitze der Nahrungskette stehen, um das Drei- bis Neunfache übertrifft. Die Biomasse sämtlicher Parasiten in den Ästuaren entsprach drei bis 13 Prozent derjenigen aller Räuber, die von den gleichen Beutetieren leben.

Vorteil für Einwanderer

Für Juliane Filser vom Zentrum für Umweltforschung und nachhaltige Technologien der Universität Bremen ist das Ergebnis der Untersuchung allerdings nur auf den ersten Blick erstaunlich. Bei genauerer Betrachtung könne es nicht wirklich überraschen. Zwar sind Parasiten, so ihre Begründung, im Vergleich zu anderen Gliedern der Nahrungskette praktisch unsichtbar. Dennoch reicht ihr Einfluss weit über einzelne Arten hinaus und wirkt gestaltend auf ganze Ökosysteme.

So könnte die Macht der Schmarotzer etwa die Ausbreitung invasiver Arten begünstigen. Schon 2003 stellten US-Forscher bei Untersuchungen an 26 Spezies aus sieben Tierklassen fest, dass neu eingewanderte Gruppen, die so genannten Neozoen, im Schnitt nur halb so viele Parasitenarten trugen. Außerdem war der Anteil der befallenen Tiere an der Popula-



TODD C. HUSPEN, UNIVERSITY OF WISCONSIN, STEVENS POINT (UWSP)

tion geringer als bei einheimischen Arten. »Parasit und Wirt machen ja eine Koevolution durch«, erklärt Filser. »Wenn eine Spezies in ein neues Ökosystem einwandert, trifft sie dort auf weniger an sie angepasste Parasiten, und das kann dazu führen, dass sie sich sehr stark ausbreitet.«

Doch vielleicht sind die von den US-Wissenschaftlern untersuchten Ökosysteme auch gar nicht repräsentativ. Asmus hält es für möglich, dass die extreme Verbreitung von Parasiten in diesem Fall nur die Folge einer sehr hohen Schadstoffbelastung ist, wegen der die Abwehrmechanismen der Organismen nur unzureichend funktionieren. Im Sylter Wattenmeer, das kaum unter Umweltverschmutzung leidet, dürfte nach seiner Ansicht der Anteil der Parasiten an der Biomasse deutlich geringer sein. »In den stärker belasteten Ästuaren von Elbe und Weser oder vor der hochgradig industrialisierten holländischen Küste kann das wieder ganz anders aussehen«, glaubt er. Für quantitative Vergleiche, die derartige Vermutungen erhärten oder widerlegen könnten, reichen die vorhandenen Daten allerdings nicht aus.

Ein Schwachpunkt der US-Untersuchung ist auch, dass die Forscher statt der Trockenmasse das Frischgewicht der untersuchten Arten verglichen haben. Weil der Wassergehalt zwischen einzelnen Tiergruppen stark schwanken kann – bei Vögeln ist er zum Beispiel wesentlich geringer als bei Fadenwürmern –, lassen sich die Zahlen nur bedingt miteinander vergleichen. Asmus meint deshalb: »Qualitativ sind die Ergebnisse der Studie sicherlich zutreffend, aber die genauen Relationen könnten sich noch um den Faktor zwei oder drei verschieben.«

So wirft die Untersuchung von Kuris und seinen Kollegen nur ein erstes Schlaglicht auf einen Sachverhalt, dem Biologen in der Vergangenheit zu wenig Beachtung schenken. Sie belegt, dass Parasiten im Stoff- und Energiehaushalt ganzer Ökosysteme eine überraschend große Rolle spielen können. Ihre tatsächliche Bedeutung in den verschiedensten Lebensgemeinschaften lässt sich daraus aber nicht abschätzen. Dazu bedarf es weiterer gründlicher Studien. Nicht nur beim Menschen ist eine Menage à trois eine komplizierte, schwer durchschaubare Angelegenheit.

Lars Fischer ist freier Wissenschaftsjournalist in Hamburg.

NERVENKONTAKTE 🎧 Diesen Artikel können Sie als Audiodatei beziehen; siehe www.spektrum.de/audio

Verbindung auf Probe

Nach neuen Erkenntnissen verhalten sich Nervenzellen erstaunlich ökonomisch. Bevor sie sich fest verschalten, stellen sie erst probeweise eine lose Verbindung her. Nur bei genügend hohem Informationsfluss wird daraus ein dauerhafter Kontakt.

Von Andreas Baumann

Unser Gehirn ist eine Dauerbaustelle. Jeden Tag werden dort Millionen neue Verbindungen aufgebaut und alte wieder abgeschafft. Die Rede ist von den Synapsen: Schaltstellen, an denen ein elektrisches Signal in chemischer Form zwischen zwei Nervenzellen übertragen wird. Jedes der etwa 100 Milliarden Neurone in unserem Gehirn ist über solche Kontakte mit vielen – bis zu einigen tausend – anderen verbunden.

Dieses Informationsnetz unterliegt je nach den Anforderungen einem ständigen Umbau. Kommt eine Synapse zu selten zum Einsatz, wird sie als unnötig eingestuft und abgebaut. Doch nicht erst im Nachhinein funktioniert diese strenge Auslese. Wie Christian Lohmann und Tobias Bonhoeffer vom Max-Planck-Institut für Neurobiologie in Planegg-Martinsried jetzt herausgefunden haben, existiert ein Selektionsverfahren, mit dem Nervenzellen vor dem Zustandekommen einer Synapse bereits überprüfen können, ob diese auch sinnvoll wäre. Fällt der Test negativ aus, wird sie erst gar nicht gebildet (Neuron, Bd. 59, S. 253).

Suche nach dem richtigen Partner

Diese Überprüfungen beginnen schon sehr früh: Das Netz aus synaptischen Verbindungen zwischen den Nervenzellen entsteht während der Entwicklung des Gehirns im Embryo und bis in die späte Kindheit hinein. Dabei müssen die jungen Neurone unter einer Vielzahl von potenziellen Verknüpfungspartnern die richtigen finden. Wie gelingt ihnen das?

Vom Zellkörper eines Neurons, dem so genannten Soma, gehen sehr viele kurze, verästelte Fortsätze aus. Diese so genannten Dendriten tragen jeweils zahlreiche kleine Ausstülpungen namens Filopodien. Außerdem entspringt am Zellkörper ein dünnerer, langer Fortsatz, der bei menschlichen Nervenzellen bis zu ei-

nen Meter lang werden kann und Axon heißt. Er spaltet sich erst an seinem Ende in viele kleine Verzweigungen auf: die Axonendköpfe. Diese treten mit den Filopodien auf den Dendriten anderer Zellen in Kontakt und bilden so die Synapsen. Beide verschmelzen dabei nicht miteinander, sondern bleiben durch einen schmalen Spalt getrennt.

Beim Reizen einer Nervenzelle entsteht an deren Außenmembran ein elektrisches Potenzial, das am Axon entlangläuft. An dessen Ende bewirkt es dann die Ausschüttung von Neurotransmittern. Diese chemischen Botenstoffe überqueren den synaptischen Spalt und heften sich an passende Rezeptoren auf der

Anzeige



FORTIS
B-42 BLACK

Chronograph Automatik, Titan, Karbon
Offizieller Ausrüster für Luft- & Raumfahrt
Erste Uhrenfabrik der Welt für automatische Armbanduhren
since 1912 swiss · www.fortis-watches.com

Springers Einwürfe

Kilometerlange Quantenobjekte

»Spukhafte Fernwirkung« über Riesendistanz

In der Quantenwelt geht es seltsamer zu, als nicht nur meine Schulweisheit sich träumen lässt. Sogar ein revolutionärer Kopf wie Einstein weigerte sich, die Quantentheorie für komplett zu halten; er meinte, dahinter müssten klassische Mechanismen stecken, und postulierte so genannte verborgene Parameter, um die »spukhafte Fernwirkung« zwischen zwei Komponenten eines Quantensystems zu erklären. Solche »verschränkten« Komponenten verhalten sich nämlich, als wären sie zwei Zauberwürfel, die zwar pro Wurf eine zufällige Augenzahl zeigen – aber beide dieselbe.

In der Frühzeit der Quantentheorie tröstete man sich damit, derlei Spuk sei bloß eine Spezialität der unanschaulichen Mikrowelt, zu der unser Alltagsverstand ohnehin keinen unmittelbaren Zugang hat. Doch in den letzten Jahren gelingen den Physikern experimentelle Kunststücke, welche die Grenze zwischen Mikro- und Makrokosmos immer mehr verwischen. Den jüngsten Coup landete jetzt eine Gruppe um Daniel Salart von der Universität Genf (Nature, Bd. 454, S. 861).

Die Forscher erzeugten in ihrem Labor zunächst eine Reihe mikroskopischer Quantenobjekte aus paarweise verschränkten Photonen – Lichtquanten – und vergrößerten jedes Paar immens, indem sie die Komponenten separat durch das öffentliche Glasfasernetz zu zwei kilometerweit entfernten Ortschaften leiteten. Dort wiesen Lichtdetektoren nach, dass die Photonenpaare auch über eine Entfernung von 18 Kilometer Luftlinie noch immer verschränkt waren: Die Quantenpartner verhielten sich streng korreliert, analog zu besagten Zauberwürfeln.

Ist etwas klassisch Physikalisches vorstellbar – eine Kraft, ein Feld –, das die Eigenschaften der Lichtquanten über eine so große Distanz hinweg aufeinander abstimmt? Das Schweizer Team rechnete aus, dass sich ein Signal, das zur Koordination dienen könnte, mit mindestens zehntausendfacher Lichtgeschwindigkeit ausbreiten müsste. Das steht in krassem Widerspruch zu dem Grundprinzip, wonach nichts schneller sein darf als das Licht.

Mit solchen Experimenten wird der Ausrede, die Quantenphysik sei zwar seltsam, treibe aber ihr Unwesen nur in der Mikrowelt, jeder Boden entzogen. Freilich war dieses Argument nie viel wert. Zum Beispiel: Dass Elektronen in Atomen unterschiedliche Energieniveaus besetzen, ist eine Folge des Ausschließungsprinzips von Wolfgang Pauli. Ohne dieses rein quantenmechanische Gesetz gäbe es keine chemischen Elemente, also keine Materie, wie wir sie kennen. Demnach ist unsere Alltagswelt das Produkt einer Quantenregel. Diese mathematische Vorschrift verbietet einfach, dass Elektronen – anders als Photonen – denselben Zustand einnehmen. Dafür gibt es ebenfalls keine klassische Erklärung, etwa durch eine abstoßende Kraft.

Und wenn wir schon dabei sind: So besonders anschaulich ist auch der klassische Kraftbegriff nicht. Weder Newtons augenblicklich über beliebige Entfernungen wirkende Schwerkraft noch Einsteins Gravitation als Krümmung der Raumzeit entsprechen unserer an Druck und Stoß geschulten Alltagsphysik. Und allen mechanischen Modellen des elektromagnetischen Felds – Stichwort Äther – entzog Einstein höchstpersönlich die Grundlage.

Letztlich müssen wir uns, denke ich, in der Physik mit rein mathematischen Beschreibungen zufriedengeben, deren technische Anwendungen uns für ihre Unanschaulichkeit reich entschädigen. Die Quantenverschränkung ist nur der bislang letzte Ruck, der unseren Verstand aus seinen gewohnten Bahnen wirft, wenn wir staunend begreifen, wie fremd uns die Wirklichkeit im Grunde ist.



Michael Springer

gegenüberliegenden Seite. Dort erzeugen sie wiederum ein Membranpotenzial, das bei ausreichender Intensität die Empfängerzelle ebenfalls feuern lässt.

Die Ausbildung einer Synapse verbraucht allerdings viel Energie und dauert bis zu zwei Tage. Das wäre eine Menge vergeblicher Mühe, sollte sich die Verknüpfung im Nachhinein als unnötig herausstellen und gleich wieder abgebaut werden. Lohmann und Bonhoeffer vermuteten deshalb schon länger, dass die Zellen zunächst über eine vorläufige Verbindung auf Probe miteinander kommunizieren können. Auf diese Weise wäre es möglich, vorab den voraussichtlichen Informationsfluss durch eine potenzielle Synapse zu ermitteln.

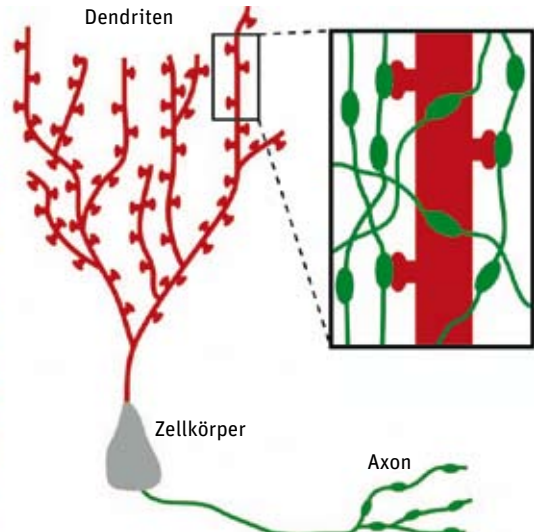
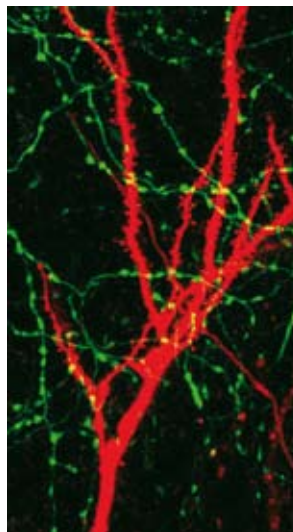
Kalzium vermittelt stabile Kontakte

Eine Schlüsselrolle bei diesem Prozess erwarteten die Forscher von den Filopodien. Sie sind während der Entwicklung synaptischer Verbindungen in großer Zahl vorhanden und zeichnen sich durch schnelles Wachstum und hohe Beweglichkeit aus. Innerhalb von Minuten oder gar Sekunden stülpen sie sich aus den Dendriten aus oder ziehen sich wieder zurück.

Um Klarheit zu gewinnen, behandelten die zwei Forscher einzelne Zellen von Mäusen und Ratten mit Fluoreszenzfarbstoffen und betrachteten sie unter dem Mikroskop. Dabei machten sie eine interessante Beobachtung: Trifft ein Filopodium auf ein Axon, entsteht eine kurzzeitige Verbindung. Manchmal entwickelt sich daraus eine Synapse, aber in vielen Fällen wird der Kontakt bald nach seinem Zustandekommen wieder gelöst. Außerdem konnten Lohmann und Bonhoeffer beobachten, wie Filopodien an dem Axon entlangwanderten und offenbar nach geeigneteren Stellen suchten.

Eingehende Untersuchungen enthüllten auch die zu Grunde liegenden elektrochemischen Vorgänge. Demnach steigt im Filopodium direkt nach der Kontaktaufnahme für ungefähr eine Sekunde die Konzentration an positiv geladenen Kalziumionen. Bei ihren Messungen fiel den Forschern auf, dass bei später stabilen Synapsen viele weitere solche Kalziumsignale in kurzen Abständen folgten. Blieben sie selten, war die Verbindung zwischen den beiden Nervenzellen dagegen mit großer Wahr-

Zwei Nervenzellen treten in Kontakt miteinander, indem ein Axonendkopf des einen Neurons und ein Filopodium auf einem Dendriten des anderen sich verbinden. Dieser Vorgang ist rechts schematisch gezeigt. Wie sich nun herausstellte, ist die Verbindung zunächst nur vorläufig. Erst wenn sie genügend Signale übermittelt, entsteht daraus eine dauerhafte Synapse. In der mikroskopischen Aufnahme links wurden die Axone grün und die Dendriten rot markiert.



CORETTE J. WIENERGA, MPI FÜR NEUROBIOLOGIE, MARTINSRIED

scheinlichkeit nicht von Dauer. Wie die Neurone von der Häufigkeit der Kalziumsignale auf die Qualität der späteren Verbindung rückschließen können, ist vorerst allerdings unklar.

In jedem Fall bestätigen die Beobachtungen der beiden Wissenschaftler, dass junge Neurone tatsächlich mit einem Kontrollmechanismus überprüfen, wie

sinnvoll die Ausbildung einer Synapse an einem bestimmten Punkt ist. Eine solche Vorauswahl scheint auch nötig. Das Gehirn ist ohnehin schon das Organ mit dem größten Energieverbrauch – bei nur etwa zwei Prozent der Körpermasse beansprucht es gut 15 Prozent des Ruheumsatzes. Ohne das genannte Screening wäre der Wert noch um einiges höher.

»Die Effizienz dieser Methode hat uns beide erstaunt«, berichtet Tobias Bonhoeffer. »So spart das Gehirn Zeit und Energie und sammelt gleichzeitig wichtige Informationen – sozusagen im Vorbeigehen.«

Andreas Baumann ist freier Journalist in Darmstadt.

MÜNCHNER WISSENSCHAFTSTAGE 18.-21. OKTOBER
im Jahr der Mathematik 2008



www.muenchner-wissenschaftstage.de
Zentraler Ort: Ludwig-Maximilians-Universität München
Vorträge und Kabarett, Marktstände und Workshops,
Filme und Führungen, für alle – kostenlos

Die 8. Münchner Wissenschaftstage vom 18.-21. Oktober 2008 greifen mit dem Titel „Mathematik – mitten im Leben“ das Anliegen des Wissenschaftsjahres 2008 auf, Verständnis und Begeisterung für die Mathematik und ihre vielfältigen Anwendungen zu wecken und zu fördern. Das Angebot richtet sich an Laien und an Fachleute, die über den Zaun ihres Fachgebietes blicken möchten, insbesondere aber an junge Menschen. Mathematisches, logisches Denken und Anwendungen in Naturwissenschaften, Medizin und Technik, in Kunst und Wirtschaft, in der Finanzwelt und Politik werden spannend und allgemeinverständlich dargeboten. Die Veranstaltungen – Vorträge und Diskussionen, Kabarett und Science Theater, Marktstände der Wissenschaft, Workshops und das Kinderprogramm – werden von Experten aus den Hochschulen, Forschungseinrichtungen und forschungsintensiven Unternehmen, von Pädagogen und Künstlern getragen.

Mathematik kennen viele Menschen nur aus der Schule und glauben, es handle sich dabei um Rechenregeln, die es zu erlernen und anzuwenden gelte. Mathematik ist mehr: Sie trägt wesentlich zum Verständnis der Welt bei, ist nützlich, faszinierend und lebendig und sie kann sehr wohl auch Spaß machen, wie die Münchner Wissenschaftstage zeigen.

Highlights sind die öffentliche, unterhaltsame Festveranstaltung mit Prominenz am Samstagabend mit musikalischen, historischen, zauberhaften und mathematischen Überraschungen, das Science Theater „Kalkül“ zum Prioritätenstreit von Leibniz und Newton am Sonntagabend und das musikalische Kabarett „Pisa Bach Pythagoras“ von Piano-Paul zur Bildungspolitik am Montagabend mit anschließender Podiumsdiskussion.