

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

Verschränkung zweier Spiegel

Zunehmend bemühen sich Forscher, die paradoxen Phänomene der Quantenwelt auch im Makrokosmos nachzuweisen. Nach neuesten Berechnungen sollten sich sogar zwei kilogrammschwere Spiegel derart miteinander verschränken lassen, dass sie eine quantenmechanische Einheit bilden.

Von Roman Schnabel

In der Welt der kleinsten Teilchen gelten ungewohnte, zum Teil paradoxe Regeln. So ist es möglich, dass Quantenobjekte gleichzeitig in zwei Zuständen existieren, die einander im Grunde ausschließen. Außerdem können sie derart miteinander verschränkt werden, dass sie sich trotz räumlicher Trennung wie ein zusammenhängendes Gebilde verhalten. Eine Manipulation an dem einen scheint dann die Eigenschaften seines beliebig weit entfernten Partners zu beeinflussen.

In unserer vertrauten Alltagswelt ist von solchen »spukhaften Fernwirkungen«, wie Einstein sie nannte, nichts zu spüren. Viele Physiker halten es jedoch für möglich, dass sich Quanteneffekte unter bestimmten Bedingungen auch im Makrokosmos beobachten und nachweisen lassen. Meine Kollegen und ich von der Universität Hannover und vom Max-Planck-Institut für Gravitations-

physik in Göltingen und Hannover haben nun ein Experiment zur Verschränkung von zwei kilogrammschweren Spiegeln vorgeschlagen, das unseren Berechnungen zufolge machbar sein sollte.

Das Besondere an verschränkten Objekten möchte ich an zwei fiktiven Würfeln deutlich machen. Beide sollen ungezinkt sein, also rein zufällige, nicht vorhersagbare Augenzahlen liefern. Zwei Personen nehmen nun jeweils einen davon und gehen in unterschiedliche Räume. Dort würfeln sie zu vereinbarten Zeiten, zum Beispiel alle fünf Sekunden, immer wieder und notieren die Augenzahl. Am Abend vergleichen sie dann ihre Notizen.

Wären die Würfel verschränkt, wird sich dabei herausstellen, dass die erhaltenen Zahlenkolonnen zwar in völlig zufälliger Art und Weise variieren, aber miteinander identisch sind (Bild unten). Die quantentheoretische Erklärung dafür lautet: Die Würfel lassen sich nicht als un-

abhängige, individuelle Objekte betrachten, sondern bilden eine Einheit.

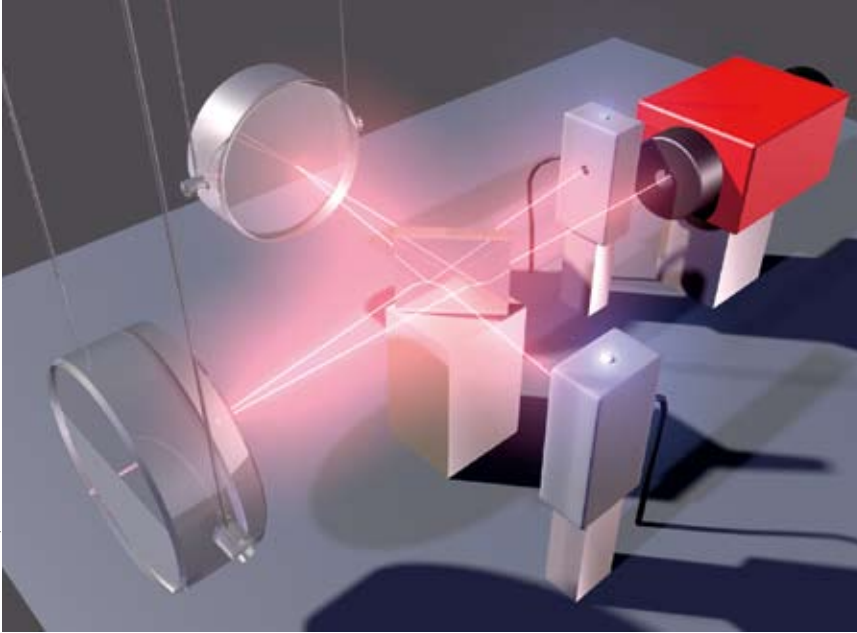
Verschränkung tritt oft bei Teilchen auf, die einen gemeinsamen Ursprung haben. Man kann sie aber auch nachträglich erzeugen, indem man zwei Objekte einer gemeinsamen Kraft aussetzt und sie so in eine starke gegenseitige Abhängigkeit bringt. Nach einer gewissen Zeit tritt dann die Verbindung zur Umgebung in den Hintergrund: Die Gegenstände beginnen ihre Individualität einzubüßen und eine neue Einheit zu bilden. Diese Einheit bleibt auch erhalten, wenn man die auf beide wirkende Kraft abstellt – zumindest so lange, bis der Einfluss der Umgebung wieder dominiert. Genau dieses Prinzip bildet die Grundlage unseres Vorschlags, zwei Spiegel miteinander zu verschränken (*»Physical Review Letters«, Bd. 100, S. 013601*).

Damit Störungen aus der Umgebung möglichst gering bleiben, soll das Experiment auf einer schwingungsarmen

Zwei verschränkte Würfel würden immer die gleiche Augenzahl zeigen – unabhängig davon, wie weit sie voneinander entfernt sind. Das Erstaunliche dabei: Es gibt weder Kräfte zwischen den Würfeln, noch wird Information ausgetauscht.



ALEXANDER FRANZEN, IPT FÜR GRAVITATIONSPHYSIK HANNOVER



Mit diesem experimentellen Aufbau soll es gelingen, über den Lichtdruck von Laserphotonen die Bewegungen der beiden aufgehängten Spiegel zu verschränken, so dass sie eine quantenmechanische Einheit bilden. Zum Nachweis dienen zwei Photodetektoren, die das Interferenzmuster der reflektierten Strahlen registrieren.

Plattform stattfinden, die in einem Hochvakuum an dünnen Fasern aufgehängt wird. Auf ihr sind ein Laser sowie ein halbdurchlässiges Strahlteilerfenster angebracht. Die beiden Spiegel hängen an dünnen Fasern über der Plattform (Bild oben). Wegen der pendelartigen Konstruktion können sie mit Perioden von einigen Sekunden hin- und herschwingen. Aber auf kurzen Zeitskalen von, sagen wir, einer hundertstel Sekunde spielen die rücktreibenden Kräfte der Pendel keine Rolle und die Spiegel verhalten sich in Ausbreitungsrichtung der Laserstrahlen wie frei schwebende Objekte. Auf diesen Zeitskalen lassen sich nach unseren Berechnungen die Orte und Impulse der beiden Spiegelschwerpunkte miteinander verschränken.

Synchron und asynchron zugleich

Die gemeinsame Kraft, die für die quantenmechanische Kopplung sorgt, stammt vom Lichtdruck eines Laserstrahls, den der Strahlteiler gleichmäßig in zwei Teilstrahlen aufspaltet. Die Spiegel werden so ausgerichtet, dass sie das auf sie fallende Licht zurückwerfen. Da sie wegen der heisenbergschen Unschärferelation prinzipiell nicht völlig zur Ruhe kommen können, bewegen sie sich zu Anfang des Versuchs bereits ein wenig, jedoch völlig unabhängig voneinander.

Sobald der Laser eingeschaltet ist, prasseln die Photonen, aus denen sein Strahl besteht, in einer unregelmäßigen, zufälligen Folge auf beide Spiegel. Deren Bewegung wird dadurch schon nach wenigen tausendstel Sekunden komplett vom Impuls der Lichtteilchen bestimmt, und jede Erinnerung an das, was davor war, geht verloren. Ist der Einfluss der

Umgebung genügend unterdrückt, so werden genau in diesem Moment die Spiegel miteinander verschränkt.

Aber wie lässt sich das nachweisen? Eine Möglichkeit dazu bieten die beiden Laserstrahlen. Denn sie verändern nicht nur die Spiegelbewegungen, sondern werden umgekehrt auch von ihnen beeinflusst. Ein zuvor ausgelenkter Spiegel reflektiert die auftreffenden Photonen nämlich etwas später. Das reflektierte Licht enthält also Informationen über seine Bewegung.

Für den Nachweis der Verschränkung braucht man allerdings Kenntnisse über die Relativbewegung der beiden Spiegel. Dazu kann ein einfacher Trick verhelfen: Man lässt die reflektierten Laserstrahlen auf exakt den gleichen Punkt am Strahlteiler treffen, so dass sie miteinander interferieren. Dabei entstehen zwei neue Strahlen, welche die gewünschten Informationen liefern, wenn sie mit unterschiedlichen photoelektrischen Detektoren analysiert werden.

Der eine ist so konstruiert, dass er Auskunft darüber gibt, wie stark die Impulse (und damit auch die Geschwindigkeiten) der Spiegel in Richtung Strahlteiler differieren. Bei erfolgreicher Verschränkung sollten sie nämlich jederzeit exakt übereinstimmen: Wenn sich ein Spiegel in einem Moment gerade mit einer bestimmten Geschwindigkeit vom Strahlteiler entfernt, tut das auch der zweite mit genau derselben Geschwindigkeit, und umgekehrt.

Der andere Detektor misst dagegen die Summe der Spiegelabstände zum Strahlteiler. Sie sollte, wenn die Spiegel verschränkt sind, konstant bleiben: Entfernt sich ein Spiegel etwas vom Strahl-

teiler, so nähert sich ihm der andere um exakt den gleichen Wert an.

Tatsächlich handelt es sich dabei um eine paradoxe Situation: Laut Impulsmessung bewegen sich die beiden Spiegel synchron, laut Ortsmessung dagegen asynchron – ein für uns unvorstellbarer Sachverhalt! Genau dieser Widerspruch liefert aber laut Quantenphysik den Beweis für die Verschränkung. Wenn sich die Spiegel nämlich zur selben Zeit präzise sowohl synchron wie asynchron bewegen, zeigen sie damit an, dass sie zu einer quantenmechanischen Einheit verschmolzen sind. Beide für sich genommen verletzen dabei scheinbar die heisenbergsche Unschärferelation.

Im Prinzip sollte sich die Verschränkung auch mit einer separaten Apparatur feststellen lassen. Dazu bräuchte man zwei Paare von Messgeräten, die unabhängig voneinander entweder exakt die Geschwindigkeiten oder die Orte der Spiegel relativ zur Plattform bestimmen. In beiden Fällen bestünde das Ergebnis wie bei den fiktiven verschränkten Würfeln aus zwei unvorhersagbaren Zahlenkolonnen, die aber synchron (beziehungsweise asynchron) zueinander variieren.

Nach Sekundenbruchteilen würde sich die Korrelation etwas verschieben, weil Störungen aus der Umgebung sich aufsummieren. Betrachtet man aber in jedem Moment nur den Zeitabschnitt unmittelbar davor, sieht man, dass die Verschränkung permanent vorhanden ist. Mit dieser Apparatur wäre die quantenmechanische Kopplung auch noch für eine kurze Zeit – wenige Millisekunden – nach dem Abschalten des Lasers feststellbar. Derzeit überlegen wir, wie sich dieser Nachweis praktisch realisieren lässt.

Zugegeben: Unser vorgeschlagenes Experiment stellt enorme Anforderungen an die apparative Ausrüstung. Voraussetzung ist ein hochstabiler Laserstrahl, in dem die zeitliche Variation der Photonen nur von der Quantentheorie bestimmt ist und nicht von Vibrationen oder Temperaturschwankungen des Laserkristalls.


Die Spiegel können bis zu einem Kilogramm wiegen, sollten aber nach Möglichkeit aus einem einzelnen (synthe-

tischen) Kristall gefertigt sein, damit sich die braunsche Bewegung der Spiegelatome nicht bemerkbar macht. Vermutlich muss man sie außerdem auf extrem tiefe Temperaturen von nur wenigen Kelvin abkühlen, um sämtliche inneren Bewegungen, die ihre Schwerpunkte im Vergleich zu ihren Oberflächen verschieben, zu minimieren.

So hoch diese Anforderungen an das Experiment sind, sollten sie sich mit

dem heutigen Stand der Technik doch erfüllen lassen. Wir sehen deshalb gute Chancen, dass verschränkte Spiegel schon bald Realität sein werden und sich die Paradoxien der Quantenwelt auch in unserem makroskopischen Alltag demonstrieren lassen.

Roman Schnabel ist Professor am Institut für Gravitationsphysik (Albert-Einstein-Institut) der Universität Hannover.

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

DNA wie einen Strichkode lesen

Die Entzifferung kompletter Genome ist trotz aller Fortschritte noch aufwändig und teuer. Doch ein neues Verfahren könnte die DNA-Sequenzierung so einfach machen wie das Scannen von Strichkodes an Supermarktkassen.

Von Thorsten Braun

Die menschliche DNA besteht aus 3,08 Milliarden Basenpaaren, aufgereiht in einem Abstand von nur 0,34 Nanometern. Lange Zeit galt es als unmöglich, ihre genaue Abfolge vollständig zu bestimmen. Doch in einem beispiellosen Kraftakt lösten rund tausend Wissenschaftler aus 40 Ländern diese Aufgabe. Von 1990 bis 2003 erstellten sie im Rahmen des Humangenomprojekts eine Landkarte des menschlichen Erbguts.

Schon vorher waren – quasi als Fingerübung – einzelne einfache Genome entziffert worden. Im Verlauf des Mammutprojekts konnten die Forscher die Sequenzierungstechnik so perfektionieren, dass sich danach in rascher Folge die komplette Erbinformation von immer mehr Lebewesen entschlüsseln ließ. Inzwischen nehmen Wissenschaftler sogar den individuellen DNA-Kode einzelner Menschen ins Visier, um deren persönliches Krankheitsrisiko voraussagen zu können.

Noch verhindern hohe Kosten zwar das routinemäßige Sequenzieren im medizinischen Alltag, da sehr aufwändige Analyseverfahren dafür nötig sind. Doch das könnte sich mit einer neuen Methode ändern, die Volkert Deckert und Elena Bailo vom Institute for Analytical Sciences (ISAS) in Dortmund entwickelt haben (*»Angewandte Chemie«, Bd. 120,*

S. 1682). Mit einer Kombination von Raman-Spektroskopie und Rasterkraftmikroskopie soll es dabei gelingen, die Reihenfolge der Basen auf dem Erbgutstrang direkt abzulesen.

Vorerst machten Deckert und Bailo ihre Experimente allerdings mit RNA statt DNA; denn sie liegt im Unterschied zur Doppelhelix der normalen Erbsubstanz von Natur aus schon als Einzelstrang vor. In der Zelle fungiert sie als Zwischenträger für die genetische Information und ist analog zur DNA aufgebaut: An einem Rückgrat aus miteinander verknüpften Phosphatresten sitzen wie Perlen so genannte Nukleoside. Sie bestehen aus dem Zucker Ribose (Desoxyribose bei der DNA) und einer der organischen Basen Adenin, Cytosin, Guanin oder Uracil (Thymin bei der DNA). Der Einfachheit halber verwendeten die beiden Forscher für ihre Experimente RNA, die nur Cytosin als Base enthielt.

Abtasten des Basenstrangs mit der Nadel

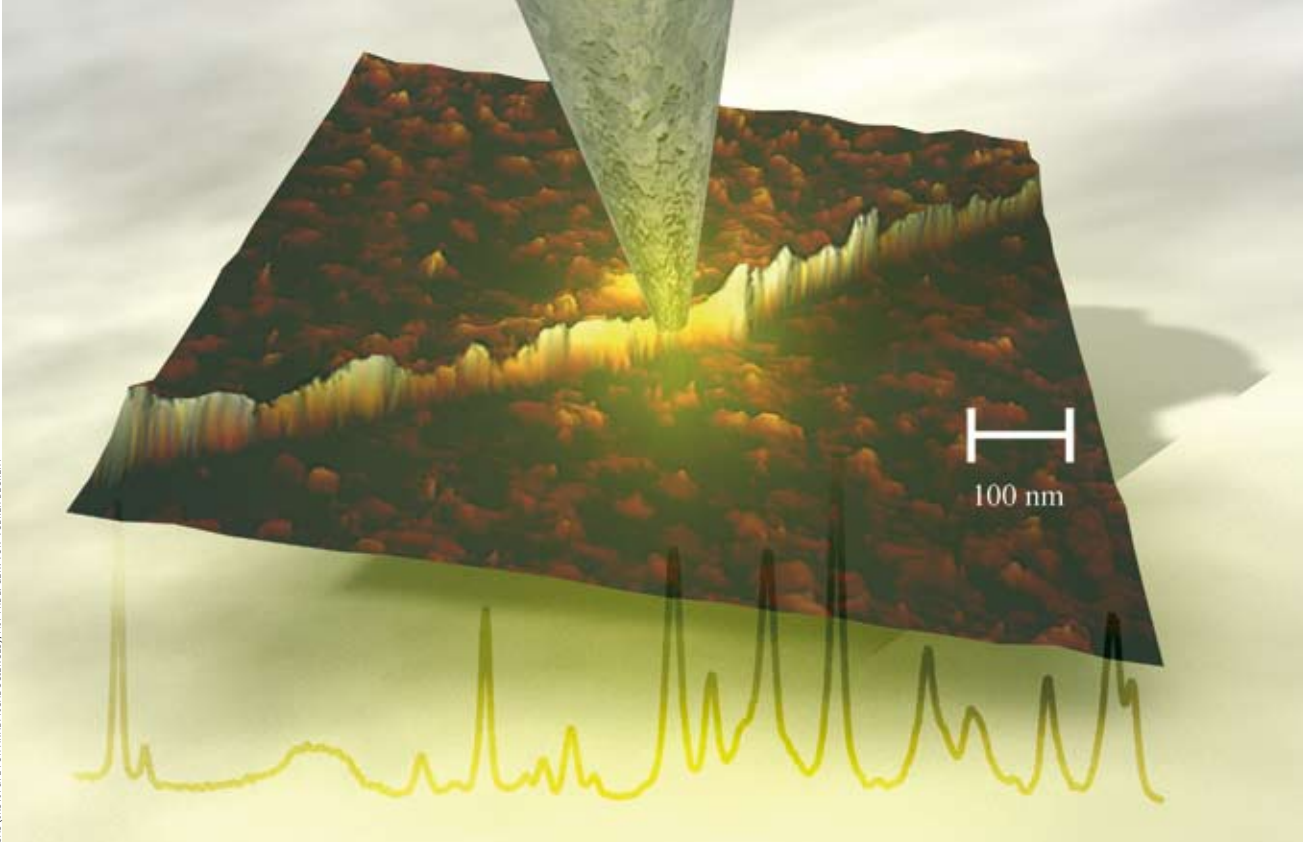
Die erste Schwierigkeit war, einen linear ausgerichteten RNA-Strang zu erhalten. Normalerweise neigt das Molekül nämlich dazu, sich zu verknäueln. Um dem entgegenzuwirken, nahmen die Forscher die RNA mit einer speziellen Lösung auf, die sie dann auf den Probenträger des Rasterkraftmikroskops tropften. Dieser besteht aus Glimmer, einem durchsichtigen Schichtsilikat. Dadurch hat er

nicht nur eine extrem glatte Oberfläche, sondern bindet auch die Phosphatgruppen der RNA-Stränge an sich, so dass alle Basen nach oben zeigen.

Deckert schätzt, dass sich auf dem Träger mehrere 100 000 RNA-Stränge befanden, die jeweils rund 400 Cytosingruppen enthielten. »Um einen einzelnen Strang zu identifizieren, haben wir mit dem Rasterkraftmikroskop von einem rund zehn Quadratmikrometer großen Areal eine Aufnahme gemacht«, berichtet Deckert, der am ISAS den Fachbereich Proteomics leitet.

Zwischen der winzigen Nadelspitze des Mikroskops und der Oberfläche wirken atomare Kräfte. Durch das punktweise Aufzeichnen dieser Kräfte lässt sich wie bei einem Digitalfoto eine Abbildung der Probenoberfläche erzeugen. »RNA-Stränge erheben sich rund einen Nanometer über die Glimmeroberfläche«, erläutert Deckert, »und lassen sich deshalb gut auf einem solchen Foto erkennen.« Unter ihnen suchten die Forscher ein halbwegs geradliniges Exemplar aus.

Sobald Position und Verlauf eines RNA-Strangs bekannt sind, kann die Nadelspitze Base für Base an ihm entlanggeführt werden. Aber damit lässt sich deren chemische Identität noch nicht bestimmen. Dazu bedarf es zusätzlich eines Lasers, der auf das Areal gerichtet ist, in dem sich der RNA-Strang befindet. Sein Licht tritt in Wechselwirkung mit den Cytosinmolekülen, die



sich direkt unter der Nadelspitze befinden, und wird in alle Richtungen gestreut.

Das Streulicht lässt sich mit einem Spektrometer analysieren. Es enthält neben der Hauptspektrallinie, die vom eingestrahlten Licht selbst stammt, weitere Banden mit einer größeren Wellenlänge. Sie entstehen, wenn die Photonen auf die Cytosinmoleküle treffen und sie in Schwingung versetzen, indem sie einen Teil ihrer Energie auf sie übertragen. Die gestreuten Lichtquanten sind dann um diesen Energiebetrag ärmer und entsprechend langwelliger. Der Vorgang wird als Ramanstreuung bezeichnet. Sie ist unabhängig von der Wellenlänge des eingestrahlten Lichts und charakteristisch für das betreffende Molekül.

Raffinierte Spitzentechnik

Deckert schätzt, dass unter der Spitze, die einen Durchmesser von rund 20 Nanometern hat, ungefähr 50 Basen Platz haben. Um ein Ramanspektrum zu erhalten, wäre normalerweise eine viel größere Anzahl von Molekülen erforderlich. Doch die Dortmunder Forscher fanden einen eleganten Ausweg aus diesem Dilemma. Seit einigen Jahren ist bekannt, dass raue Oberflächen aus Metallen wie Gold, Silber oder Kupfer den Raman-Effekt extrem verstärken können. Deshalb beschichteten Deckert und Bailo die Nadelspitze des Rasterkraftmikroskops mit Silber. Das einfallende Licht

regt in der Metalloberfläche freie Elektronen kollektiv an und erzeugt so ein starkes elektromagnetisches Feld. Es interagiert mit den Cytosinmolekülen unter der Nadelspitze und verstärkt deren Ramanstreuung um den Faktor 10^8 , also hundertmillionenfach.

Die beiden Wissenschaftler nahmen von mehreren Positionen auf dem RNA-Strang ein Spektrum auf. Die erhaltenen Spektrallinien zeigten jedes Mal das für Cytosin typische Muster und hatten eine ähnliche Intensität.

Um das Signal-Rausch-Verhältnis zu bestimmen, rückten Deckert und Bailo die Nadelspitze mehrere hundert Nanometer vom RNA-Strang weg. Obwohl der Laser diesen nach wie vor anregte, konnte der Detektor außer einem unspezifischen Rauschen nichts messen. Die Signalintensität war mindestens 200-mal schwächer als zuvor. »Das bedeutet, dass der Beitrag jedes einzelnen der rund 50 Cytosinmoleküle zum Gesamtsignal viermal so groß wie das Rauschen ist«, erklärt Deckert.

Das ist eine wichtige Voraussetzung, um die Abfolge einzelner Basen in einem Strang zu bestimmen. Enthält die RNA sämtliche vier Basen, so setzt sich das Spektrum aus den Spektrallinien von ihnen allen zusammen. Deren relative Stärke hängt davon ab, aus wie vielen einzelnen Adenin-, Cytosin-, Guanin- und Uracilmolekülen das RNA-Stück unter der Nadelspitze des Rastermikroskops

Während die Spitze des Rasterkraftmikroskops einen RNA-Strang entlangfährt, wird sie von einem Laserstrahl beleuchtet und ein Raman-Spektrum (gelbe Kurve) aufgenommen. Aus ihm lässt sich die Abfolge der Bausteine des RNA-Strangs entnehmen.

besteht. »Führt man nun die Spitze um eine Base auf dem Strang weiter«, erläutert Deckert, »wobei zum Beispiel ein Guanin dazukommt und ein Cytosin wegfällt, verstärken sich die für Guanin charakteristischen Spektrallinien und diejenigen für Cytosin schwächen sich ab. So kann man Base für Base die Sequenz ablesen.«

Momentan testen die beiden Forscher die spitzverstärkte Ramanspektroskopie (TERS; nach englisch *tip-enhanced Raman spectroscopy*) an DNA-Strängen, die alle vier Basen enthalten. Deckert rechnet damit, dass die Versuche dieses Jahr beendet werden. Sind sie erfolgreich, möchte er mit Mikroskopherstellern in Kontakt treten. Mit deren Hilfe soll TERS zu einem marktfähigen Produkt weiterentwickelt werden. »Noch ist es ein experimentelles Verfahren, aber es könnte die DNA-Sequenzierung ganz einfach machen«, schwärmt Deckert, »so einfach, als ob man einen Strichkode an der Supermarktkasse abliest.«

Thorsten Braun ist promovierter Chemiker und freier Wissenschaftsjournalist in Berlin.

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
7. 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 Geschenkabo bestellen, verschicken wir das erste Heft zusammen mit einer Grußkarte in Ihrem Namen.



Buch »Die 7 größten Rätsel der Wissenschaft«
Erfrischend einfach und lebendig erklären David und Arnold Brody die sieben Pfeiler der Naturwissenschaften.

LESER WERBEN LESER

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


Technaxx DVB-T-Stick S3.

Der DVB-T-Stick S3 sorgt für hervorragende Bilder und eine hohe Auflösung. Mit EPG-Programmführer, USB-2.0-High-Speed-Verbindung, Kanalvorschau, Videotext und zeitgesteuerter Aufnahme. Lieferumfang: Antenne, Fernbedienung, Treiber und Software



PRODUKT DES MONATS



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

Selbstheilendes Gummi

Es klingt wie ein Wunder, doch nach dem Zerschneiden dieses neuartigen, elastischen Materials muss man nur die Enden zusammendrücken, damit es wieder hält.

Von Michael Groß

Vor 170 Jahren erfand Charles Goodyear die Vulkanisation des Kautschuks zur Herstellung von Gummi. Er ging rein empirisch vor und probierte verschiedene Arten der Bearbeitung. So fand er heraus, dass durch Erhitzen des Naturstoffs mit Schwefel jenes sehr haltbare, hochelastische Material entsteht, aus dem heute noch Autoreifen und Gummiringe hergestellt werden. Bisher ist es nicht gelungen, sein Rezept mit den Mitteln der modernen Wissenschaft entscheidend zu verbessern. Um dem erprobten Werkstoff zusätzliche Vorzüge zu verleihen, haben ihn Materialforscher an der Ecole Supérieure de Physique et Chimie Industrielles in Paris deshalb nun kurzerhand neu erfunden.

Herkömmliches Gummi besteht aus langen Kettenmolekülen, die beim Vulkanisieren durch kovalente chemische Bindungen miteinander quervernetzt werden. Der neuartige Werkstoff, den Ludwik Leibler und seine Mitarbeiter konzipiert haben, enthält zwar ebenfalls lange, quervernetzte Ketten. Doch sind die Verknüpfungen zwischen ihnen wie auch zwischen den einzelnen Kettengliedern leicht aufzulösen und umzuordnen. Es handelt sich nämlich nicht um kovalente chemische Bindungen, sondern um Wasserstoffbrücken, die letztlich auf elektrostatischen Dipol-Wechselwirkungen beruhen.

Zum Aufbau dieser molekularen Netzwerke gingen die Pariser Forscher von Karbonsäuren mit zwei oder drei Karboxylgruppen ($-\text{COOH}$) aus. Sie dienen als lineare Kettenglieder beziehungsweise als Bausteine für Verzweigungen. An die Karboxylgruppen knüpften Leibler und seine Kollegen mittels einer so genannten Kondensationsreaktion – durch die sich auch Aminosäuren unter Abspaltung von Wasser zu Proteinketten aufreihen – stickstoffhaltige organische Moleküle, die von Harnstoff oder Imidazol abgeleitet waren. Sie enthalten sowohl Donorgruppen, die ein teilweise

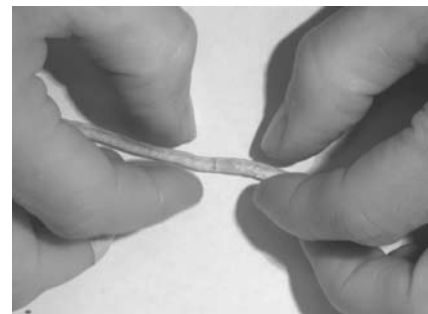
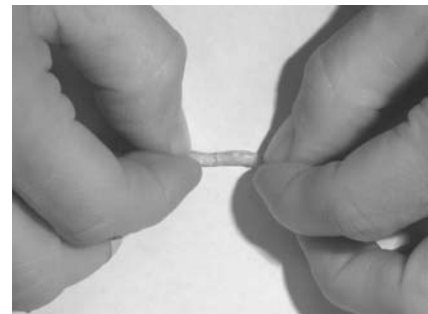
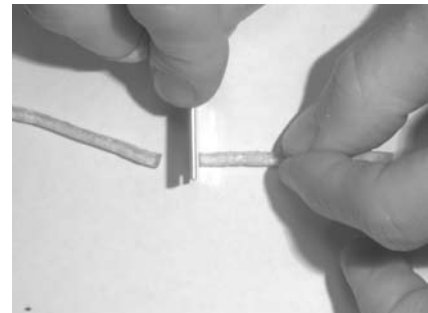
positiv geladenes Wasserstoffatom als Brückenkopf zur Verfügung stellen (etwa $-\text{OH}$, $-\text{NH}_2$), als auch Akzeptoren mit partiell negativer Ladung, die mit diesem Atom wechselwirken können (wie $=\text{O}$). Alle verwendeten Substanzen sind gängige, kostengünstige und leicht handhabbare Chemikalien, die bereits im industriellen Maßstab hergestellt und eingesetzt werden.

Treue der Moleküle zum ehemaligen Bindungspartner

Im ersten Anlauf entstand ein spröder, glasartiger Kunststoff, der sich erst bei Temperaturen um 90 Grad Celsius gummiartig verhielt. Um ihn auch bei niedrigeren Temperaturen dehnbar zu machen, »verdünnten« ihn die Forscher mit geringen Mengen des Lösungsmittels Dodekan (ein Kohlenstoffatom, der zum Beispiel im Dieselmotortreibstoff vorkommt).

Diese nachgebesserte Substanz, welche die Forscher bisher einfach »Material B« nennen, erwies sich als ebenso dehnbar und elastisch wie herkömmliches Gummi (*»Nature«, Bd. 451, S. 977*). Es zeichnet sich jedoch gegenüber dem vertrauten Werkstoff durch eine fast unglaubliche Eigenschaft aus: Wenn man ein Gummiband aus Material B durchschneidet oder zerreißt, lassen sich die beiden Teile bei Raumtemperatur einfach wieder miteinander verbinden – man muss sie nur mit den Enden einige Minuten aneinanderpressen. Der Bruch verheilt, ohne eine Schwachstelle zu hinterlassen, und das Material kann an derselben Stelle beliebig oft zertrennt und wieder zusammengefügt werden, ohne dass diese Behandlung bleibende Spuren hinterlässt.

Das Geheimnis der fast magischen Selbstheilungskraft liegt – Sie ahnen es vielleicht – in den Wasserstoffbrückenbindungen: jenen relativ schwachen, aber zahlreichen Wechselwirkungen, die zum Beispiel auch die DNA-Doppelhelix und die Beta-Faltblätter der Proteine zusammenhalten. Beim Zerschneiden von Material B werden einige davon ge-



Kein Zaubertrick: Ein durchgeschnittener Strang aus einem neuartigen Gummimaterial lässt sich durch einfaches Zusammendrücken der beiden Enden wieder verbinden. Nach nur einer Stunde ist die Schnittstelle verheilt und hält so fest, als sei nichts gewesen.


kappt, doch die ehemaligen Bindungspartner bleiben kurzfristig (für einige Stunden) bindungsbereit und finden wieder zueinander, wenn man die Fragmente zusammenpresst. Erst im Verlauf von Tagen geht die Bindungsfähigkeit der Schnittstelle verloren, da sich die allein gelassenen Moleküle innerhalb des

Fragments dann neu arrangieren und andere Wasserstoffbrücken ausbilden.

Anwendungen – und ein zugkräftiger Name – für Material B sollten nicht lange auf sich warten lassen. Vom selbstfließenden Fahrradschlauch bis hin zu korrosionsfesten Lacken und medizinischen Prothesen lassen sich vielerlei Einsatz-

möglichkeiten denken. Da die Ausgangsmaterialien leicht erhältlich und preisgünstig sind, sollten dem Siegeszug des Supergummis keine wesentlichen Hindernisse im Weg stehen.

Michael Groß ist promovierter Biochemiker und Wissenschaftsjournalist in Oxford (England).

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

Sehen mit kabellosem Retina-Implantat

Eine an der RWTH Aachen entwickelte Sehprothese für Blinde hat erste klinische Tests erfolgreich absolviert. Sie wurde gut vertragen und vermittelte bereits einfache Seheindrücke.

Von Peter Walter und Wilfried Mokwa

Etwa vier bis sieben Prozent aller Erblindungen bei Erwachsenen in Deutschland sind auf eine fortschreitende Degeneration der lichtempfindlichen Zellen in der Netzhaut zurückzuführen. Durch diese als Retinitis pigmentosa (RP) bekannte Erkrankung haben schätzungsweise 15 000 Menschen in der Bundesrepublik ihr Augenlicht verloren. Sie beginnt mit Nachtblindheit und führt über eine tunnelförmige Einschränkung des Gesichtsfelds zwischen dem 30. und

60. Lebensjahr schließlich zum völligen Verlust des Sehvermögens.

Die RP gehört zu einer Gruppe von Augenerkrankungen, die durch Mutationen in wichtigen Genen verursacht werden. Betroffen sind Schlüsselproteine in den Fotorezeptoren oder im retinalen Pigmentepithel. Insgesamt wurden etwa 130 Gene identifiziert, die zu verschiedenen Formen von RP beitragen können. Eine Therapie ist bis heute nicht bekannt.

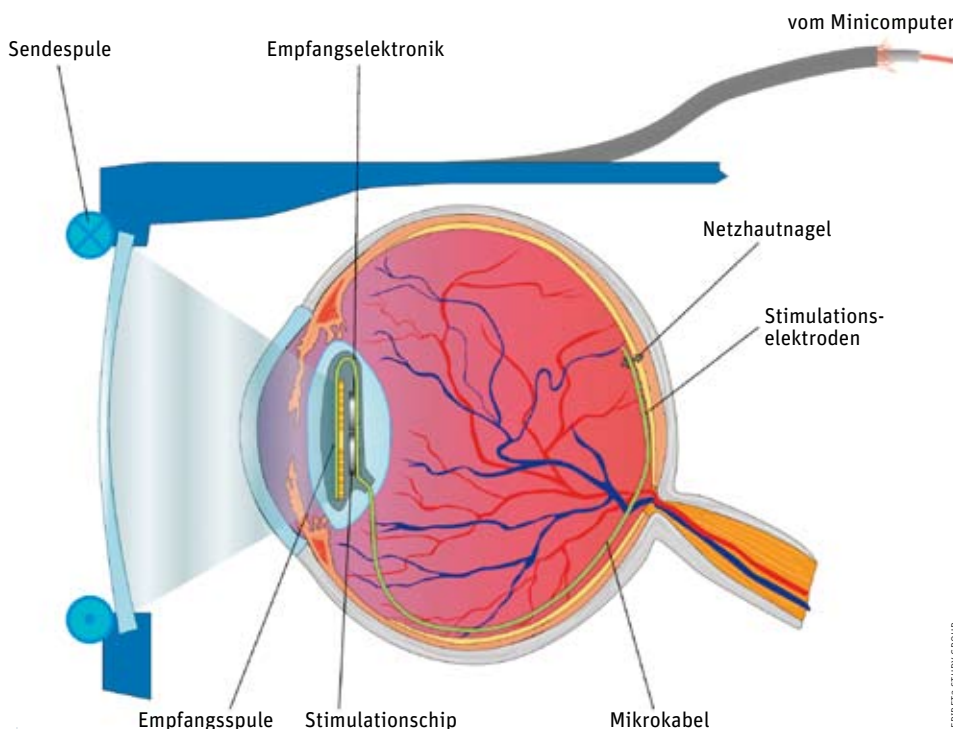
Seit 1995 fördert das Bundesforschungsministerium (BMFT/BMBF) im

Rahmen seines Neurotechnologieprogramms Projekte zur Entwicklung implantierbarer Sehprothesen. Sie sollen Menschen, die an fortschreitender Degeneration der Fotorezeptoren leiden, ihr Augenlicht zumindest teilweise zurückgeben.

Das generelle Funktionsprinzip der Prothesen beruht darauf, dass Stromreize den noch intakten Nervenzellen in der Netzhaut jene Signale geben, die von den Photorezeptoren nicht mehr kommen.

Schon früh haben sich zwei Konzepte herauskristallisiert. Beim subretinalen Ansatz sollen miniaturisierte Fotodioden die ausgefallenen Fotorezeptoren ersetzen. Sie sind hinter der Netzhaut angebracht und registrieren das dort von der Augenlinse projizierte Bild. Beim epiretinalen Ansatz reizen dagegen auf der Vorderseite der Retina befestigte Elektroden die Ganglienzellen, deren Axone (Fasern) zusammen den Sehnerv bilden. Die Bildsignale kommen dabei von einer externen Kamera.

Welches der Systeme besser ist, muss sich noch herausstellen. Von beiden existieren nach einer Vielzahl präklinischer



Beim EPI-RET3-System – hier eine Schemazeichnung – liefert eine Kamera (nicht gezeigt) Bilder der Außenwelt. Ein Minicomputer verarbeitet die Bilddaten und sendet per Induktionsspule Signale an das Implantat, dessen Empfänger in einer künstlichen Augenlinse sitzt. Diese werden dekodiert und in Pulse umgewandelt, die an Stimulations-elektroden auf der Netzhaut gehen.

Tests inzwischen Prototypen, die auch schon bei einer Reihe von blinden RP-Patienten versuchsweise eingesetzt wurden. Ziel war, zu prüfen, wie gut sie übertragen werden und ob damit Schwahrnehmungen auslösbar sind.

Wir haben zusammen mit einer Reihe von Kollegen ebenfalls eine epiretinale Prothese entwickelt. Unser Konzept sieht zwei getrennte Einheiten vor. Im nicht implantierbaren Teil nimmt ein Kamerachip, der in eine Brille integriert ist, Bilder auf. Solche Chips lassen sich heute bereits sehr klein produzieren – man denke nur an Handykameras. Ein Minicomputer, der wie ein PDA (persönlicher digitaler Assistent) etwa an einem Gürtelclip getragen werden kann, verarbeitet die Bilddaten weiter und berechnet daraus die Stimulationspulse für die Reizelektroden.

Drahtlose Energieversorgung

Unser EPI-RET3-System ist das einzige weltweit, das sowohl die für das Implantat notwendige Energie als auch die Steuerbefehle für die Elektroden nicht per Kabel durch die Augenhaut – stets eine



Das Implantat des EPI-RET3-Prototyps besteht aus einem Empfänger, der in eine Intraokularlinse integriert ist (links), und einem Stimulator (rechts) mit 25 einzeln ansteuerbaren Elektroden, der auf der Netzhaut befestigt wird.

Quelle für Reizungen und Entzündungsreaktionen –, sondern drahtlos zum Implantat überträgt. Dies geschieht durch magnetische Kopplung bei einer Frequenz von 13,56 Megahertz, die für medizinische Zwecke zugelassen ist und anderen technisch genutzten Frequenzbereichen nicht ins Gehege kommt. Ein Sender in der Brille übermittelt die Signale per Amplitudenmodulation an einen Empfänger, der im Bereich der ehemaligen Linse im Auge untergebracht ist. Dieser trennt Energie und Daten voneinander. Gemäß den übermittelten Informationen werden dann die Reizelektroden auf der Netzhautoberfläche angesteuert.

In der dritten Förderphase des EPI-RET-Projekts haben wir mittlerweile einen Prototyp der implantierbaren Einheit aufgebaut, der die gesamte Funktionalität des EPI-RET-Konzepts beinhaltet (Bild oben). Er kann über den Empfänger 25 Reizelektroden ansteuern und für jede einzelne bis zu 0,1 Milliampere bereitstellen. Der Zeittakt der Stromabgabe lässt sich von außen im Bereich zwischen einer und einer hundertstel Millisekunde variieren.

Alle Komponenten des Prototyps sind auf einer Basisstruktur aus dem extrem dünnen und flexiblen bioverträglichen Kunststoff Polyimid aufgebracht und in

Exklusiv für Abonnenten

Ab sofort können Sie sich mit Ihrer Abonnementnummer unter www.spektrum-plus.de Ihren persönlichen Spektrum-Mitgliedsausweis herunterladen. Damit erhalten Sie Vergünstigungen bei den aufgelisteten Museen, Filmtheatern und wissenschaftlichen Einrichtungen:



Industriemuseum, Chemnitz / Neanderthal Museum, Mettmann / Auto & Technik Museum, Sinsheim / Technik Museum, Speyer / IMAX 3-D Filmtheater, Sinsheim / IMAX DOME, Speyer / Deutsches Dampflokomotiv-Museum, Neuenmarkt / Deutsches Hygienemuseum, Dresden / Deutsches Technikmuseum, Berlin / Zentrum für Multimedia, FH Kiel / Museum für Naturkunde, Magdeburg / Volkssternwarte und Planetarium, Recklinghausen / Umwelt-Museum Oberfranken, Bayreuth / Universum Science Center, Bremen / Deutsches Erdölmuseum, Wietze / Mathematikum, Gießen / Deutsches Museum, Bonn / Astronomisches Zentrum, Schkeuditz / Planetarium und Schulsternwarte, Herzberg / Planetarium, Freiburg / Turm der Sinne, Nürnberg / Urania, Berlin / Zeppelin-Museum, Meersburg / Nicolaus-Copernicus-Planetarium, Nürnberg.

Schauen Sie doch einfach im Internet, was Sie erwartet!



DER WISSENSCHAFT

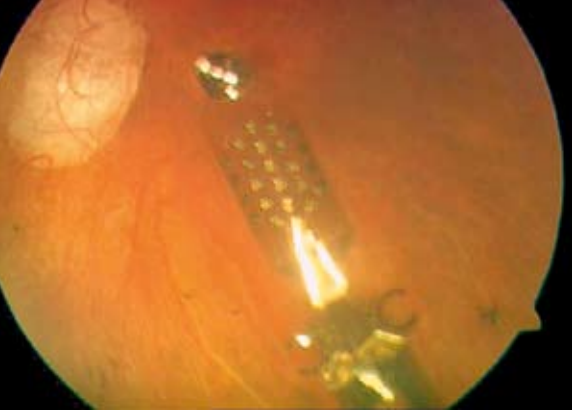


MITGLIEDSAUSWEIS

Max Mustermann

Kunden-Nummer:
Ausweis-ID 1sd145dg4637834hd

Der Ausweis ist nur in Verbindung mit dem Personalausweis gültig.



EPI-RET3 STUDY GROUP

Aufnahme des Stimulators auf der Netzhautoberfläche der ersten Patientin vier Wochen nach der Implantation

einem mehrstufigen Prozess mit einem biokompatiblen Linsenmaterial verkapselt. Dadurch ist die Isolation äußerst beständig – was gewährleistet, dass keine Feuchtigkeit in das Implantat eindringen und seine Funktion gefährden kann.

In Experimenten an Zellkulturen haben wir zunächst die Bioverträglichkeit der verwendeten Materialien überprüft. In Tierversuchen gingen wir anschließend der Frage nach, ob sich das System ins Auge einsetzen lässt und dort vertragen wird. Das geschah mit standardisierten Tests, wie sie für implantierbare Medizinprodukte vorgeschrieben sind. Dabei erwies sich unser System als für Körperzellen unbedenklich.

Erfolgreiche Versuche an Blinden

Ferner prüften wir an Tieren, ob Strompulse an den Reizelektroden auf der Netzhaut eine spezifische Aktivierung der Sehrinde im Gehirn auslösen. Dazu nutzten wir Mikroelektrodenableitungen aus dem visuellen Kortex und Stoffwechselformen. Bei Katzen konnten wir so nachweisen, dass sich das örtliche und zeitliche Muster der Netzhautstimulation tatsächlich in der Aktivität der Sehrinde widerspiegelt. An Schweinen führten wir zudem einen Langzeitverträglichkeitstest durch, bei dem wir die Implantate teils länger als ein Jahr im Auge beließen. Dabei zeigten sich keine schwer wiegenden Folgereaktionen.

Mit den Ergebnissen der präklinischen Tests erhielten wir bei den zuständigen Behörden die Genehmigung, auch Implantations- und Stimulationsversuche bei blinden RP-Patienten durchzuführen. Zu den Auflagen zählte eine Implantationsdauer von maximal vier Wochen. An dem Test durften zudem nur Patienten teilnehmen, die außer an Retinitis pigmentosa nicht an anderen Augenkrankheiten litten und deren Sehver-

mögen auf dem besseren Auge höchstens zwei Prozent betrug.

Für die Implantation verwendeten wir die Technik, die sich bei den Tierversuchen bewährt hatte. Wir entfernten die Linse oder Kunstlinse sowie den Glaskörper und positionierten den Empfänger im vorderen Augenabschnitt. Danach drückten wir den Stimulator vorsichtig auf die Oberfläche der Retina und befestigten ihn dort mit zwei Spezialnägeln. Schließlich wurde der Augapfel mit Luft gefüllt.

Bei den nachfolgenden Versuchen ging es uns vor allem darum, zu ermitteln, wie stark der Reizstrom sein und welchen zeitlichen Verlauf er haben muss, damit Seheindrücke beim Patienten entstehen. Deshalb übertrugen wir keine Bilder vom Kamerasystem, sondern variierten nur an einzelnen oder Gruppen von Elektroden die Stromstärke. Außerdem erfassten wir Daten zur Verträglichkeit. Nach vier Wochen entfernten wir gemäß den Vorgaben das Implantat wieder und dokumentierten während einer Nachbeobachtungszeit von sechs Monaten den Verlauf der Heilung.

An der Studie nahmen sechs Patienten teil. Die Untersuchungen und Operationen fanden an den Universitäts-Augenkliniken in Aachen und in Essen statt. Bei allen sechs Patienten konnte das Implantat sicher in das Auge eingesetzt werden. Zwar traten durchweg Reizreaktionen auf, wie sie nach größeren netzhautchirurgischen Eingriffen durchaus üblich sind. Sie waren jedoch nur mäßig stark und ließen sich durch die gängige Behandlung mit kortison- und antibiotikahaltigen Augentropfen und -salben beherrschen.

Bei allen Patienten funktionierte das Implantat ordnungsgemäß. Interessanterweise genügte schon sehr niedrige Stromstärken, um Sehnehmungen auszulösen. Dabei erkannten die Versuchspersonen Lichtpunkte und -flecken; bei mehreren gleichzeitig aktivierten Elektroden sahen sie auch Linien oder andere Muster. Die Lichtflecken erschienen je nach Reizstärke in unterschiedlichen Farben.

Die Entfernung des Implantats verlief bei fünf der sechs Patienten komplikationslos. Nur bei einem Versuchsteilnehmer trat ein Netzhautloch auf, das per Laser behandelt werden musste. Insgesamt waren die Ergebnisse der EPI-RET3-Studie positiv, was uns ermutigt, das Konzept der vollständig implantierbaren Sehprothese weiterzuentwickeln.

Zum einen wollen wir die Genehmigung beantragen, das Implantat bei weiteren Patienten unbefristet einzusetzen. Zum anderen arbeiten wir an der Fertigstellung der Kamerabrille, so dass es möglich ist, Bildeindrücke an das Implantat zu senden. Dann kann das System in Alltag genutzt werden.

Parallel dazu bauen wir einen verbesserten Prototyp einer implantierbaren Sehprothese, die über deutlich mehr Elektroden verfügen wird als das EPI-RET3-Modell. Wir hoffen, damit orientierendes Sehvermögen zu realisieren. Mit der Marktreife des neuen Modells rechnen wir in zwei bis drei Jahren.

Peter Walter ist Direktor der Augenklinik, **Wilfried Mokwa** Inhaber des Lehrstuhls I am Institut für Werkstoffe und Elektrotechnik der RWTH Aachen.

Partner der EPI-RET3-Entwicklung

- ▶ Institut für Werkstoffe der Elektrotechnik I der RWTH Aachen
- ▶ Fraunhofer Institut für Mikroelektronische Schaltungen und Systeme, Duisburg
- ▶ Institut für Neurophysik, Universität Marburg
- ▶ Universitäts-Augenklinik Aachen
- ▶ Universitäts-Augenklinik Essen
- ▶ Dr. Schmidt Intraokularlinsen GmbH, St. Augustin
- ▶ Thomas Recording GmbH, Gießen
- ▶ Bytec Medizintechnik GmbH, Stolberg

Die gesamte Entwicklung wurde vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) unter der Projekträgerschaft des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR) in Bonn gefördert.

Springers Einwürfe

Geschlechterkampf im Internet

Warum gibt es so wenig Physikerinnen?

Als ich Vorlesungen in Theoretischer Physik zu hören begann, saß in der ersten Reihe eine Ordensschwester in traditioneller Nonnentracht. Sie war die einzige Frau im Hörsaal, und bald verschwand auch sie. Dem naturwüchsigen Interesse des jungen Mannes am weiblichen Geschlecht blieb nur der gelegentliche Ausflug in andere Fakultäten.

Die triste Männerdominanz hat offenbar seither etwas nachgelassen, aber ein typisches Betätigungsfeld für Frauen ist die Physik nach wie vor nicht. Woran mag das liegen? Die Behauptung, Männer seien halt von Natur aus logisch-mathematisch begabter, darf, seit Dr. Paul Julius Möbius anno 1903 einen »physiologischen Schwachsinn des Weibes« behauptete, eher als Zeugnis männlichen Schwachsinn gelten. Doch wenn eine biologische Benachteiligung der Frau nicht mehr ernsthaft in Betracht kommt, bleibt nur die soziale: Physikerinnen werden diskriminiert (siehe meinen Einwurf von Dezember 2006).

Den empirischen Beweis dafür hat jüngst die Teilchenphysikerin Sherry Towers in den USA angetreten. Sie untersuchte die Karrieren von promovierten wissenschaftlichen Fachkräften – Postdocs – am Fermi National Accelerator Laboratory bei Chicago. Wie Towers herausfand, leisteten weibliche Postdocs zwischen 2000 und 2005 zwar viel mehr Wartungsarbeiten und publizierten institutsintern eifriger als die männlichen Kollegen, durften aber deutlich seltener auf öffentlichen Fachtagungen vortragen (*»Nature«, Bd. 452, S. 918*).

Dieser Befund mutet auf den ersten Blick nicht sehr kontrovers an, sondern bestätigt nur ein unter vielen weiblichen und wenigen männlichen Forschern verbreitetes Unbehagen. Frauen sind als emsige Kolleginnen gern gesehen, aber für die öffentliche Präsentation der Arbeitsergebnisse fühlen sich eher Männer zuständig.

Dennoch löste die Meldung in der Online-Ausgabe von Nature eine überraschend heftige Lawine von Kommentaren aus. Ein Physiker schrieb, nach seiner Erfahrung dächten Frauen in der Wissenschaft nun einmal »lateral« – soll wohl heißen seitwärts ausweichend, auf Umwegen –, Männer hingegen »vertikal«. Dieser angeborene Unterschied erkläre ganz natürlich die männliche Dominanz in den exakten Disziplinen. Als er darauf reichlich empörten Widerspruch ertete, sprang ihm ein Kollege hitzig bei: Die vorwiegend weiblichen Diskutanten würden ihre Gegner offenbar am liebsten »eliminieren« wie unter Hitler oder Stalin.

Angesichts der eskalierenden Debatte sah sich der Online-Moderator von »Nature« genötigt, einzugreifen und noch unsachlichere Statements zu entfernen. Ein offenbar versöhnlich gemeinter Beitrag von männlicher Seite gab zu bedenken, in einer künftig weiblich dominierten Physik wäre der isolierte Mann doch gewiss derselben Diskriminierung ausgesetzt wie derzeit Physikerinnen.

An diesem Argument finde ich immerhin lobenswert, dass es die Ursache der Ungleichbehandlung nicht in der biologischen Grundausstattung der Geschlechter sucht, sondern in sozialer Gruppendynamik. Andererseits erscheint es mir doch sehr verfrüht, für männliche Physiker schon heute vorbeugenden Minderheitenschutz zu beantragen. Noch ist es ein weiter Weg zu geschlechtlicher Fairness in der Wissenschaft – dafür bietet der erbitterte Online-Streit schlagendes Anschauungsmaterial.

Auf Dauer erwarte ich mir die Lösung des Problems weniger von moralischen Appellen als vom Bedarf an Fachkräften in der Wissensgesellschaft. Wer die geistige Potenz einer guten Hälfte der Bevölkerung unterschätzt und brachliegen lässt, betreibt einfach die falsche Bildungs- und Wissenschaftspolitik.



Michael Springer



wichtige onlineadressen

- ▶ **Brainlogs**
Blogs für die Welt im Kopf
www.brainlogs.de

- ▶ **Foto-Scout-Zuse**
Die lernende Bildsuchmaschine für Ihren PC.
www.foto-scout-zuse.com

- ▶ **Kernmechanik – von Kernspin bis Kosmologie, von Dunkler Materie und Energie**
www.kernmechanik.de

- ▶ **KOSMOpod**
Astronomie zum Hören
www.kosmopod.de

- ▶ **Portraits, Interieurs, Landschaften, Figurativa u. a.**
Dipl.-Des. Ewa Kwasniewska
– Kunstmalerin –
www.kwasniewska.com

- ▶ **WISSENSlogs**
Science unplugged
www.wissenslogs.de

Hier können Sie den Leserinnen und Lesern von Spektrum der Wissenschaft Ihre WWW-Adresse mitteilen. Für € 83,00 pro Monat (zzgl. MwSt.) erhalten Sie einen maximal fünfzeiligen Eintrag, der zusätzlich auf der Internetseite von Spektrum der Wissenschaft erscheint. Mehr Informationen dazu von

GWP media-marketing
Susanne Förster
Telefon 0211 61 88-563
E-Mail: s.foerster@vhb.de