

NR 638

GEOkompakt

Die Grundlagen des Wissens

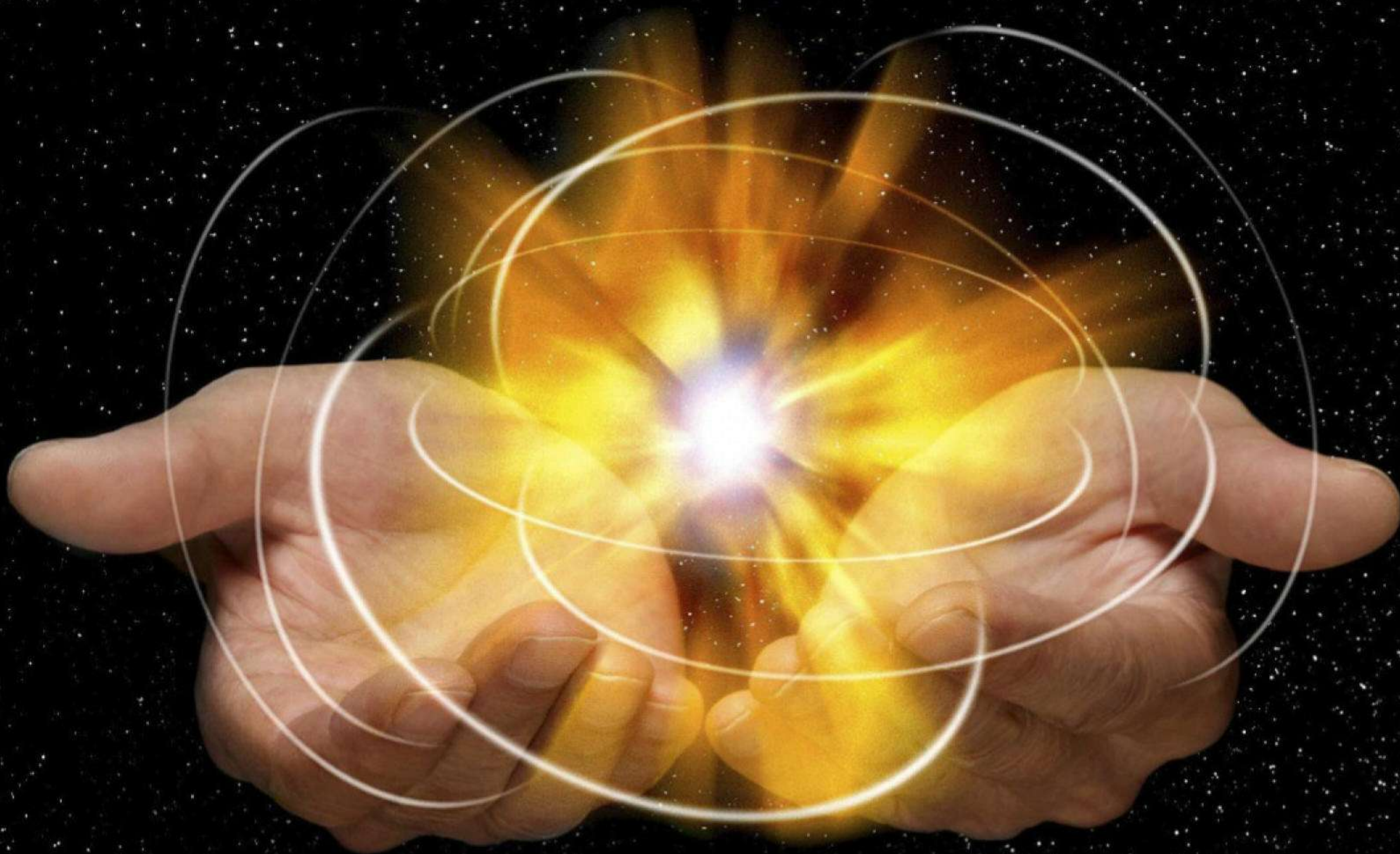
Verschenke
mich zu
Weihnachten!

www.zum-fest-ein-heft.de



Wie *wirklich* ist die **Wirklichkeit?**

Was uns die **Quantenphysik** über die
Natur lehrt – und warum sie unser Verständnis
der Welt herausfordert



Deutschland 11,00 € • Österreich 12,50 € • Schweiz 18,60 sfr • Benelux 12,90 € • Italien/Spanien/Portugal (cont.) 14,90 €

ISBN 978-3-652-01032-0

4 196472 311006

69

Für jeden
das passende
Geschenk

Weihnachten mit G+J

Gesucht? Gefunden!

**Lesefreude unter 50 € für Ihre Lieben oder Sie selbst.
Passendes Magazin wählen:**



4x

GEO KOMPAKT für zzt. 44,-€

Selbst lesen: 204 6195
Verschenken: 204 6194



8x

BRIGITTE MOM für zzt. 36,-€

Selbst lesen: 204 5830
Verschenken: 204 5831



6x

STERN CRIME für zzt. 36,-€

Selbst lesen: 204 5769
Verschenken: 204 5768

+ 2 Prämien zur Wahl:



Bluetooth-Lautsprecher „Ohio“

Maße: ca. 7,5 x 7 x 3,4 cm
1,- € Zuzahlung



GEO-Baumspende

Pflanzen eines Baumes
in Ihrem Namen
Ohne Zuzahlung



Amazon.de-Gutschein, 10,- €

Bücher, DVDs, CDs u. v. m.
Ohne Zuzahlung



Multibag „Sky“

Maße: ca. 41 x 43 x 13 cm,
mit Falt- und Verstaufunktion
1,- € Zuzahlung

**Gleich bestellen! Online mit noch größerer
Magazin- und Prämienauswahl:**



www.verschenk-ein-abo.de/fest

Oder telefonisch unter: +49 (0) 40 / 55 55 78 00



Angegebene Preise inkl. MwSt. und Versand – ggf. zzgl. einmalig 1,- € bzw. 2,- € Zuzahlung für die Prämien. Änderungen vorbehalten. Es besteht ein 14-tägiges Widerrufsrecht. Zahlungsziel: 14 Tage nach Rechnungserhalt. Anbieter des Abonnements ist Gruner + Jahr GmbH. Belieferung, Betreuung und Abrechnung erfolgen durch DPV Deutscher Pressevertrieb GmbH als leistenden Unternehmer.





Liebe Leserin, lieber Leser,

vor gut 100 Jahren startete eine wissenschaftliche Erfolgsgeschichte ohne-
gleichen. Die Erkundung des Mikrokosmos hat zu Erkenntnissen geführt, die
unseren Alltag bis ins Intimste prägen. Ohne Quantenphysik gäbe es keine
moderne medizinische Diagnostik, keinen Laptop und keine Dating-Plattform.

Und doch ringen Naturwissenschaft und Philosophie immer noch darum,
was die mathematischen Formeln – die so wunderbar funktionieren –
uns über das Wesen der Natur verraten. Die Deutungen, die kluge Köpfe
entworfen haben, muten zum Teil bizarr an, sind oft widersprüchlich.
Wohl auch, weil unsere Sprache nicht gemacht ist für Phänomene, die
jenseits der menschlichen Intuition und Logik liegen.

Das hat uns nicht abgeschreckt, sondern vielmehr angespornt, ein ganzes
Heft der Quantenphysik zu widmen. Ganz im Sinne unseres
Interviewpartners, des Wissenschaftsphilosophen Dustin Lazarovici, der sagt:
„Die Ursünde war, zu argumentieren, Quantenmechanik müsse
unverständlich sein.“ (siehe Seite 26)

Wir möchten die schwierige Disziplin vom hohen Sockel des Undurchdring-
baren holen und Ihnen die Rätsel und Schönheit des Quantenreichs
nahebringen. Was bedeutet es etwa für unseren Begriff von Realität, wenn
Elektronen und Atome an mehreren Orten gleichzeitig sein können,
ja wenn sie keine Eigenschaften haben, bevor diese gemessen werden (siehe
Seite 106)? Wie kann es sein, dass Quantenobjekte sich mal wie ein
Teilchen, mal wie eine Welle verhalten (siehe Seite 34)? Und warum existiert
nicht die vollkommene Leere (siehe Seite 116)?

Für diese Ausgabe haben wir den naturwissenschaftlichen Sachverstand
der Redaktion gebündelt: Der eine von uns beiden ist Physiker, der andere
Chemiker; Unterstützung erhielten wir von der Physikerin Lara Hartung,
unserer Volontärin. Uns hat das intellektuelle Abenteuer Quantenphysik
gefesselt und inspiriert. Wir hoffen, dass es Ihnen genauso geht.

GEOkompakt

ABO

GEOkompakt erscheint viermal
pro Jahr. Hier geht's zum Abo:
geo.de/kompakt-im-abo

Martin Scheufens

Martin Scheufens

Klaus Bachmann

Klaus Bachmann

Redaktion GEOkompakt



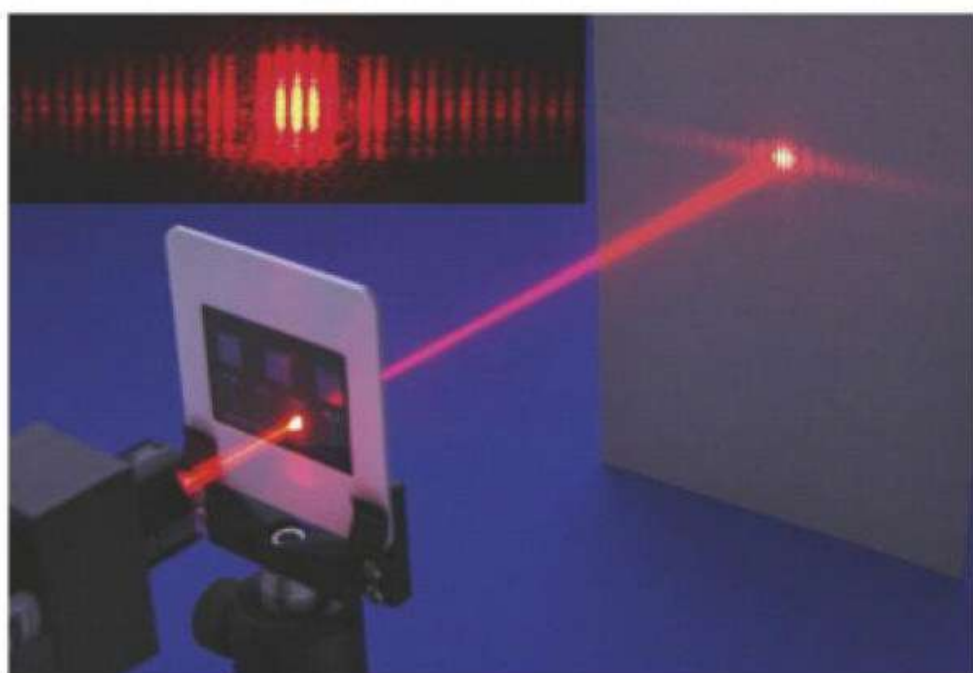
Zuhören lohnt:
Im erfolgreichen
PM-Podcast erklären
zwei Physiker
Phänomene des
Alltags wie auch der
Kosmologie leicht
und verständlich



[50]

Pioniere und Pionierinnen

Fünf Gesichter einer bahnbrechenden Wissenschaft – aus den Gründerjahren bis in die Gegenwart



[34]

Doppelspalt-Experiment

Das ganze Geheimnis der Quantenphysik offenbart sich in einem einfachen Versuch mit einem Strahl aus Licht oder Elektronen

[140]

Glossar

Ein schneller
Wellenritt durch
die wichtigsten
Begriffe
der Theorie



[26]

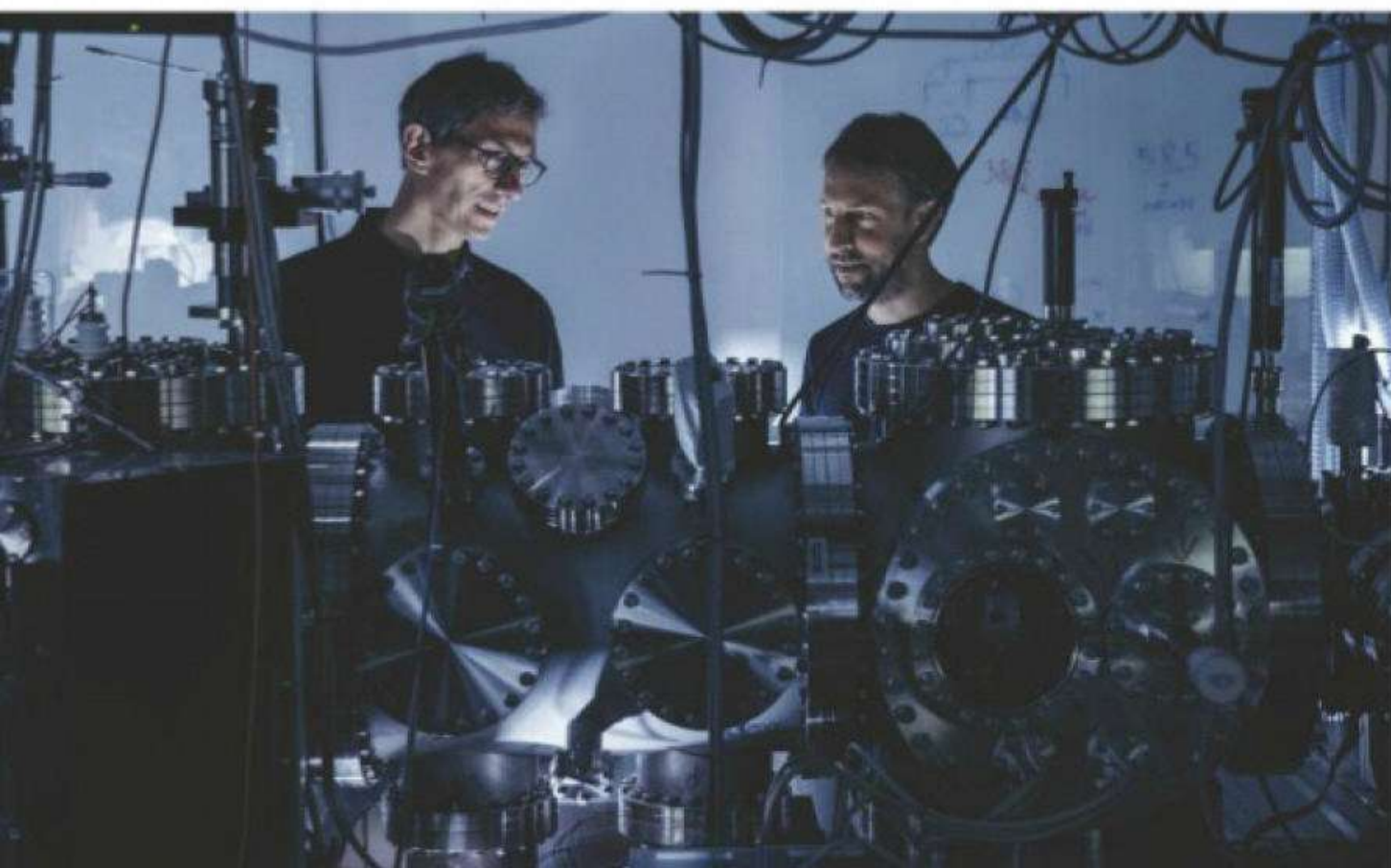
Philosophie

Dustin Lazarovici hält die klassische Deutung der Quantenmechanik für unzulänglich

[106]

Quanten & Realität

Forschende der Universität Wien untersuchen, warum wir im Alltag nichts von den Seltsamkeiten der Mikrowelt spüren



[74]

Esoterik

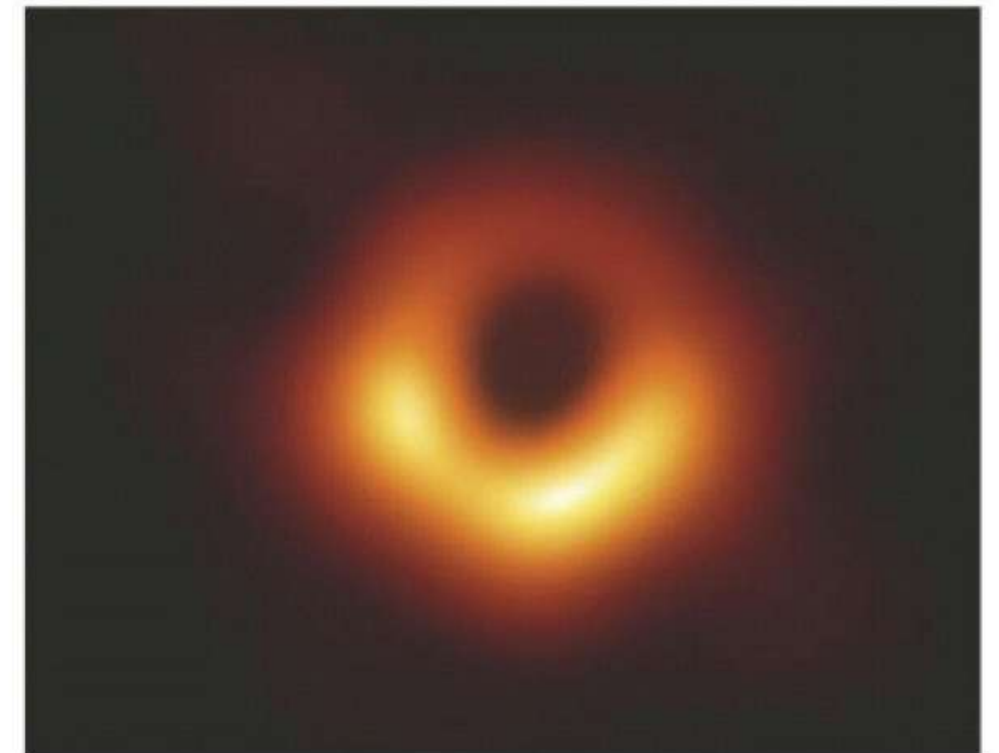
Pseudoheilende und Scharlatane missbrauchen die mysteriös anmutende Quantenphysik



[122]

Schwarze Löcher

Was geschieht am Rand der Massemonster? Die Physik streitet, ob sie umgeben sind von einer Feuerwand oder von weichen Haaren



INHALT

NR. 69

Der Aufstieg der Quantenphysik

Technologie	Wie Quanteneffekte unser Leben erleichtern	06
Zitate	Bemerkenswerte Sätze prominenter Forscher	24
Doppelspalt-Experiment	Das Mysterium der Wellen und Teilchen	34
Solvay-Konferenz 1927	Als Einstein und Bohr aufeinandertrafen	40
Unschärferelation	Warum die Wissenschaft nicht alles wissen kann	48
Pioniere und Pionierinnen	Diese fünf haben Meilensteine gesetzt	50
Quantencomputer	Diese Maschine weckt große Hoffnungen	62
Biologie	Hier schlägt der Quantenpuls des Lebens	96

Wie die Theorie uns herausfordert

Philosophie	Was die Quantenphysik erklärt – und wo sie versagt	26
Esoterik	Wenn Quanteneffekte angeblich heilen	74
QBismus	Erschaffen erst wir Menschen eine – subjektive – Realität?	80
Verschränkung	Die »spukhafte Fernwirkung« von Teilchen ist bewiesen	86
Quanten & Realität	Wie wirklich ist das Fundament unserer Welt?	106
Das Nichts	Im vermeintlich leeren Raum brodelt es	116
Schwarze Löcher	Wo Raum und Zeit zusammenbrechen	122
Quantengravitation	Auf der Suche nach der Theorie, die alles erklärt	128
Glossar	Die wichtigsten Begriffe kurz und knapp erklärt	140

(Fett und kursiv gesetzte Wörter in den Texten des Heftes verweisen auf die Stichwörter des Glossars)

Die Welt von GEO 146 Impressum, Bildnachweis 79

Alle Daten und Fakten sind vom Verifikations- und Rechercheteam im Quality Board auf ihre Präzision, Relevanz und Richtigkeit überprüft worden. Kürzungen in Zitaten werden nicht kenntlich gemacht. Redaktionsschluss dieser Ausgabe: 12. November 2021. Weitere Informationen zum Thema und Kontakt zur Redaktion: www.geokompakt.de. Titelbild: Victor De Schwanberg/Science Photo Library



[96]

Biologie

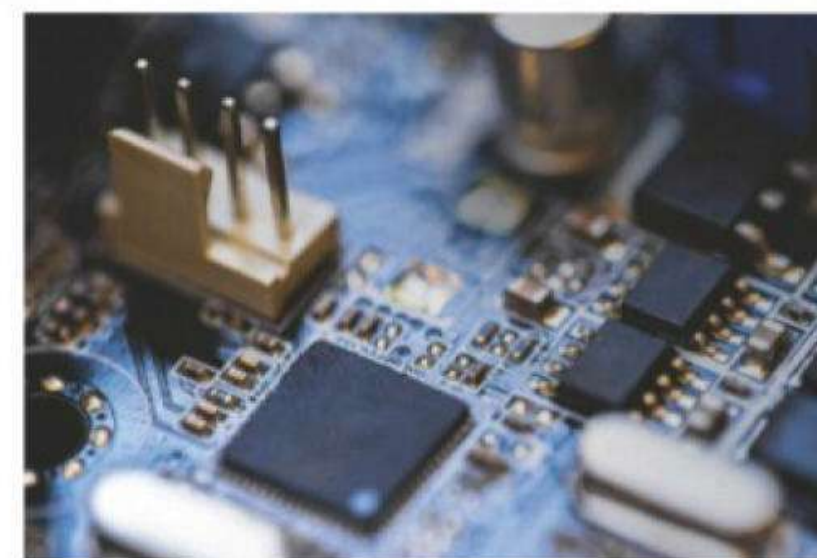
Wohl mit einem Quantenkompass orientieren sich Vögel in ihrer Lebenswelt



[80]

QBismus

Objektiv können wir die Welt niemals erfahren, sagt Christopher Fuchs



[06]

Technologie

Quantenphysik ist nicht bloß Theorie: Sie prägt massiv unser Leben, etwa in der Mikroelektronik



LEUCHTENDE ZUKUNFT

Forschende der Technischen Universität Braunschweig arbeiten daran, auf Halbleiterscheiben eine große Zahl winziger LEDs zu platzieren. Mit den Mikro-Lichtquellen wollen sie Ionen ansteuern, die als kleinste Recheneinheiten eines Quantencomputers, als Qubits, fungieren



Schöne

Die Quantentheorie gibt uns seit mehr als 100 Jahren Rätsel auf. Zugleich war sie Grundlage für bahnbrechende Neuerungen, die das moderne Leben prägen. Und in Labors weltweit arbeiten Wissenschaftler und Wissenschaftlerinnen an der nächsten Innovation

neue

Texte: Klaus Bachmann, Lara Hartung,
Theresa Palm, Martin Scheufens

Quanten-

Welt

DIE BAUSTEINE DER NATUR ERTASTEN UND ERBLICKEN

Erfunden 1981 in Rüschlikon / Schweiz

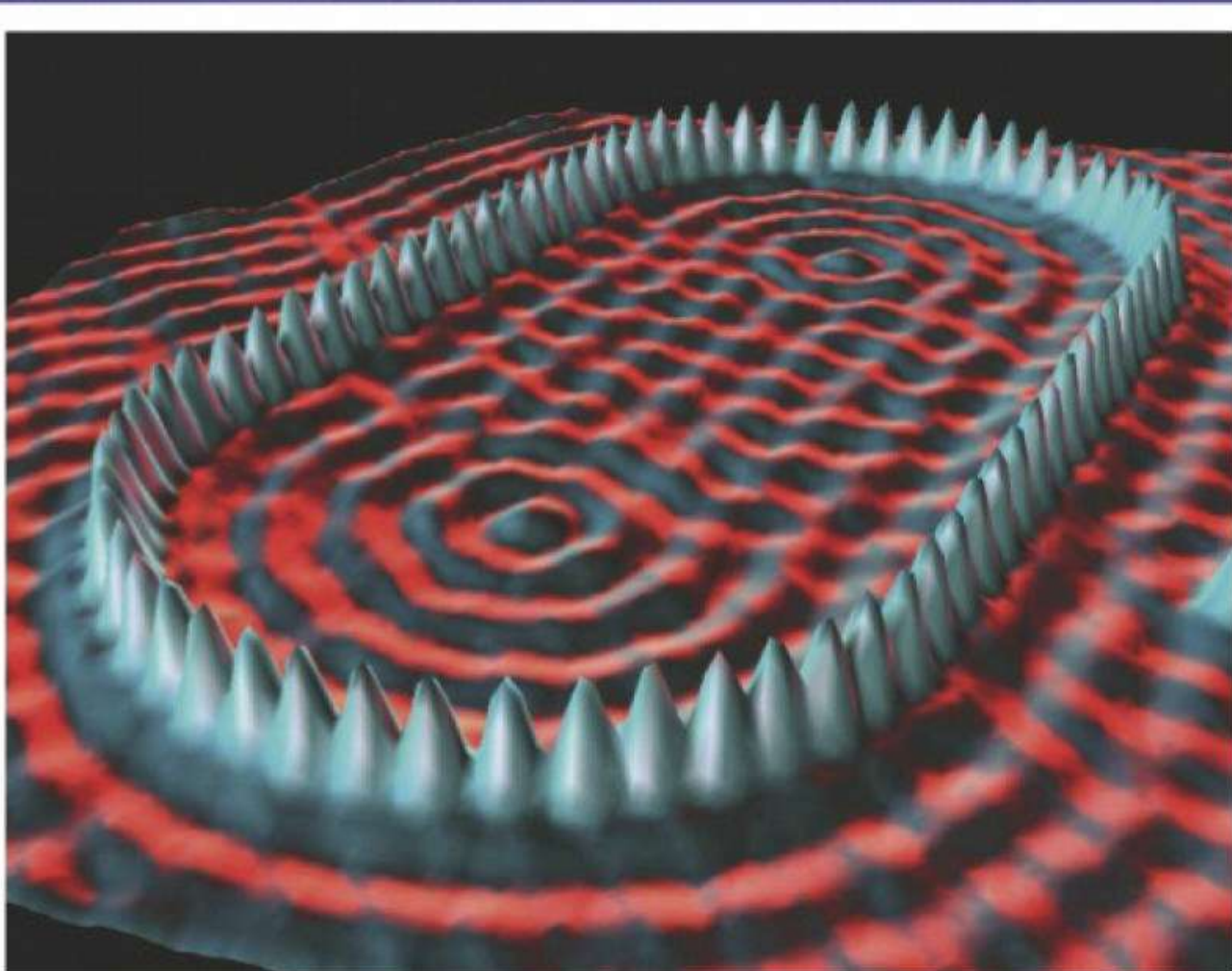
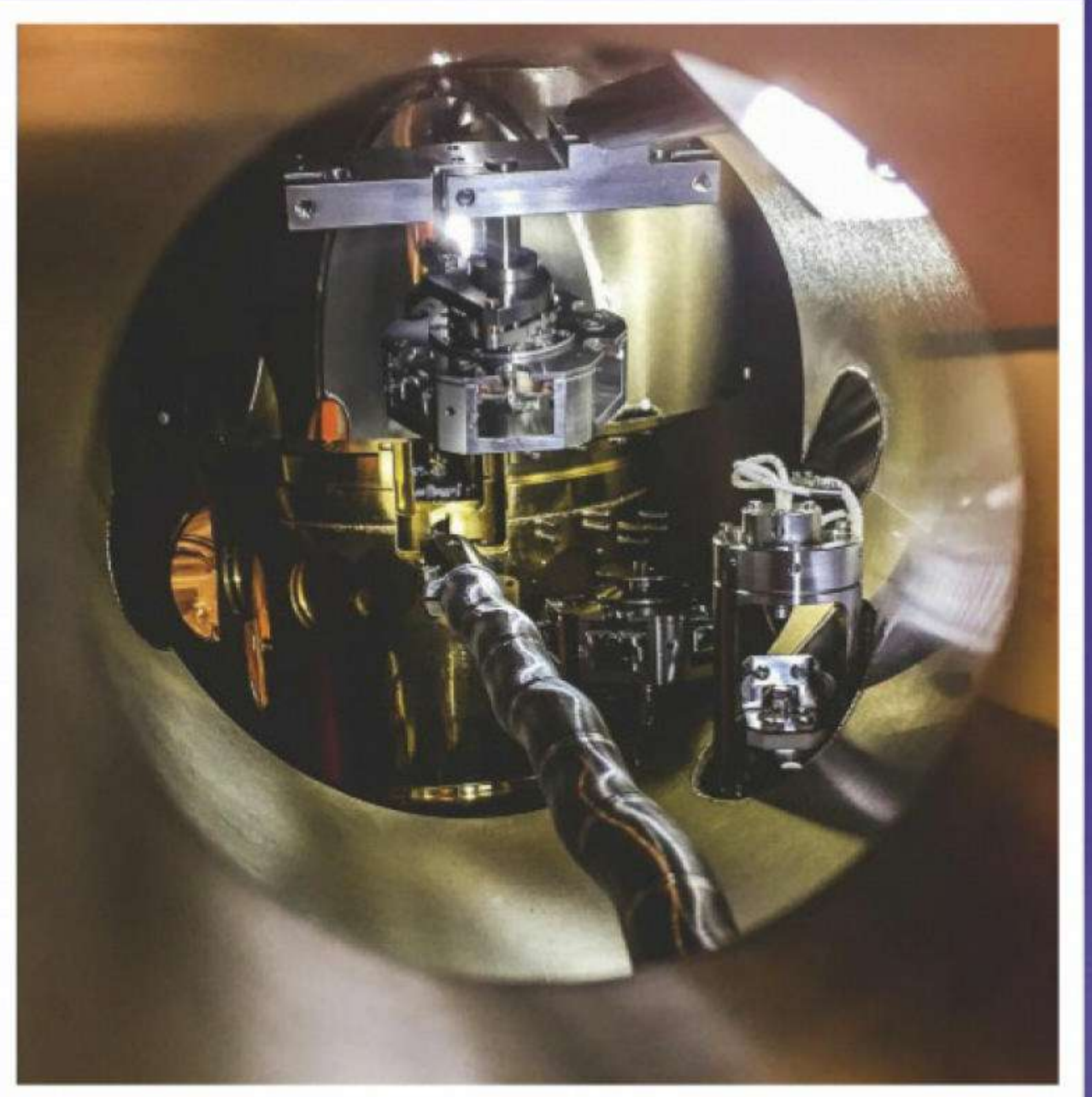
Jedes Schulkind lernt heutzutage, dass sich die Welt aus kleinen Bausteinen zusammensetzt. Doch das Wissen bleibt abstrakt, da wir Atome nicht direkt sehen können: Die Wellenlängen des sichtbaren Lichts sind zu groß, um die winzigen Objekte zu erfassen. Allerdings lassen sich Atome ertasten!

Den Blick auf die Mikrowelt ermöglichen etwa **RASTERTUNNELMIKROSKOPE**: Ähnlich einem Schallplattenspieler wandert bei ihnen eine Nadel über eine Oberfläche. Die Spitze nimmt dabei noch die feinsten Strukturen der Probe wahr – selbst einzelne Atome sowie die Fugen zwischen ihnen.

Die Spitze berührt die Oberfläche nicht, das würde sie zerstören. Doch wenn sie nahe genug dran ist, springen dank des quantenphysikalischen **Tunneleffekts** Elektronen von der Probe auf die Spitze. Aus dem Fluss der Elektronen leiten Forschende die Ausdehnung der Atome ab – und erstellen auf diese Weise ein Höhenprofil.

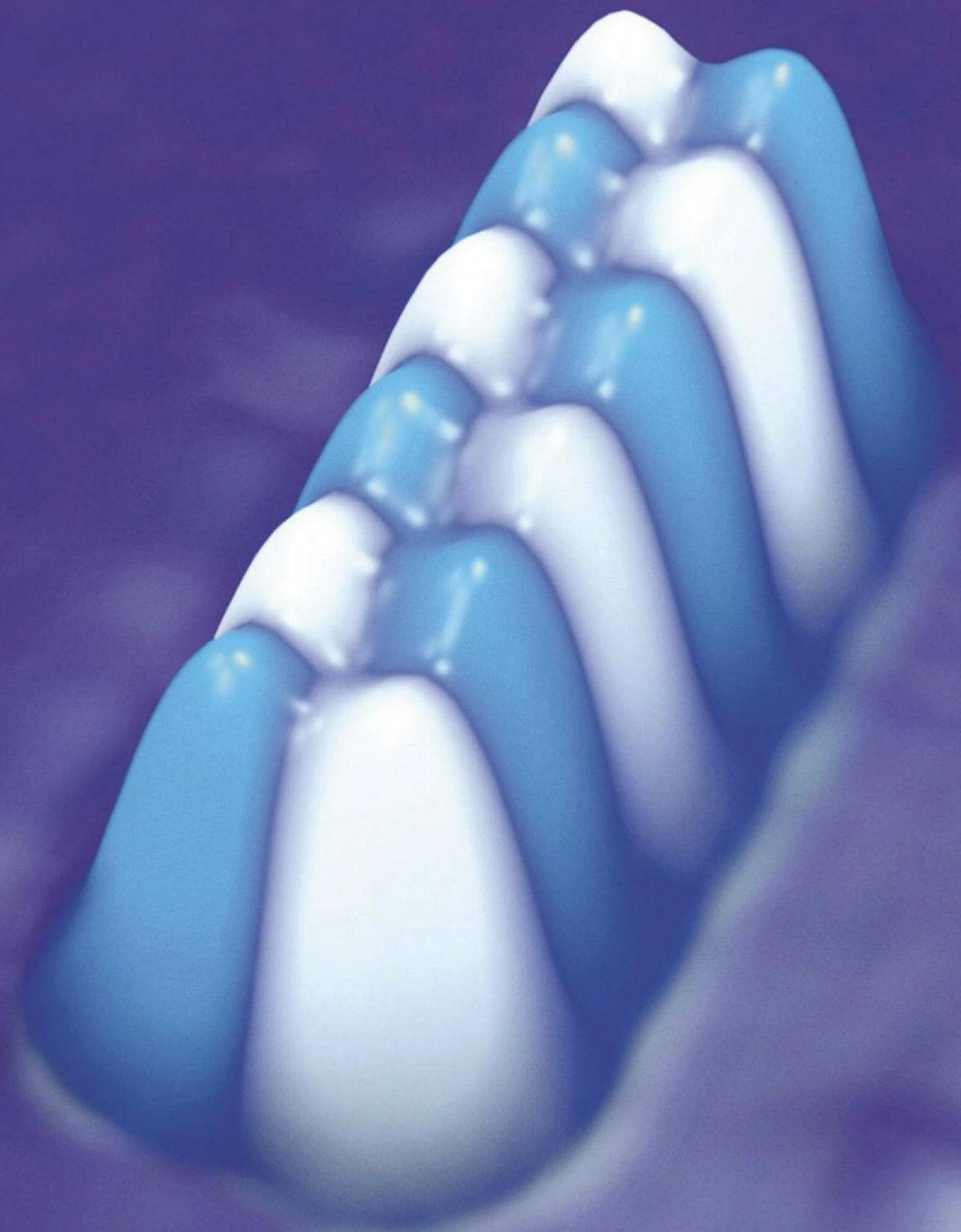
DIE MASCHINE

Für präzise Aufnahmen arbeiten Rastertunnelmikroskope meist im Vakuum. Die Spitze mitsamt der zu untersuchenden Probe befindet sich hier innerhalb des goldenen Rings



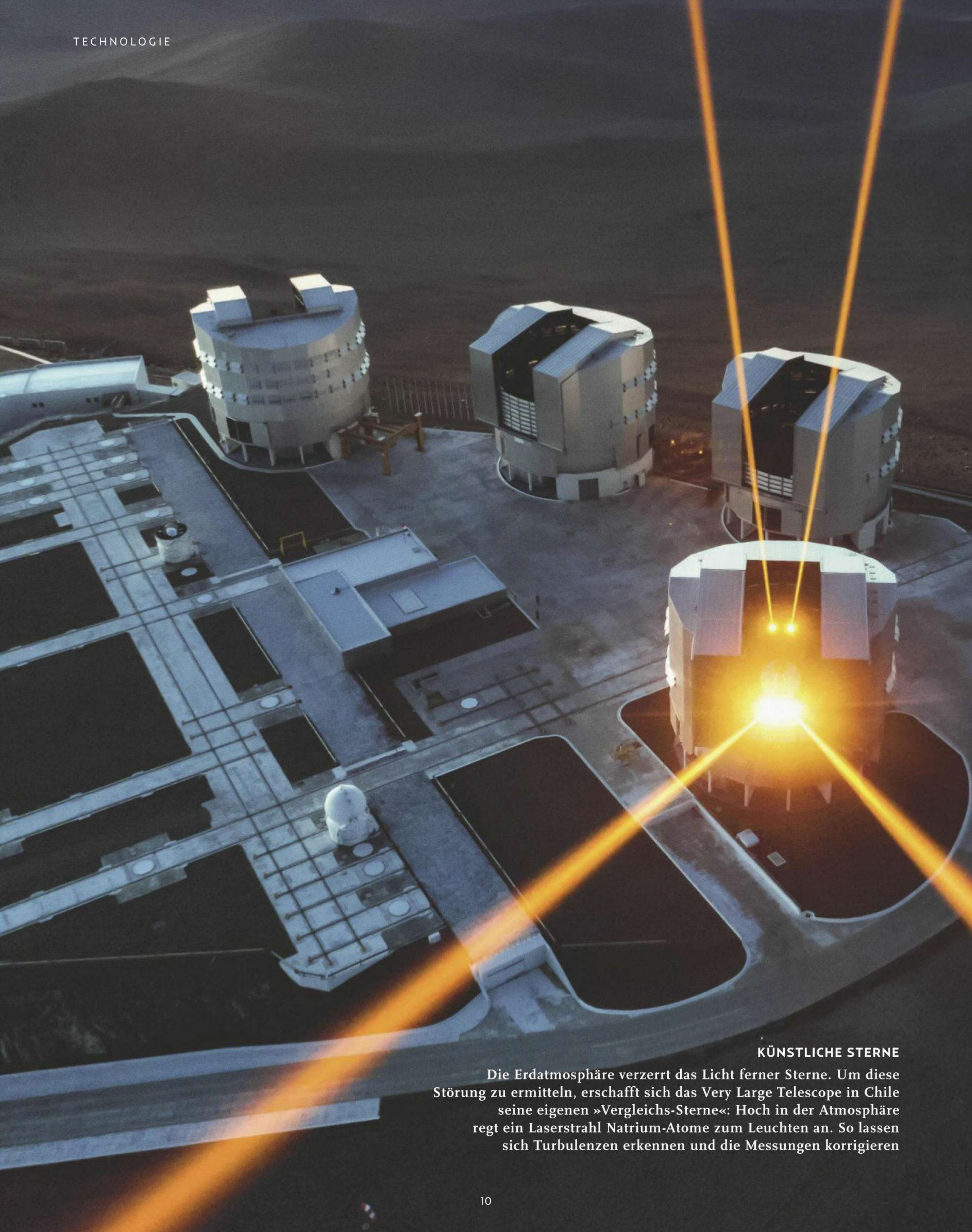
DIE SPIELEREI

Mit der Spitze lassen sich Atome anheben und zu Mustern zusammensetzen – hier bilden Eisenatome ein Oval auf einer Kupferoberfläche



DAS FOTO

Atome existieren tatsächlich: Zwölf Eisenatome formen einen Cluster ähnlich einer Mini-Gebirgskette. Die Aufnahmen eines Rastertunnelmikroskops sind monochrom und werden nachträglich eingefärbt



KÜNSTLICHE STERNE

Die Erdatmosphäre verzerrt das Licht ferner Sterne. Um diese Störung zu ermitteln, erschafft sich das Very Large Telescope in Chile seine eigenen »Vergleichs-Sterne«: Hoch in der Atmosphäre regt ein Laserstrahl Natrium-Atome zum Leuchten an. So lassen sich Turbulenzen erkennen und die Messungen korrigieren

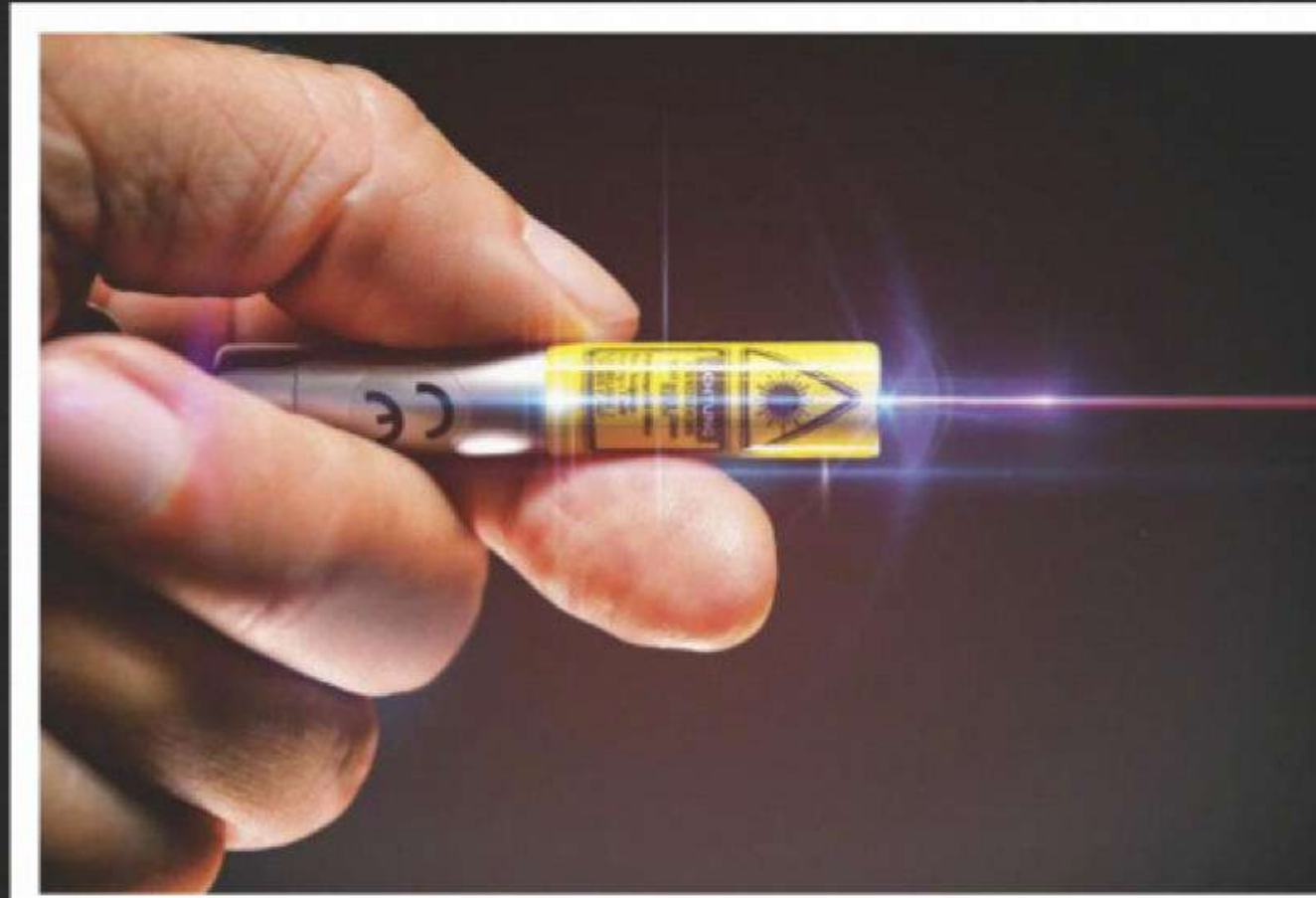
MIT DER MACHT DES VEREINTEN LICHTS

Erfunden 1960 in Malibu / USA

A

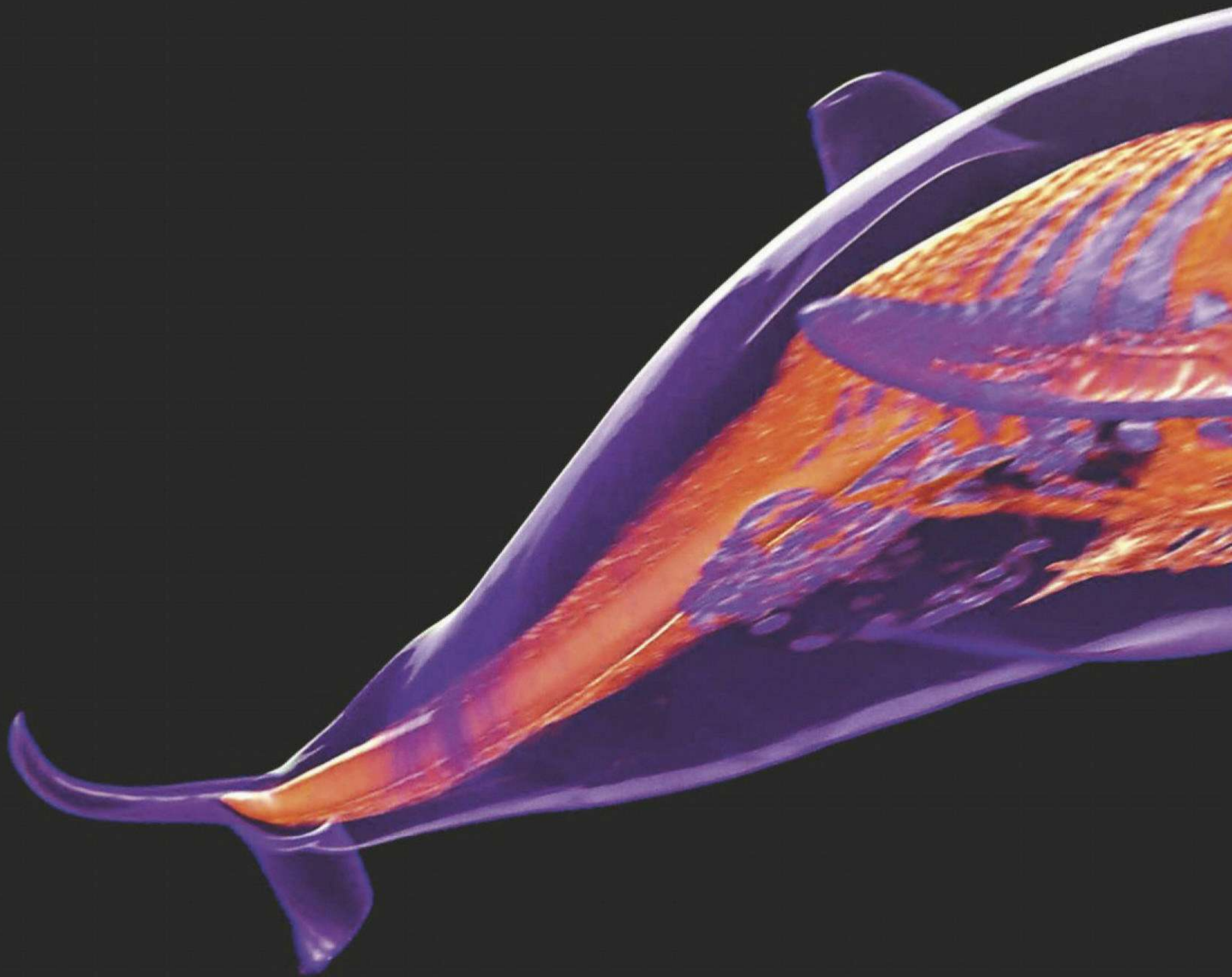
Is der **LASER** erfunden wurde, wusste zunächst niemand so recht, was man damit anfangen sollte – er sei »eine Lösung, die Probleme sucht«, hieß es. Heute gelten Laser als eine der bedeutendsten Erfindungen seit dem Zweiten Weltkrieg: Sie schneiden durch dicke Stahlplatten, helfen bei Operationen am Auge oder lesen kontaktfrei DVDs aus. Selbst Smartphones haben mittlerweile einen kleinen Laser, um 3-D-Fotos zu schießen.

Anders als das Licht einer Glühlampe ist Laserlicht extrem gleichförmig. Es entsteht, wenn ein Elektron seine Bahn innerhalb der Atomhülle wechselt: Zunächst wird es durch eine Energiequelle angeregt, sodass es sich auf einen Zustand höherer Energie begibt, um dann auf sein Ursprungsniveau zurückzufallen. Der Trick beim Laser: Durch geschickte Anregung gibt eine große Zahl von Atomen Licht mit der gleichen Farbe im gleichen Takt ab – und auch in dieselbe Richtung. Das Ergebnis ist ein feiner, präziser und teils extrem energiereicher Lichtstrahl.



QUANTENTECHNIK FÜR ALLE

Laserpointer helfen bei Präsentationen. Doch die Strahlen selbst dieser kleinen, aber gleichwohl hellen Lichtquellen können Augen schädigen



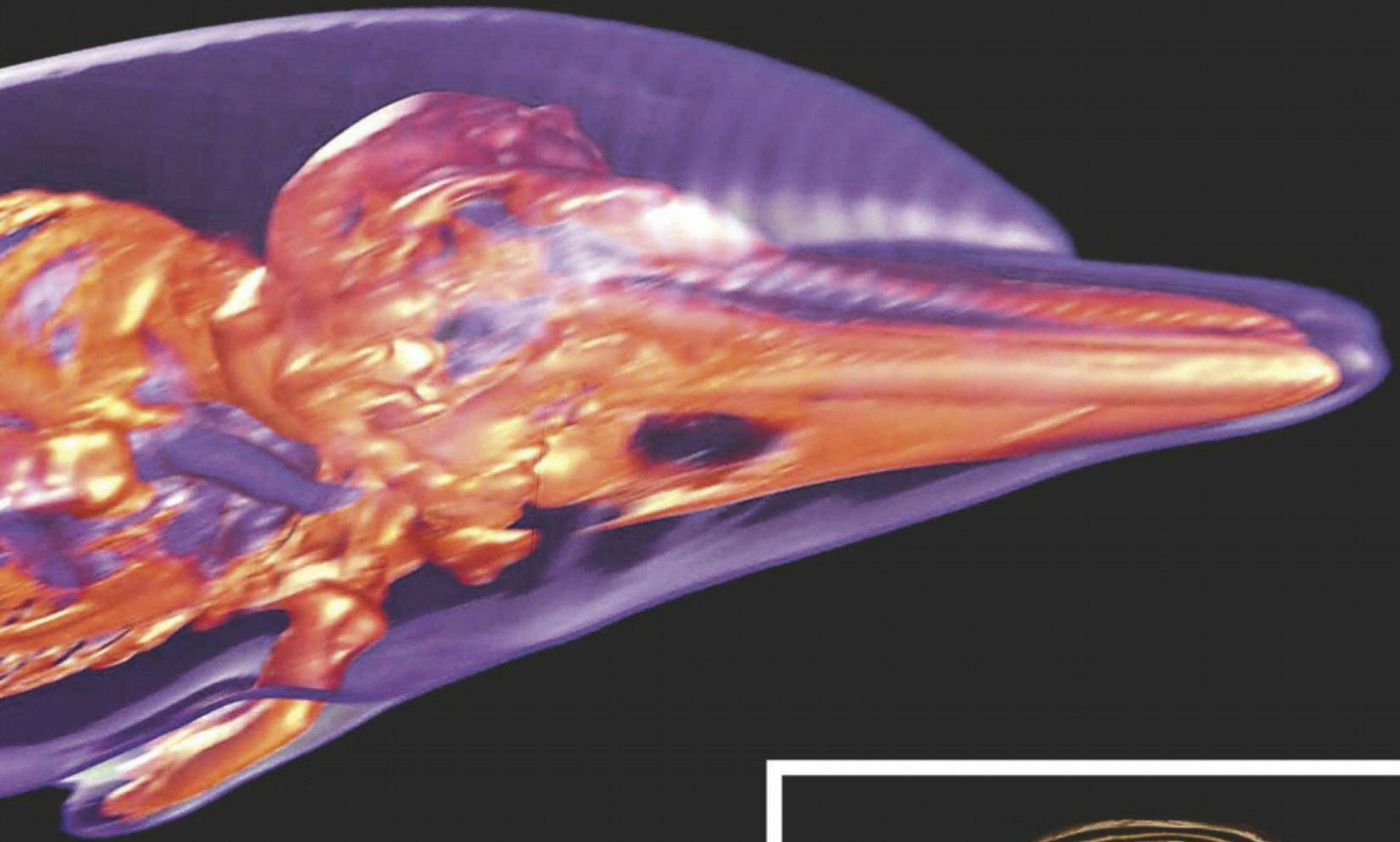
KREISEL OFFENBAREN DAS INNERSTE

Erfunden 1971 in New York / USA

A

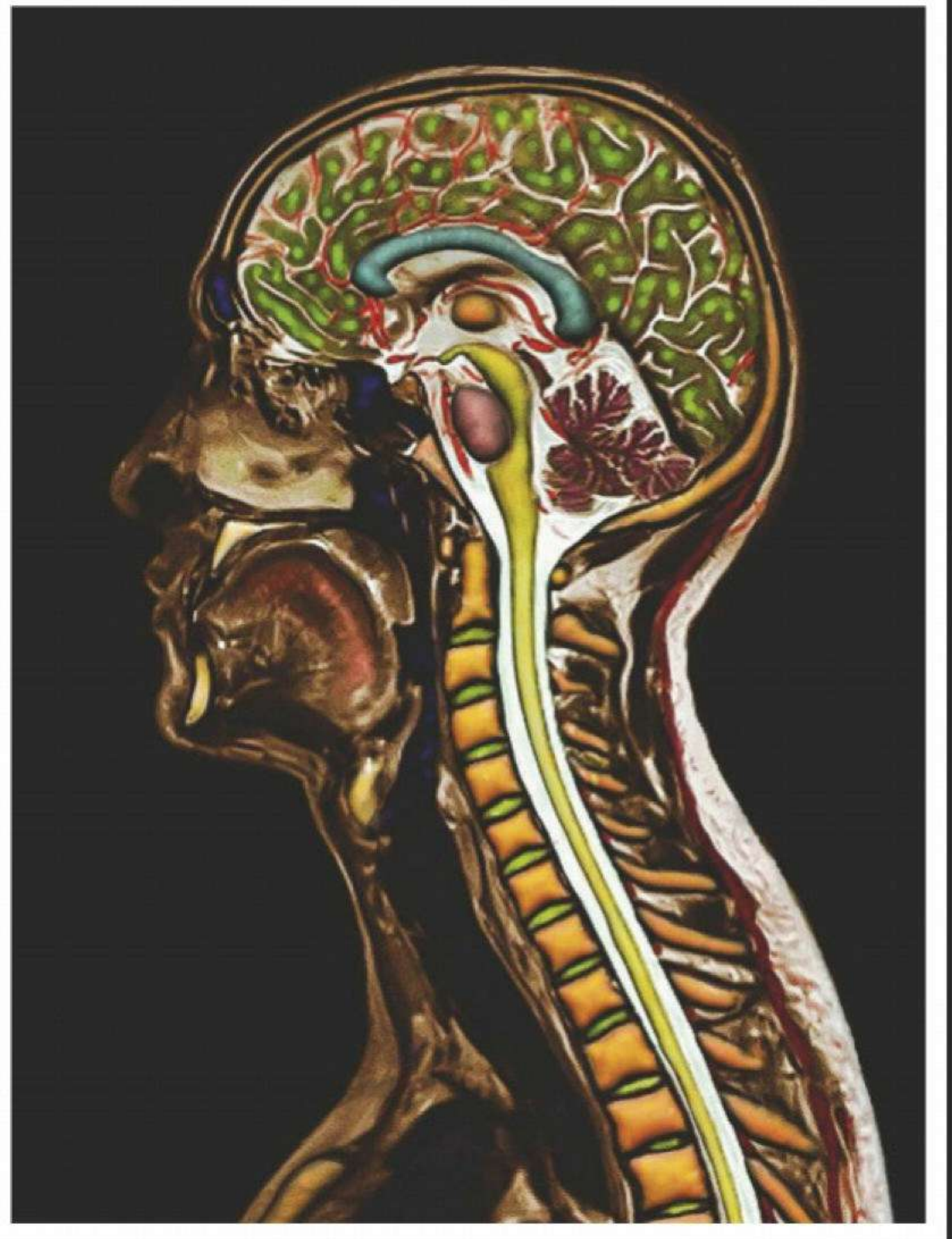
uf Röntgenbildern sieht man Knochen – und im **MAGNETRESONANZTOMOGRAFEN** (MRT) auch den Rest. MRT-Bilder geben feinste Strukturen von Weichteilen wieder. Sie helfen, Gehirne, Gelenke und Tumoren zu untersuchen. Und ein MRT kommt ohne schädliche Strahlung aus. Denn das MRT regt Atome im Körper mit unbedenklichen Radiowellen an. Dafür benutzt es ein Magnetfeld, das in üblichen Klinikgeräten etwa 30 000-mal stärker ist als das der Erde. Atome richten sich darin aus wie Kompassnadeln. Für eine Aufnahme stupsen Radiopulse die Atome an. Sie kreiseln dann um die Richtung des Magnetfelds und strahlen selbst Radiowellen aus.

Das funktioniert dank Quanteneigenschaften: Wasserstoff und andere Atome haben einen Quantendrehimpuls, den Kernspin. Er macht die Atome empfänglich für Radiowellen und lässt sie auch solche abgeben. Wer in der Röhre liegt, wird also kurz selbst zum Sender.



BUNTER QUERSCHNITT

Im eingefärbten MRT-Bild heben sich Gehirnstrukturen deutlich ab (rechts): dunkelrot das Kleinhirn und gelb der Hirnstamm, der ins Rückenmark übergeht. Die gleichfalls kolorierte Resonanzaufnahme des Delfins offenbart dessen Knochengerüst





HERRSCHER ÜBER UNSERE ZEIT

Die vier Atomuhren der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt in Braunschweig sind unser Taktgeber: Nach ihrer Vorgabe ticken etwa alle Bahnhofsuhren



UNSERE ZEIT IM TAKT DER ATOME

Erfunden 1949 in Washington D.C. / USA

Fast alle Uhren funktionieren nach dem gleichen Prinzip: Man nehme eine Bewegung, die sich regelmäßig wiederholt – etwa die Erddrehung oder das Schwingen eines Pendels. Dann werden die Wiederholungen gezählt. Je kürzer und gleichmäßiger die Bewegung, desto genauer die Uhr.

Die zurzeit genauesten Uhren arbeiten mit Atomen – meist Cäsium. Die Atome können nicht jede beliebige Energie besitzen, sondern nur ganz bestimmte Niveaus einnehmen. Wechseln sie zwischen zwei Energiestufen, absorbieren oder senden sie Mikrowellen spezifischer Frequenzen. **ATOMUHREN** bestimmen äußerst präzise die Frequenz der Mikrowellenstrahlung, bei der die Cäsium-Atome ihren Energiezustand wechseln. Aus der Frequenz dieser Strahlung ergibt sich die Sekunde: Wenn die Mikrowelle exakt 9 192 631 770 Mal auf- und abgeschwungen ist, ist eine Sekunde verstrichen. Solche höchst genauen Zeitmesser sind heute unabdingbar: Jeder GPS-Satellit besitzt einen – ohne ihn könnte das Navigationssystem unsere Position nur unscharf bestimmen.



EIN LAND WILL HOCH HINAUS

In Chinas ältestem Weltraumbahnhof Jiuquan in der Wüste Gobi hebt am 16. August 2016 der weltweit erste Quantenkommunikations-satellit – Micius – auf einer Langen-Marsch-Rakete ab



SCHALTSTELLE IM ALL

Das Technikteam legt zwei Wochen vor dem Start letzte Hand an den Satelliten Micius, der benannt ist nach einem chinesischen Philosophen aus dem 5. Jahrhundert v. Chr.

SICHER KOMMUNIZIEREN MIT QUANTEN

Gestartet 2016 in Jiuquan / China

D

ie Absonderlichkeiten der Quantenwelt erlauben es, Informationen »unknackbar« zu übertragen. Das dabei genutzte Phänomen ist die Verschränkung, bei der Teilchen miteinander verbunden bleiben, selbst wenn sie Lichtjahre voneinander entfernt sind. Sie ermöglicht es, Verschlüsselungen zu erzeugen, bei denen sofort auffällt, wenn ein Unbefugter sie zu knacken versucht. Weltweit arbeiten Physikerinnen, Informatiker und Technikerinnen mit Hochdruck daran, **QUANTEN-KOMMUNIKATIONSNETZE** aufzubauen. Vor allem China legt ein enormes Tempo vor. 2016 startete das Land den Satelliten Micius und bewies, dass die Übertragung des »Quantenschlüssels« mit verschränkten Photonen über Hunderte Kilometer durch die Atmosphäre möglich ist. Mit Hilfe des Raumflugkörpers knüpfte ein Team ein Netzwerk, das 2021 über 150 Computer in teils Tausende Kilometer entfernten Städten verbindet. Quantenkommunikation ist aufwendig und wird eher nicht im privaten Bereich, sondern vorerst bei Banken, Behörden und Militärs verwendet.



IM EINSATZ

Oben links: Ein Pariser Forschungsteam testet sein schwebendes Skateboard. Oben rechts: Ein supraleitendes Kabel ersetzt unter der Innenstadt von Essen ein klassisches Hochspannungskabel. Zwar nur auf einem Kilometer Länge, aber das ist trotzdem ein Rekord. Unten: Im Teilchenbeschleuniger LHC am CERN halten supraleitende Magnete die Partikel auf Kurs

ELEKTRONEN IM EINKLANG

Entdeckt 1911 in Leiden / Niederlande

W

o Strom fließt, geht elektrische Energie als Wärme verloren – das galt einst wie ein Naturgesetz. Doch bei Supraleitern verschwindet auf wundersame Weise der elektrische Widerstand. Dank Quantenphysik marschieren die Elektronen im Gleichschritt durch das Material, ohne mit den Atomen auf ihrem Weg zu kollidieren.

SUPRALEITER besitzen außergewöhnliche elektrische und magnetische Eigenschaften. Allerdings gibt es einen Haken: Bislang müssen Supraleiter auf rund minus 200 Grad Celsius gekühlt werden. Immer höhere Temperaturrekorde mit neuen Materialien nähren jedoch die Hoffnung, dass eines Tages Supraleiter auch unter Alltagsbedingungen funktionieren werden: um medizinische Geräte zu verbessern, um neue Fahrzeugtypen zu entwickeln oder um angesichts des Klimawandels schlicht Strom zu sparen.

IN DER SCHWEBE

Das starke Magnetfeld eines Supraleiters lässt ein Objekt schweben. Die Schwaden stammen vom verdampfenden Stickstoff, der den Supraleiter kühlt

The image shows a vertical hydroponic growing system. Two levels of plants are visible, growing in black trays. The plants have green leaves and some have reddish stems. Above the plants are two long, horizontal LED light strips that are illuminated, casting a bright white light. The background is dark, making the plants and lights stand out.

LEUCHTEN FÜR DAS 21. JAHRHUNDERT

Erfunden 1992 in Nagoya / Japan

Das Ende der Glühbirne kam mit der Erfindung der blauen Leuchtdiode (LED). Die hellen Lämpchen gab es in Rot und Grün schon seit den 1960er Jahren. Doch ohne blaue LEDs ließ sich kein weißes Licht mischen. Als dies gelang, war es »ein großes Versprechen für mehr als 1,5 Milliarden Menschen, die keinen Zugang zum Stromnetz haben«, fand das Nobelkomitee 2014, als es die Entwicklung auszeichnete. Denn **LEUCHTDIODEN** halten länger und sind bis zu 20-Mal effizienter als Glühbirnen, sodass sie sich mit Solarmodulen betreiben lassen.

Ein gezielt herbeigeführter Quanteneffekt macht LEDs so sparsam: In der Diode liegen speziell präparierte Halbleiterschichten aufeinander. Eine Schicht besitzt einen Überschuss positiver Ladungen, eine andere einen Überschuss negativer Elektronen. Wenn Spannung an der LED anliegt, wandern die Ladungen und vereinigen sich. Die dabei frei werdende Energie wird als Licht abgestrahlt. Je höher die Energiestufe, desto energiereicher und blauer ist das Licht.



GEWÄCHSHAUS IM KELLER

Roter Blattsenf, Radieschen und Zitronenmelisse
gedeihen im LED-Schein unter der Erde

IMMER KLEINER, IMMER SCHNELLER

Die Zahl der Transistoren in den Herzstücken von Computern, den Prozessoren, ist gigantisch gewachsen. Inzwischen finden mehr als 300 Millionen solcher Schalteinheiten Platz auf einem Quadratmillimeter

VIEL RECHENKRAFT AUF WENIG PLATZ

Erfunden 1947 in Murray Hill / USA

E

isen leitet Strom, weil seine Elektronen frei fließen. Glas wiederum leitet nicht, in ihm sind die Elektronen fest an Atome gebunden. Das Beste aus beiden Welten verbinden Halbleiter: Sie haben in den vergangenen Jahrzehnten den phänomenalen Aufstieg der Computertechnologie ermöglicht.

Bei Halbleitern wie Silizium sind Elektronen zwar an die Atome gebunden; erhalten die Elektronen jedoch etwa durch Wärme Energie, können sie ausbrechen und sich frei bewegen. Genau dies machen sich **TRANSISTOREN** zunutze: Sie legen eine elektrische Spannung an den Halbleiter und verwandeln ihn so in Sekundenbruchteilen und auf Knopfdruck vom Nicht-Leiter zum Leiter – und umgekehrt. Transistoren bilden die grundlegende Einheit von Computern: Sie ermöglichen den Wechsel zwischen »Strom an« und »Strom aus«, der dem Computer das Rechnen in Nullen und Einsen erlaubt. Da sich auf einem Siliziumchip Milliarden Transistoren in hochkomplexen Konfigurationen aufbringen lassen, findet Mikroelektronik heute auch in unserer Hosentasche Platz.

»Die Quanten sind eine hoffnungslose Schweinerei«

—Max Born

Selbst die Begründer der Quantenphysik hatten ein zwiespältiges Verhältnis zu ihrer Entdeckung

»Die Quantentheorie ist so ein wunderbares Beispiel dafür, dass man einen Sachverhalt in **völliger Klarheit verstanden haben kann** und gleichzeitig doch weiß, dass man nur in Bildern und Gleichnissen von ihm reden kann.«

—Werner Heisenberg

»Wenn es bei dieser **verdammt Quantenspringerei** bleiben soll, so bedaure ich, mich mit der Quantentheorie überhaupt befasst zu haben.«

—Erwin Schrödinger

»Die Quantenmechanik ist **sehr achtungsgebietend. Aber eine innere Stimme sagt mir, dass das noch nicht der wahre Jakob ist. Die Theorie liefert viel, aber dem Geheimnis des Alten (Gott) bringt sie uns kaum näher. Jedenfalls bin ich überzeugt, dass der nicht würfelt.**«

—Albert Einstein

»Einstein sagte, wenn die Quantenmechanik stimmt, dann ist die Welt verrückt. Nun, Einstein hatte recht. **Die Welt ist verrückt.**«

—Daniel M. Greenberger

»Ich glaube, ich kann mit Sicherheit sagen, dass **niemand die Quantenmechanik versteht.**«

—Richard Feynman

»Wenn ich von **Schrödingers Katze höre, greife ich nach meiner Waffe.**«

—Stephen Hawking

»So stimmen die Relativitätstheorie und die Quantentheorie doch beide in der Notwendigkeit überein, die Welt als ein **ungeteiltes Ganzes anzuschauen**, worin alle Teile des Universums einschließlich des Beobachters und seiner Instrumente zu einer einzigen Totalität verschmelzen und sich darin vereinigen.«

—David Bohm

»Wir dachten immer, wenn wir eins kennen, dann kennen wir auch zwei, denn eins und eins macht zwei. Jetzt finden wir heraus, dass **wir vorher lernen müssen**, was ›und‹ bedeutet.«

—Arthur Eddington

»Wohl keine Entwicklung der modernen Wissenschaft hat das menschliche Denken nachhaltiger beeinflusst als die Geburt der Quantentheorie. Jäh wurden die Physiker eine Generation vor uns aus **jahrhundertealten Denkmustern herausgerissen** und fühlten sich zur Auseinandersetzung mit einer

neuen Metaphysik aufgerufen. Bis zum heutigen Tag währen die Qualen, die dieser Prozess der Neuorientierung bedeutete. Im Grunde haben die Physiker einen **schweren Verlust** erlitten: Sie verloren ihren Halt in der Realität.«

—Bryce DeWitt und Neill Graham

»Ich weiß viel. Ich weiß zu viel. Ich bin ein Quantengreis.«

—Wolfgang Pauli

»Was wir heutzutage aus der Sprache der Spektren heraushören, ist eine wirkliche **Sphärenmusik des Atoms**. Alle ganzzahligen Gesetze der Spektrallinien und der Atomistik fließen letzten Endes aus der Quantentheorie. Sie ist das geheimnisvolle Organon, auf dem die Natur die Spektralmusik spielt und nach dessen Rhythmus sie den Bau der Atome und der Kerne regelt.«

—Arnold Sommerfeld

»Wenn meine Studenten **deprimiert sind von der Welt, sage ich ihnen oft, dass es zwei Dinge gibt, die mein Leben lebenswert machen: Mozart und die Quantenmechanik.**«

—Victor Weisskopf

MEHR ZEIT FÜR DAS WESENTLICHE

Lernen Sie Cicero, das Magazin für politische Kultur, kostenlos kennen.



CICERO
KOSTENLOS
TESTEN

JETZT CICERO, DAS MAGAZIN FÜR POLITISCHE KULTUR, GRATIS TESTEN

WWW.CICERO.DE/PROBE | TEL: 030 - 3 46 46 56 56

Bei telefonischer Bestellung bitte die Bestell-Nr. 1908456 angeben. Es besteht ein 14-tägiges Widerrufsrecht. Anbieter des Abonnements ist die Res Publica Verlags GmbH. Belieferung, Betreuung und Abrechnung erfolgen durch DPV Deutscher Pressevertrieb GmbH als leistenden Unternehmer.

»Das ist in vielen Punkten gehobener Unsinn«

Die Ursünde der Quantenmechanik liege im Postulat, sie sei unverständlich, sagt der Wissenschaftsphilosoph **Dustin Lazarovici**. Dass uns vieles so rätselhaft erscheint, was im Kleinsten passiert, beruhe nicht auf irren Zufällen – sondern darauf, dass wir die Zusammenhänge noch immer nicht vollständig begreifen und einordnen können

Interview: Tobias Hürter
Fotos: Philip Frowein

Dustin Lazarovici glaubt fest daran, dass Physik,
Philosophie und Mathematik uns der Wahrheit
und Schönheit im Universum näherbringen können



GEOkompakt: *Die Quantenmechanik gilt als besonders rätselhafte Theorie – und als besonders genaue. Können Sie uns die Theorie erklären?*

DUSTIN LAZAROVICI: Rein mathematisch gesehen ist die Sache klar. Die Quantenmechanik mit ihrer zentralen Gleichung, der Schrödinger-Gleichung, beschreibt eine Wellenfunktion, also eine Art Schwingung. Wenn man diese **Wellenfunktion** so deutet, dass sie Wahrscheinlichkeiten für mögliche Messergebnisse liefert, dann erhält man Vorhersagen, die empirisch hervorragend bestätigt sind. Mit diesen Vorhersagen ist die Quantenmechanik unglaublich erfolgreich. Sie hat zu einer Fülle neuer Phänomene und technischer Anwendungen geführt. Nicht einmal ein Schwarzweißkopierer würde ohne Quantenmechanik funktionieren, geschweige denn ein moderner Computer.

Wo liegt dann das Rätsel? Wir haben eine Formel, wir haben Vorhersagen.

Eine physikalische Theorie sollte mehr sein als Formeln und Vorhersagen. Sie soll uns die Welt erklären. Sie soll uns sagen, woraus die Welt besteht. Aber dann ist die Sache

In den Augen Lazarovicis liefert die Quantentheorie des US-Physikers David Bohm ein klareres Bild der Natur als die klassische Quantenmechanik

überhaupt nicht mehr klar. Wenn man genauer wissen will, was die Theorie über die Welt sagt, wenn man mehr will als die Statistik von Messergebnissen, dann ist die Quantenmechanik, so wie ihre Urheber sie vor 100 Jahren verstanden haben und wie manche Physiker und Physikerinnen sie noch heute verstehen, unzulänglich.

Unzulänglich? Diese so erfolgreiche Theorie?

Die Quantenmechanik, wie ihre Urheber sie konzipiert haben, wird nicht dem Anspruch gerecht, eine klare Naturbeschreibung zu liefern. Stattdessen gibt es viel Gerede, um zu erklären, warum diese Fragen keinen Sinn ergeben, warum die Natur so verrückt ist und man nicht auf einer schlüssigen Beschreibung bestehen darf. Das Problem ist, dass die traditionelle Quantenmechanik nicht davon spricht, was tatsächlich in der Welt existiert, sondern darauf besteht, nur von Messgrößen zu sprechen. Sie entwickelt kein klares Bild davon, was im Mikrokosmos vonstatten geht, sondern bleibt bei dem, worauf man sich einigen kann: dass diese Wellenfunktion ein Instrument ist, um die Statistik von Messergebnissen zu berechnen. Aber das ist keine Naturbeschreibung.



Warum kann man die Theorie nicht schlicht beim Wort nehmen? Sie spricht von einer Wellenfunktion, zum Beispiel der Wellenfunktion eines Elektrons. Dann ist es eben das, was es in der Welt gibt: eine Welle.

So sollte es eigentlich sein. Die Theorie sollte uns sagen, was es in der Welt gibt. Aber wenn man nur die Wellenfunktion hat, dann stellt sich die Frage, was sie mit der Welt zu tun hat, die wir um uns herum beobachten. Bei der Newton'schen Mechanik, die wir in der Schule lernen, ist das einfacher. Sie beschreibt die Bewegungen punktförmiger Teilchen. Es ist nicht schwer zu verstehen, wie sich aus den Teilchen oder Atomen die Gegenstände formen, die wir um uns herum beobachten. Wenn man aber nur eine Wellenfunktion hat, dann ist nicht klar, wie sie die materiellen Dinge unserer Alltagswelt beschreibt.

Mit diesen Schwierigkeiten haben damals schon die Urheber der Quantenmechanik gerungen. Einer von ihnen, der Österreicher Erwin Schrödinger, verdeutlichte die Schwierigkeiten mit dem Gedankenexperiment einer Katze in einer Kiste, die laut Quantenmechanik gleichzeitig tot und lebendig sein soll – bis man den Deckel der Kiste öffnet und hineinschaut.

Mit dem Gedankenexperiment wollte Erwin Schrödinger die absurden Konsequenzen der Quantenmechanik verdeutlichen. Die Schrödinger-Gleichung hat eine wichtige mathematische Eigenschaft: Die Summe – oder **Überlagerung** – zweier ihrer Lösungen ergibt wieder eine Lösung. Das heißt, man kann zwei beliebige Zustände zu einem neuen Zustand kombinieren. Schrödinger zeigte, wie sich die Überlagerung eines radioaktiven Atoms, das gleichzeitig zerfallen und nicht zerfallen ist, zu einer Überlagerung einer toten und einer lebenden Katze fortsetzt. Das ergibt keinen Sinn, meinte Schrödinger. Katzen sind nicht gleichzeitig tot und lebendig.

Schrödinger protestierte gegen seine eigene Theorie?

Er warf zumindest die Frage auf, ob die Quantenmechanik ein klares, vollständiges Bild der Wirklichkeit liefert. Ist die Katze nun tot oder lebendig? Eine klarere Theorie müsste diese Frage beantworten. Schrödingers Katze ist nicht nur ein lustiges Gedankenspiel. Sie ist bis heute der Ausgangspunkt vieler Debatten über die Bedeutung der Quantenmechanik.

Was sagten Verteidiger der Quantenmechanik zu Schrödingers Einwand?

Die klassische Antwort ist das berühmte „Kollaps-postulat“, das der Quantenmechanik hinzugefügt wurde.

Sobald eine Messung oder eine Beobachtung stattfindet, soll die Schrödinger-Gleichung plötzlich nicht mehr gelten und die Wellenfunktion plötzlich „kollabieren“. Zufällig soll sich einer der möglichen Messwerte ergeben.

Sobald man hinschaut, ist die Katze plötzlich, wie durch ein Wunder, entweder tot oder lebendig.

Wäre sie. Aber dieses Postulat ist nicht ernstzunehmen. Es ergibt keinen Sinn, dass eine Messung oder, schlimmer noch, ein Beobachter grundlegend ist und in den Naturgesetzen eine Sonderrolle einnimmt. Was genau unterscheidet denn physikalisch einen Beobachter von an-

deren Systemen und den Messvorgang von anderen Wechselwirkungen? Wie der Physiker John Bell sarkastisch fragte: Musste die Wellenfunktion des Universums Milliarden von Jahren warten, bis die erste intelligente Lebensform kam, um zu kollabieren? Oder musste sie noch etwas länger warten, auf einen qualifizierteren Beobachter mit Dokortitel?

Wie kann man die Frage nach der Anzahl der Katzen heute beantworten?

Es gibt moderne, präzise Formulierungen der Quantenmechanik, die auch ein klares Weltbild liefern. Sie treffen unterschiedliche Aussagen über die Natur. Möglicherweise widersprechen sie sich gegenseitig. Aber die seriösen Theorien sind nicht in sich widersprüchlich oder vage wie die gewöhnliche Quantenmechanik. Sie sind höchstens etwas kontraintuitiv.

Gibt es also mehrere Quantentheorien?

Oft wird von „Interpretationen“ der Quantenmechanik gesprochen. Aber eine physikalische Theorie ist kein Gedicht, bei dem man erst einmal fragen muss, was der Autor oder die Autorin damit sagen wollte. Eine physikalische Theorie sollte die Natur eindeutig beschreiben. Ja, ich würde sagen, es gibt verschiedene Quantentheorien.

Welche zum Beispiel?

Etwa die **Viele-Welten-Theorie**, die auf den amerikanischen Physiker Hugh Everett zurückgeht. Sie nimmt die Schrödinger-Gleichung beim Wort. Was in der Welt passiert, ist genau das, was die Gleichung sagt. Die Theorie sagt daher, dass beide, die tote und die lebende Katze existieren, allerdings in verschiedenen Weltenzweigen.

Das klingt auch nicht weniger verrückt als die klassische Variante.

Es mag auf den ersten Blick verrückt wirken, aber es widerspricht nicht unserer Wahrnehmung der Welt.



Eine Theorie sollte mehr sein als Formeln.

Sie sollte uns die Welt erklären



Aber wir sehen doch keine zwei Katzen gleichzeitig?

Die Aufspaltung hört ja nicht mit der Katze auf. Wir, die Beobachter, und der komplette Rest des Universums werden ebenfalls einbezogen. Es gibt also am Ende auch zwei Versionen des Beobachters. Einen, der die tote Katze sieht, und einen, der die lebende Katze sieht. Das ist immerhin eine ernstere, präzisere Position als das vage Kollaps-Postulat. Auch wenn die Vorstellung unzähliger, paralleler Welten, von denen viele nahezu identische Kopien unserer selbst enthalten, bizarr erscheint.

Ich ahne, das ist nicht die Theorie, die Sie favorisieren.

Meine bevorzugte Lösung ist die Bohm'sche Mechanik, begründet vom US-Amerikaner David Bohm. Sie sagt, dass die Wellenfunktion einen physikalischen Zustand nicht komplett beschreibt, sondern fügt Teilchenorte als zusätzliche Bestimmungsstücke hinzu. Es gibt also die Wellenfunktion, und dann gibt es auch noch Punktteilchen, so ähnlich wie bei Newton: Teilchen, Atome im griechischen Sinn von „unteilbar“.

Die Wellenfunktion beschreibt also nichts Stoffliches. Was dann?

Sie ist Teil des physikalischen Gesetzes. Aber die Materie, die wir sehen, besteht aus Teilchen.

Das klingt nun wirklich seltsam. Gibt es diese Wellenfunktion, oder gibt es sie nicht?

Es gibt sie. Aber sie repräsentiert nicht selber Materie. Die Teilchen sind das grundlegende Inventar der Welt. Die Wellenfunktion bestimmt, wie die Teilchen sich bewegen.

Einerseits scheint die Wellenfunktion zur physikalischen Wirklichkeit zu gehören, andererseits völlig abstrakt zu sein. Ein merkwürdiges Zwischenwesen.

Ja, das kann man so sagen. Es gibt eine große philosophische Debatte dazu, was die Wellenfunktion eigentlich ist. Man könnte aber eine Analogie ziehen: Die Wellenfunktion ist etwas Ähnliches wie das Gravitationsfeld in der Newton'schen Mechanik. So ein Gravitationsfeld ist keine Materie – es spielt eine Rolle für die Bewegungen von Materieteilchen. Damit ist es in einem gewissen Sinn real.

Was bedeutet diese Sichtweise für Schrödingers Katze?

Die Wellenfunktion kann in einer Überlagerung von toter und lebender Katze sein, aber die Anordnung der Teilchen ist entweder die einer toten oder die einer lebenden Katze.

Es gibt also doch nur eine Katze, und sie ist entweder tot oder lebendig, auch schon bevor man in die Kiste geschaut hat?

Ja.

Wenn Wellen und Teilchen so klar getrennt sind, was steckt dann hinter der Rede vom Doppelwesen der Materie, vom „Welle-Teilchen-Dualismus“?

Diese Redeweise ist irreführend. Die Teilchen existieren im dreidimensionalen Raum, den wir alle kennen. Doch das Entscheidende an der Wellenfunktion ist, dass sie im Allgemeinen keine Funktion im dreidimensionalen

Raum ist, sondern in einem höherdimensionalen Raum, dem Konfigurationsraum, wie wir sagen. Der Konfigurationsraum eines einzelnen Teilchens ist dreidimensional, er ist einfach nur der Ort des Teilchens. Aber mit der Anzahl der Teilchen wächst auch die Zahl der Dimensionen. Der Konfigurationsraum eines Systems von zwei Teilchen ist sechsdimensional, von drei Teilchen neundimensional, von vier Teilchen zwölfdimensional. Für das ganze System von Teilchen gibt es eine gemeinsame Wellenfunktion, die sich im Allgemeinen nicht reduzieren lässt auf eine Welle für jedes Teilchen.

Was bedeutet das physikalisch?

Das ist das Phänomen, das Erwin Schrödinger „Verschränkung“ nannte. In diesem Phänomen und in der Nicht-Lokalität, zu der es führt, steckt die große Innovation der Quantenmechanik.

Was meinen Sie mit Nicht-Lokalität?

Grob gesagt heißt es, dass weit voneinander entfernte physikalische Systeme sich augenblicklich beeinflussen können. Ohne dass sie lokalen Kontakt haben.

Ist es das, was Albert Einstein als „spukhafte Fernwirkung“ ablehnte?

Genau. Allerdings sind diese nichtlokalen Effekte nicht so dramatisch, wie Einstein befürchtete. Man kann sie vor allem nicht nutzen, um überlichtschnelle Signale zu senden, was im Widerspruch zur Relativitätstheorie stünde.

Wie funktioniert das genau? Wie beeinflusst etwas, das an einem Ort geschieht, etwas, das woanders passiert?

Die beste Antwort ist: über die Wellenfunktion. Weil die Wellenfunktion selber nichtlokal ist. Zwei verschränkte Elektronen haben eine gemeinsame Wellenfunktion, einen gemeinsamen Quantenzustand, auch wenn das eine Elektron in Tokio ist und das andere in New York. Es wäre falsch, auf einer mechanistischen Erklärung dafür zu be-



Die Kopenhagener Deutung war im Grunde viel wolkiges

Gerede





stehen, als gäbe es da etwas, das sich mit Überlichtgeschwindigkeit bewegt und von einem Teilchen zum anderen gesandt wird. So ist es nicht. Es sind die Naturgesetze selber, die einen nichtlokalen Charakter haben.

Ein bemerkenswerter Aspekt der Quantenmechanik ist die Wahrscheinlichkeit. Sie bringt den Zufall in die Welt, die nach Newton exakt wie ein Uhrwerk zu laufen schien.

Aus der Wellenfunktion können wir die Wahrscheinlichkeit berechnen, bei einer Messung eine bestimmte Teilchenkonfiguration zu finden. Darauf, dass die Quantenmechanik diese statistischen Aussagen liefert, können sich alle einigen. Aber das Wesen und die Bedeutung dieser Wahrscheinlichkeiten sind umstritten. Die Urheber der Quantenmechanik bestanden explizit darauf, solange niemand hinschaue, sagten die Wahrscheinlichkeiten nichts über den tatsächlichen Aufenthaltsort der Teilchen aus. In der Theorie von David Bohm hingegen sorgen die Wahrscheinlichkeiten dafür, dass die Teilchen wirklich an diesem Ort sind, auch ohne Beobachtung.

Was würden Sie sagen: Ist der Lauf der Welt vom Zufall bestimmt?

Nein. Die Schrödinger-Gleichung ist eine vollkommen deterministische Gleichung. Der Zufall kommt erst durch

Dass oft von Interpretationen der Quantenmechanik die Rede sei, findet der Philosoph falsch. Eine Theorie sei doch kein Gedicht

das Kollapspostulat, was aber nicht ernstzunehmen ist. Man kann die Schrödinger-Gleichung verändern, sodass ein zufälliger Kollaps Teil des Gesetzes wird. Aber wenn die Schrödinger-Gleichung korrekt ist, dann sind die Bohm'sche Theorie und die Everett'sche Quantenmechanik ernstzunehmende Theorien. Sie sind beide fundamental deterministisch. In ihnen gibt es keinen echten Zufall, wohl aber Grenzen der Vorhersagbarkeit. Die Phänomene scheinen uns zufällig, weil wir nicht allwissend sind.

Kann man sich an die fremdartige Welt der Quantenmechanik gewöhnen, wenn man sich lange mit ihr beschäftigt?

An so etwas wie die klassische Deutung der Quantenmechanik sollte man sich gar nicht gewöhnen. Sie ist in vielen Punkten gehobener Unsinn.

Was ist so unsinnig an der Deutung der Quantenmechanik, die vor hundert Jahren der dänische Physiker Niels Bohr und andere entwarfen? Immerhin stammt sie von den Urhebern der Theorie.

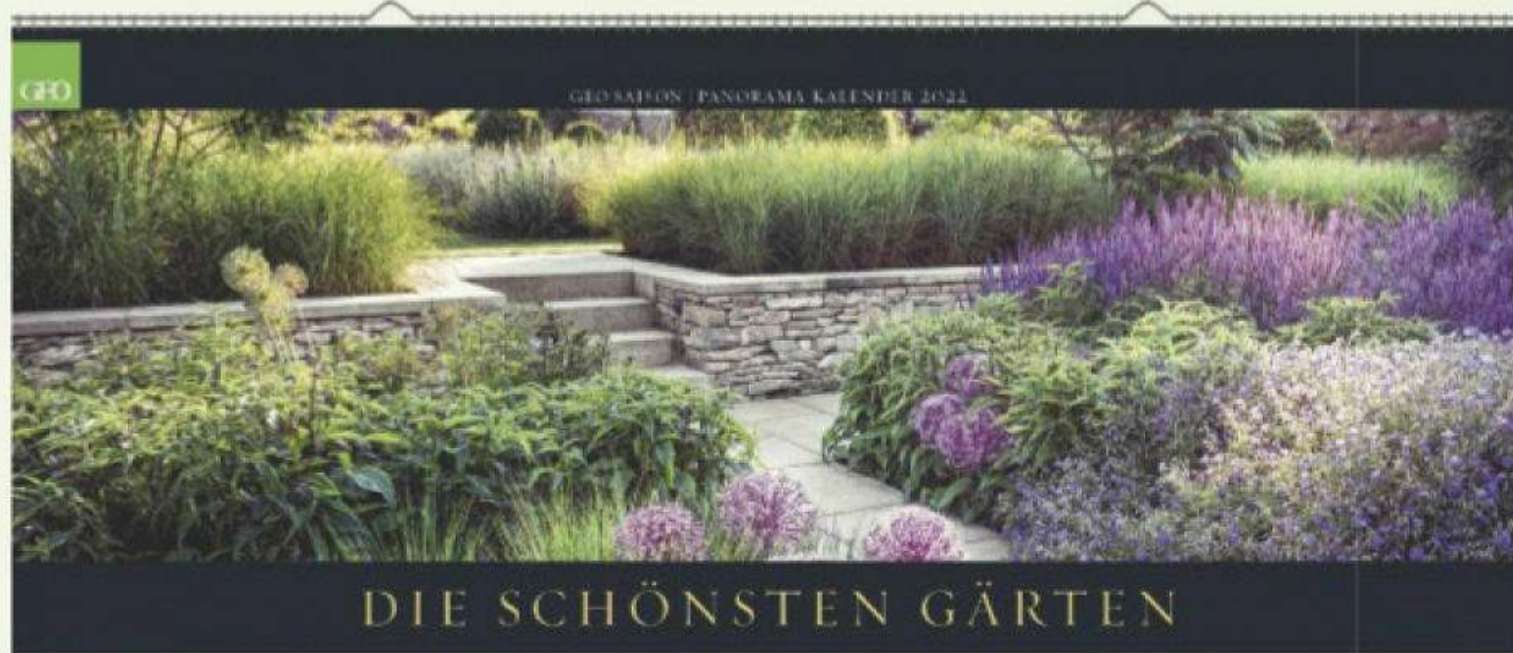
Es ist schwer zu sagen, was diese **Kopenhagener Deutung** überhaupt ist. Es besteht weithin Einigkeit darüber, wie man aus dem theoretischen Formalismus experimentelle Vorhersagen ableitet. Aber die Kopenhagener Deutung war dann im Grunde viel wolkiges Gerede, um rechtfertigen zu können, dass man über diese Vorhersagen hinaus nicht zu viele Fragen stellen sollte. Bohr bestand zum Beispiel darauf, dass man die Welt im Allerkleinsten gar nicht ohne Widersprüche beschreiben könne. Damit hängt auch die Behauptung zusammen, ein Elektron sei mal eine Welle, mal ein Teilchen, je nachdem, wie man es beobachtet. Vieles davon ist noch heute Folklore, aber eigentlich ist es Unsinn. Zumindest folgt es nicht aus den Phänomenen. Die Ursünde war damals, zu argumentieren, Quantenmechanik müsse unverständlich sein. Also die Unverständlichkeit der Quantenwelt zum Prinzip zu erklären.

Wird die Frage der richtigen Deutung der Quantenmechanik irgendwann einmal gelöst? Ähnlich wie der Konflikt zwischen kopernikanischem und ptolemäischem Weltbild einst entschieden wurde?

Ich denke ja. Man kann diese Debatte zwar nicht allein experimentell entscheiden. Aber man kann hoffen, dass sich mit der Zeit eine Sichtweise durchsetzt, und zwar diejenige, die am meisten Sinn ergibt und sich für die weitere Entwicklung in der Physik am fruchtbarsten erweist.

Der Physiker DUSTIN LAZAROVICI forschte in der Gruppe des Münchener Mathematikers Detlef Dürr, einem Anhänger der Bohm'schen Mechanik, über die Grundlagen der Quantentheorie und wechselte dann in die Philosophie der Physik. Er lehrt an der Universität Lausanne.

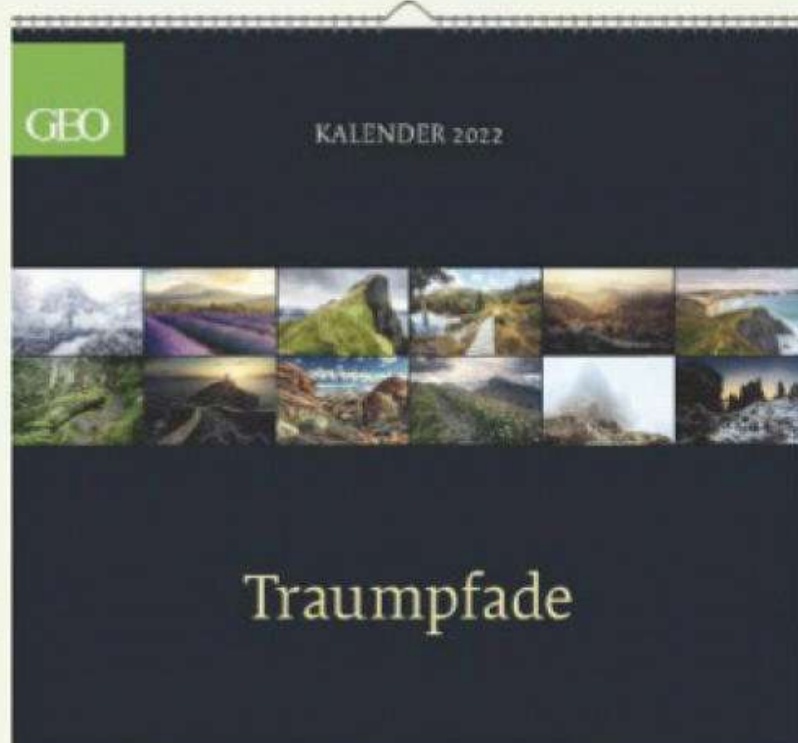
Entdecken Sie die neuen GEO Kalender 2022



GEO SAISON Panorama-Kalender „Die schönsten Gärten“

Zwölf grüne Paradiese öffnen ihre Pforten: Hier pflanzte Monet einst Kunstwerke, britische Gärtner komponierten neue Landschaften, Holländer frönten ihrer Tulpenliebe – und die Natur blüht auf.

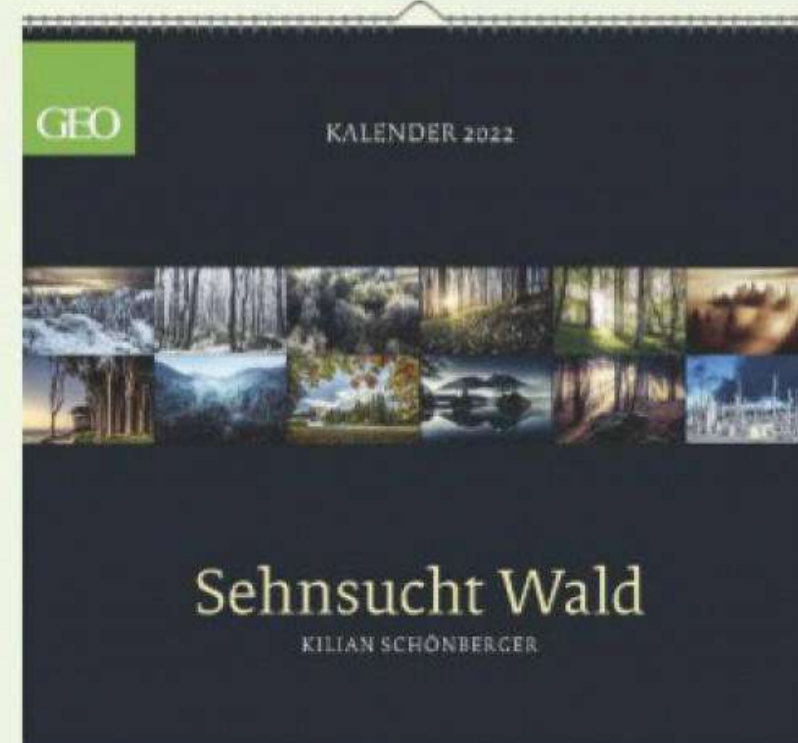
Maße: 120x50 cm
Best.-Nr.: G729331
Preise: **99,99 € (D/A)/**
Fr. 110,00 (CH)



GEO Klassiker-Kalender „Traumpfade“

Wenn der Weg das Ziel ist: Wer auf Traumpfaden wandelt, hofft, nie anzukommen. Der GEO-Kalender zeigt Bilder von Wegen in China, Australien, auf den Färöer, Bali und den Kykladen.

Maße: 60x55 cm
Best.-Nr.: G729326
Preise: **49,99 € (D/A)/**
Fr. 55,00 (CH)



GEO Kalender „Sehnsucht Wald“

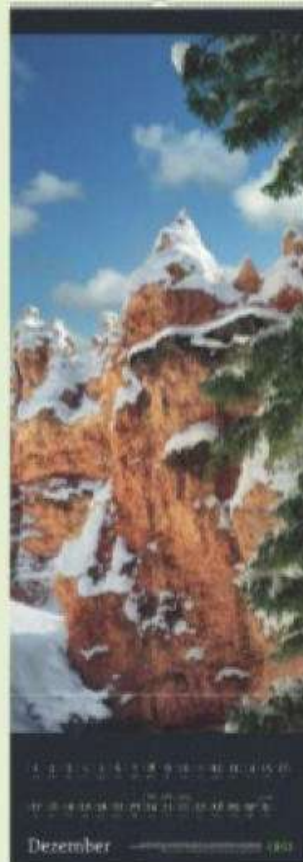
Eine Bildersammlung, so inspirierend wie ein Waldspaziergang: Der deutsche Fotograf Kilian Schönberger schafft es wie kein zweiter, Stimmung und Atmosphäre tief im Innern einsamer Forste einzufangen.

Maße: 60x55 cm
Best.-Nr.: G729335
Preise: **49,99 € (D/A)/**
Fr. 55,00 (CH)



**Jetzt bestellen unter geoshop.de/kalender2022
oder +49 (0) 40/42236427**

(Bitte geben Sie immer den Aktionscode an: G00186)



GEO Vertical-Kalender „Die Magie des Augenblicks“

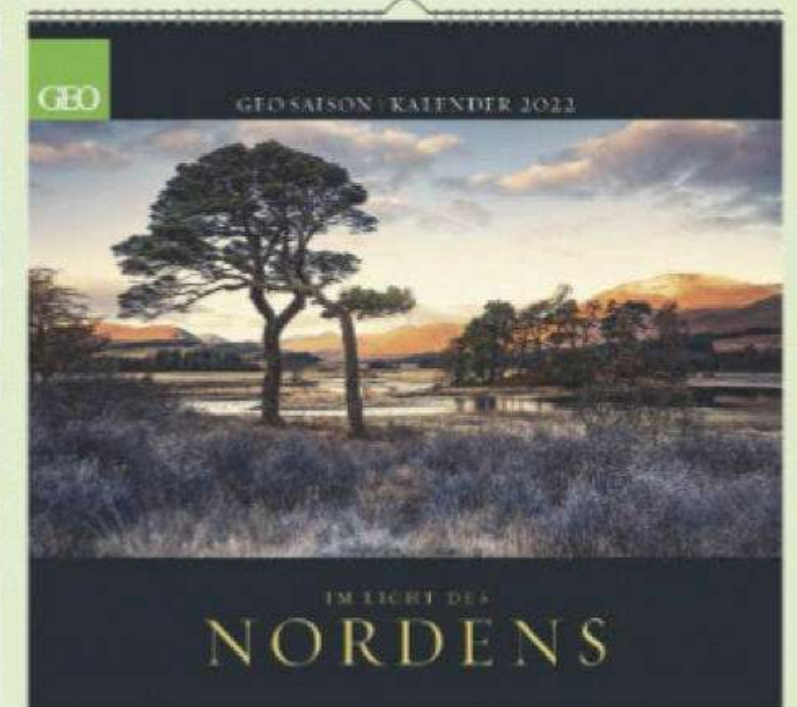
Grandiose Ausblicke sind die Spezialität des Fotografen Dennis Frates. GEO präsentiert seine Landschaftsbilder aus den USA im Panorama-Hochformat.

Maße: 34x98 cm
Best.-Nr.: G729323
Preise: **49,99 € (D/A)/**
Fr. 55,00 (CH)

GEO SAISON Kalender „Im Licht des Nordens“

Pur, klar, frisch: Alaskas tiefblaue Seen, Dänemarks grüne Küstenwälder, Schottlands raue Highlands, die entlegenen Lofoten entfalten in diesem Kalender ihren ganz eigenen, nordischen Charme.

Maße: 50x45 cm
Best.-Nr.: G729333
Preise: **29,99 € (D/A)/**
Fr. 33,00 (CH)



Coupon einfach ausfüllen, ausschneiden und senden an: GEO Kundenservice, 74569 Blaufelden

GEO-Bestellcoupon – versandkostenfreie Lieferung ab 80,- €!*

Ich bestelle folgende Artikel:

Produktbezeichnung	Best.-Nr.	Preis D	Menge
<input type="checkbox"/> GEO SAISON Panorama-Kalender „Die schönsten Gärten“	G729331	99,99€	
<input type="checkbox"/> GEO Klassiker-Kalender „Traumpfade“	G729326	49,99€	
<input type="checkbox"/> GEO Kalender „Sehnsucht Wald“	G729335	49,99€	
<input type="checkbox"/> GEO Vertical-Kalender „Die Magie des Augenblicks“	G729323	49,99€	
<input type="checkbox"/> GEO SAISON Kalender „Im Licht des Nordens“	G729333	29,99€	
Gesamtsumme: (zzgl. 3,90€ Versandkosten, versandkostenfreie Lieferung ab einem Bestellwert von 80,00€*)			

Meine persönlichen Angaben: (bitte unbedingt ausfüllen)

Name | Vorname Geburtsdatum

Straße | Nummer PLZ | Wohnort

Telefon E-Mail

Unsere Kunden informieren wir gemäß § 7 Abs. 3 UWG per E-Mail über eigene ähnliche Angebote aus unserem Verlag. Dem können Sie über den Abmeldelink am Ende jeder E-Mail oder Hinweis an abo-service@guj.de widersprechen.

☐ Ich zahle per Rechnung ☐ Ich zahle bequem per Bankeinzug (nur in Deutschland möglich)

BIC IBAN

Bankinstitut

SEPA-Lastschriftmandat: Ich ermächtige die Gruner+Jahr GmbH, Am Baumwall 11, 20459 Hamburg, Gläubiger-Identifikationsnummer DE31ZZZ00000031421, wiederkehrende Zahlungen von meinem Konto mittels Lastschrift einzuziehen. Zugleich weise ich mein Kreditinstitut an, die von der Gruner+Jahr GmbH auf mein Konto gezogenen Lastschriften einzulösen. Die Mandatsreferenz wird mir separat mitgeteilt. **Hinweis:** Ich kann innerhalb von 8 Wochen, beginnend mit dem Belastungsdatum, die Erstattung des belasteten Betrages verlangen. Es gelten dabei die mit meinem Kreditinstitut vereinbarten Bedingungen.

*Aufgrund der Größe der GEO Panorama- und GEO Edition-Kalender erheben wir bei Versänden nach Österreich und in die Schweiz einen Sperrgutszuschlag von 25,00 € (A) und Fr. 28,00 (CH).

Widerrufsrecht: Sie können die Bestellung binnen 14 Tagen ohne Angabe von Gründen formlos widerrufen. Die Frist beginnt an dem Tag, an dem Sie die Lieferung erhalten, nicht jedoch vor Erhalt einer Widerrufsbelehrung gemäß den Anforderungen von Art. 246a § 1 Abs. 2 Nr. 1 EGBGB. Zur Wahrung der Frist genügt bereits das rechtzeitige Absenden ihres eindeutig erklärten Entschlusses, die Bestellung zu widerrufen. Sie können hierzu das Widerrufs-Muster aus Anlage 2 zu Art. 246a EGBGB nutzen. Der Widerruf ist zu richten an: GEO Versandservice, 74569 Blaufelden; Telefon: +49(0)40-42236427; Telefax: +49(0)40-42236663; E-Mail: guj@sigloch.de

Datum | Unterschrift

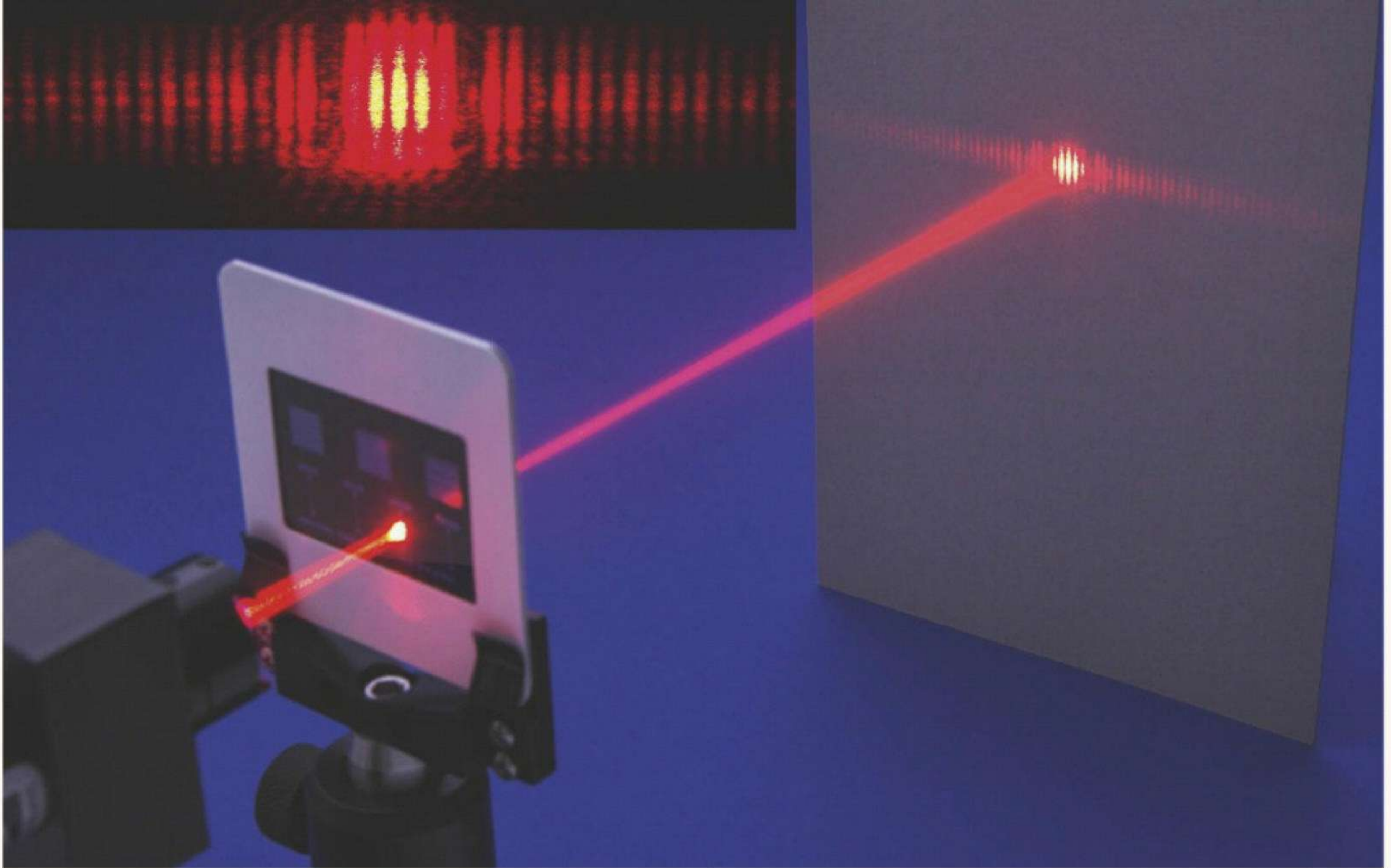
Aktionsnr.: G00186

Wenn Wellen, wie hier
von zwei Lichtquellen, einander
durchdringen, verstärken
sie sich mancherorts. An anderen
Stellen heben sie sich
gegenseitig auf: Licht plus Licht
ergibt dort Schatten

Text: Tobias Hürter

**Die Natur ist in ihrem Innersten seltsamer,
als wir es uns vorstellen können. Das zeigt sich wohl nirgends
deutlicher als im **Doppelspalt-Experiment****

Das Mysterium der Wellen und Teilchen



Eine Blende teilt den Laserstrahl in mehrere Wellen auf. Statt eines simplen Flecks zeigt sich auf der Leinwand ein Muster aus Streifen – je nachdem, ob sich dort die Wellen gegenseitig verstärken oder auslöschen

S

»Sehr revolutionär« – nur ein einziges Mal benutzte Albert Einstein, der große Revolutionär der Physik, selbst diesen Ausdruck für sein Werk. Es war im Jahr 1905, Einsteins „Wunderjahr“, in dem er vier bedeutende Arbeiten veröffentlichte, von denen jede allein ihm zur Unsterblichkeit gereicht hätte. Doch es war nicht seine Relativitätstheorie, die Einstein „revolutionär“ nannte. Es ging um die Hypothese, dass Licht aus „Quanten“ besteht. Mit ihr erklärte Einstein den licht-elektrischen Effekt, bei dem – so stellte er es sich vor – ein Hagel von Lichtteilchen auf eine Metalloberfläche prasselt und Elektronen herausschlägt. Diese Arbeit war es, für die er später seinen Nobelpreis erhielt.

Revolutionär an dieser Idee war nicht, dass sie neu war. Im Gegenteil: Sie war mehr als 200 Jahre alt. Aber sie galt als längst widerlegt.

Schon im 17. Jahrhundert hatte Isaac Newton, der Übervater der klassischen Physik, Licht als Teilchen beschrieben. Die geradlinige Ausbreitung von Lichtstrahlen, ihre Brechung und Reflexion seien nur erklärlich, wenn man Licht als Strom winziger „Korpuskeln“ verstehe, sagte Newton.

Doch dann untersuchten andere Physiker, unter ihnen der Engländer Robert Hooke, der Niederländer Christiaan Huygens und der Franzose Augustin-Jean Fresnel, mit immer besseren Linsen und Spiegeln die Natur des Lichts genauer. Sie kamen zum Schluss, dass das Farbspektrum und Phänomene wie Beugung und Interferenz nur Sinn ergäben, wenn man Licht als Welle deute.

Welle oder Teilchen? Die beiden Prinzipien sind so gegensätzlich, dass sie unvereinbar schienen: Eine Welle kann sich über ein großes Volumen ausbreiten; sie kann andere Wellen durchdringen und deren Auslenkung aufheben oder verstärken. Ein Teilchen hingegen ist konzentriert an einem Punkt und stößt andere Teilchen weg. Licht kann offenbar nur das eine oder das andere sein. Aber welches von beiden?

Um Klarheit zu schaffen, ersann der englische Physiker, Augenarzt und Universalgelehrte Thomas Young im Jahr 1803 einen einfachen Versuchsaufbau: Er verdunkelte sein Zimmer mit dem Fensterladen, in den er ein Loch gebohrt hatte. Davor klebte er wiederum ein Papier, das er „mit einer feinen Nadel“ durchstoßen hatte. Durch diese winzige Öffnung fiel das Sonnenlicht, durch einen Spiegel umgeleitet, auf die Zimmerwand gegenüber. „Die Experimente können mit großer Leichtigkeit wiederholt werden, wenn die Sonne scheint“, erklärte Young dem Publikum in der Royal Society of London am 24. November 1803. „Ich hielt einen Streifen Karton, ein dreißigstel Zoll breit, in den Sonnenstrahl und beobachtete seinen Schatten.“ Wenn nun Licht aus einem

Teilchenhagel bestünde, würde sich an der Wand, in der Mitte des Lichtkegels, ein scharfer Schatten abzeichnen, weil der Kartonstreifen die Teilchen abblockt – so wie ein aufgespannter Regenschirm bei einem kräftigen Schauer das Wasser abhält. Dann wäre Newton bestätigt.

Wenn aber Lichtstrahlen Wellen wären, wie Huygens behauptete, könnten diese auch in den Schattenbereich hinter den Karton gelangen, indem sie an beiden Seiten des Kartons vorbeiliefen und sich dahinter wieder zusammensetzten – ähnlich wie Lärm sich auch hinter einer Mauer ausbreitet und hörbar ist. An Youngs Zimmerwand würde ein charakteristisches Muster heller und dunkler Streifen entstehen: ein Interferenzmuster. Denn die Wellen, die links und rechts am Karton vorbeilaufen, treffen an der Wand wieder aufeinander. Kommen Wellenberge gleichzeitig an, verstärken sie sich – es ist hell. Überlagern sich Wellental und Wellenberg, löschen sie sich aus – es ist dunkel.

Und tatsächlich sah Young ein Hell-Dunkel-Muster an seiner Zimmerwand. Der Beweis schien erbracht: Licht breitet sich als Welle aus. Doch in der Royal Society, in der Newton immer noch gottgleichen Status genoss, herrschte Skepsis. Ein anonym Kritiker Youngs befand dessen Werk in einem Zeitungsartikel als „in jeder Hinsicht wertlos“ und als „unmännliches und fruchtloses Vergnügen einer jugendlichen und unzüchtigen Fantasie“.

Welle oder Teilchen?

Die Phänomene sind völlig gegensätzlich, sie scheinen unvereinbar

Spätere Physiker ließen sich von der Kritik nicht abhalten. Sie verfeinerten Youngs Versuchsaufbau: zu dem, was heute als „Doppelspalt-Experiment“ bekannt ist. Ein Experiment, das wie kein zweites das Rätselhafte der Quantenwelt zutage bringen sollte.

Youngs Nachfolger nutzten weiterhin eine Lichtquelle und eine Leinwand, doch dazwischen platzierten sie eine Blende mit zwei schmalen Spalten. Würde Licht als Teilchenstrom die Öffnungen passieren, sollten sich auf der Wand zwei helle Abbilder der Spalte zeigen. Stattdessen zeigten sich In-

terferenzmuster, wie wenn Wellen durch beide Spalte drangen und sich dahinter überlagerten.

Es wurde immer schwerer zu bestreiten, dass Licht aus Wellen bestand. In den 1860er Jahren entwickelte der schottische Physiker James Clerk Maxwell Gleichungen, mit denen er Licht als Schwingung eines elektromagnetischen Feldes beschreiben konnte. Die Lichtwelle setzte sich durch.

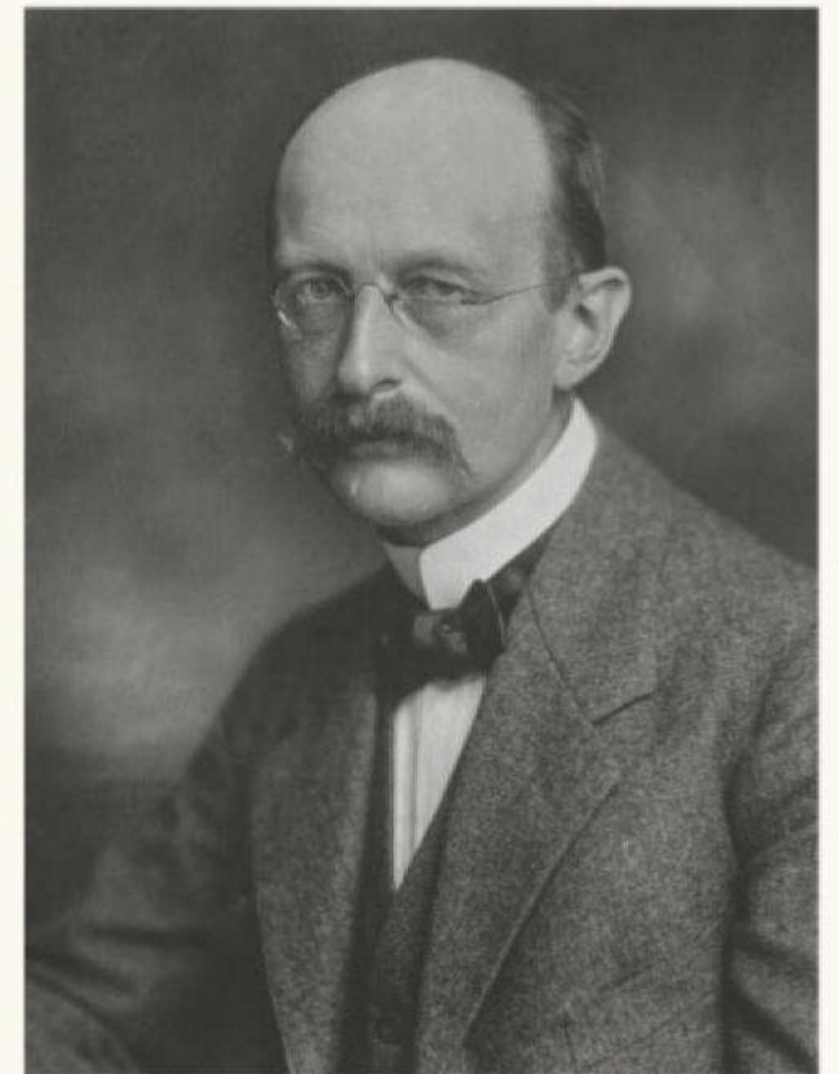
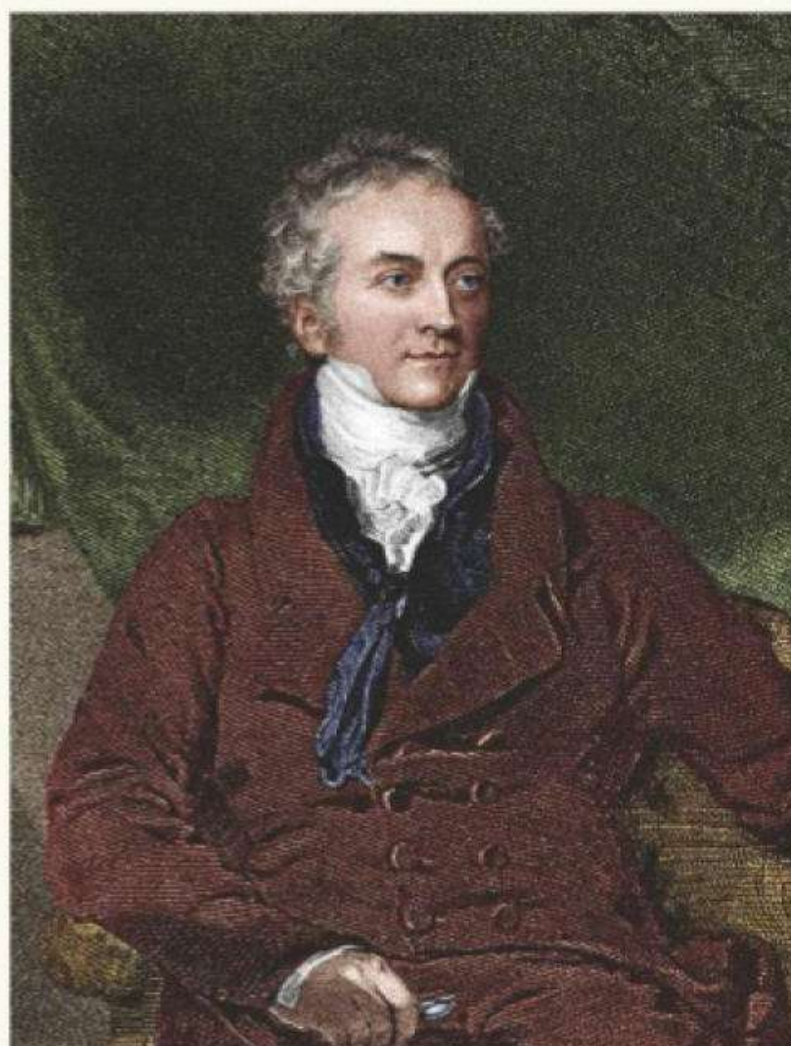
Doch es blieben Rätsel. Den Physikern gelang es partout nicht, mit der Wellentheorie zu erklären, warum erhitzte Gegenstände, etwa ein Eisen im Feuer einer Schmiede, in einer charakteristischen Folge von Farben glühen: zuerst in einem Dunkelrot, das mit steigender Hitze in ein helles Kirschrot übergeht, dann in ein Gelb, das immer weißer wird und sich schließlich blau verfärbt.

1900 fand der deutsche Physiker Max Planck endlich die richtige Formel – für die er allerdings „in einem Akt



Licht bestehe aus winzigen Korpuskeln, proklamierte Isaac Newton 1672. Nur so ließen sich dessen Brechung und geradlinige Ausbreitung erklären

Den Wellencharakter des Lichts bewies Thomas Young um 1803. Anfangs warfen Kritiker ihm vor, seine Arbeit sei »wertlos«



Max Planck legte 1899/1900 den Grundstein für die Quantenphysik. Ohne es zu realisieren, stieß er auf den Doppelcharakter des Lichts

der Verzweiflung“ annehmen musste, dass Licht in kleine Pakete eingeteilt ist. Der konservativ gesonnene Planck hoffte, die Lichtpäckchen irgendwie wieder aus den Formeln verbannen zu können – vergeblich. Fünf Jahre später sah Albert Einstein als Erster die Tragweite von Plancks Entdeckung. „Es war, wie wenn einem der Boden unter den Füßen weggezogen worden wäre, ohne dass sich irgendwo fester Grund zeigte, auf dem man hätte bauen können“, schrieb Einstein später.

Wenn Licht aus „Quanten“ besteht, wie Plancks Arbeit nahelegt, wie soll man dann noch der Wellentheorie trauen? Einstein beschloss dennoch, Plancks Erklärung wörtlich zu nehmen. „Nach der hier ins Auge zu fassenden Annahme ist bei Ausbreitung eines von einem Punkte ausgehenden Lichtstrahles die Energie nicht kontinuierlich auf größer und größer werdende Räume verteilt“, schrieb Einstein in seiner Arbeit, „sondern es besteht dieselbe aus einer endlichen Zahl von in Raumpunkten lokalisierten Energiequanten, welche sich bewegen, ohne sich zu teilen, und nur als Ganze absorbiert und erzeugt werden können.“

Einsteins Arbeit erschien in den „Annalen der Physik“, der damals bedeutendsten Physikzeitschrift der Welt, mit dem Titel „Über einen die Erzeugung des Lichtes betreffend heuristischen Gesichtspunkt“. Die Lichtteilchen waren wiederauferstanden. Sie bekamen einen Namen: Photonen.

Wie ist das mit der traditionellen Sicht vereinbar? Vielleicht gar nicht so schlecht, könnte man hoffen. Womöglich

Die Photonen setzen sich zu einem komplexen Muster zusammen – als hätten sie sich abgesprochen

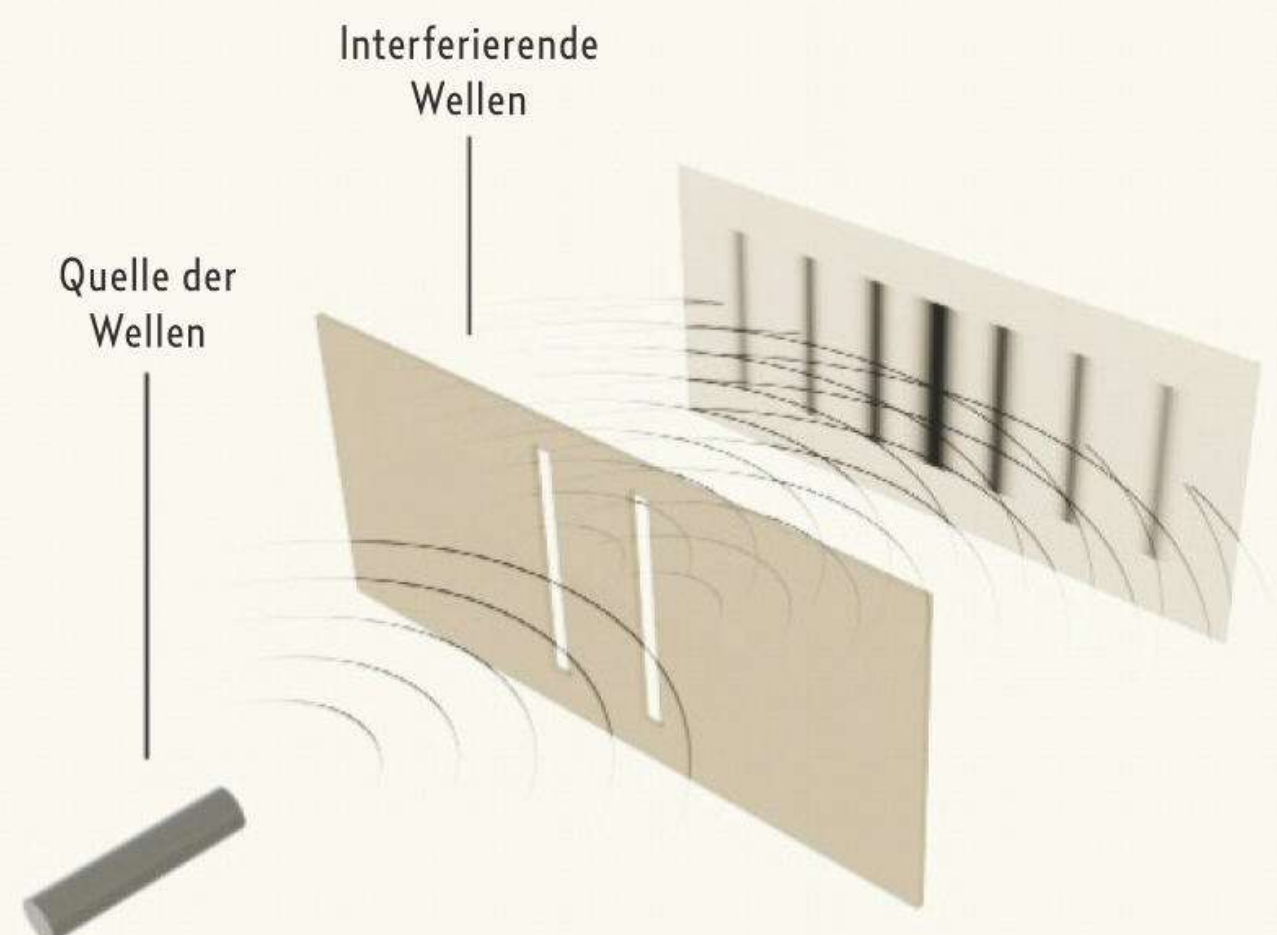
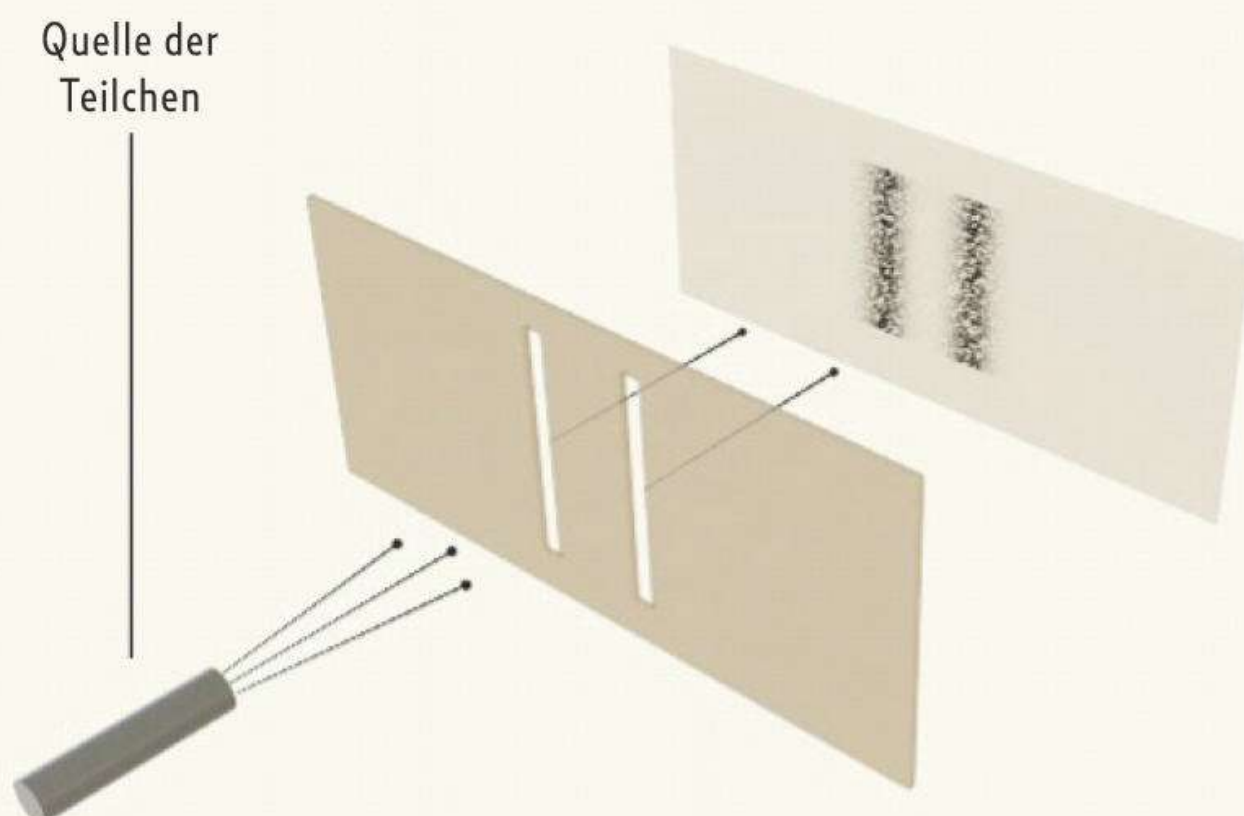
setzen sich ja die Lichtwellen aus Teilchen zusammen, so ähnlich wie Wasserwellen aus sehr vielen Wassermolekülen bestehen. Doch dann, im Jahr 1908, gelang es dem englischen Physiker G. I. Taylor in einem abgewandelten Doppelspalt-Experiment, die Intensität der Lichtquelle so weit mit rußgeschwärzten Glasplatten zu reduzieren, dass die mutmaßlichen Lichtteilchen fast nur noch einzeln durchkamen. Als Schirm benutzte er eine Fotoplatte: Sie belichtete er über Monate – nahezu Photon für Photon.

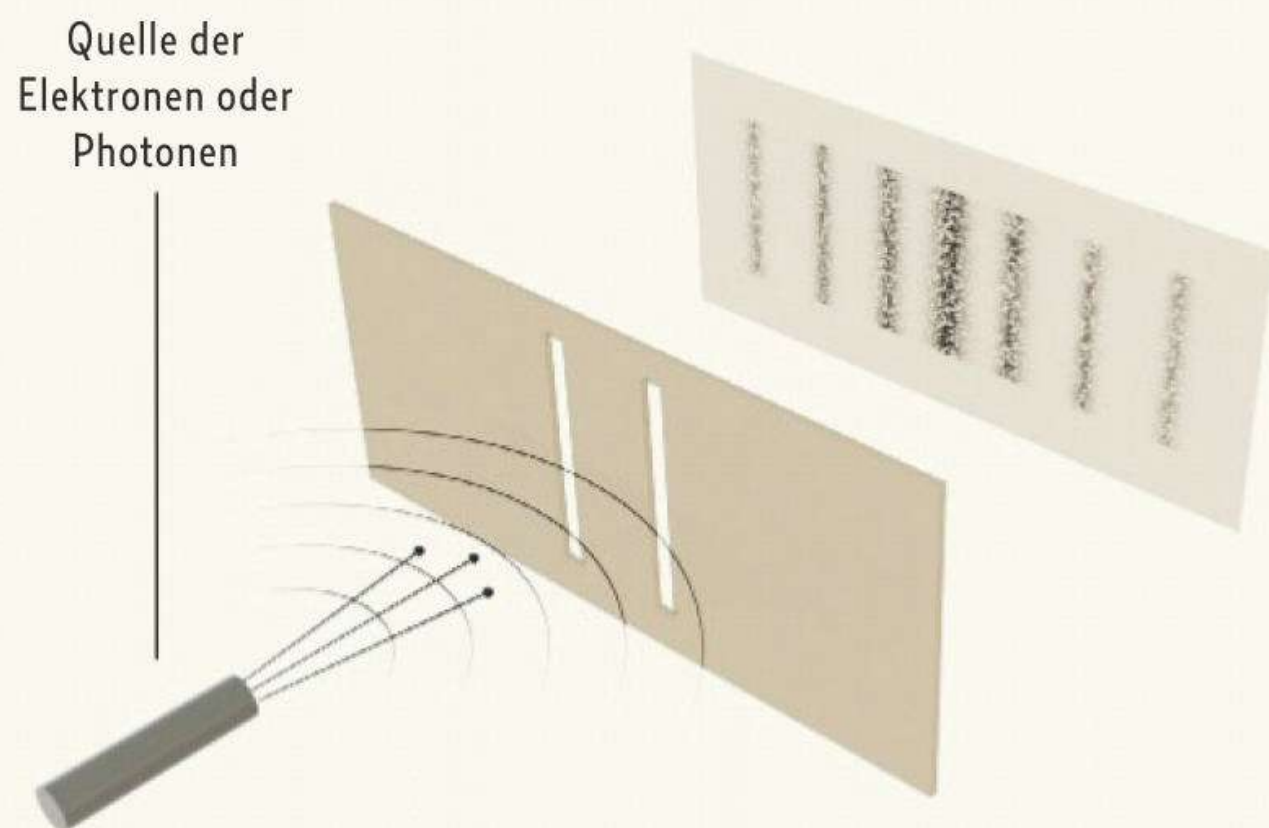
Das Ergebnis war erstaunlich. Taylor sah, dass das Licht tatsächlich, wie von Einstein vorhergesagt, in kleinen Paketen auf der Fotoplatte ankam. Aber er sah auch, dass sich die Punkte über die Monate zu einem Interferenzmuster zusammensetzten, als hätten sich die Teilchen abgesprochen. Auch das einzelne Lichtteilchen selbst musste also eine Wellennatur in sich tragen, schließlich orientierte es sich am Interferenzmuster. Wer soll das verstehen?

Und das war noch nicht der Höhepunkt der Verwirrung. Im Jahr 1923 postulierte der französische Physikdoktorand Louis de Broglie, dass nicht nur Licht, sondern auch Materie sich als Welle verhalten könne. Es war ein gewagter, nur schwach begründeter Schluss. De Broglie hatte schlicht Einsteins Gedankengang umgekehrt: Wenn Licht sich wie ein Strom von Teilchen verhalten kann, warum sollten sich dann nicht andere Teilchen – etwa Elektronen oder Atome – wie Wellen verhalten können?

An einem Doppelspalt verhalten sich Teilchen markant anders als Wellen. Pistolenkugeln etwa fliegen jeweils nur durch einen Spalt und schlagen in gerader Linie auf der Wand dahinter auf

Eine Welle passiert beide Spalte und teilt sich. Die neuen Wellen überlagern einander, verstärken oder schwächen sich. Auf der Leinwand erscheint ein Interferenzmuster gleichmäßig beleuchteter Streifen





Fliegen Quantenobjekte durch den Doppelspalt, schlagen auf den Detektor Teilchen auf, scheinbar willkürlich verteilt. Doch langfristig summieren sich die Treffer zum Interferenzmuster

Tatsächlich wurde de Broglie vier Jahre später in seiner kühnen Spekulation bestätigt. Mit einem dem Doppelspalt-Experiment verwandten Versuchsaufbau in den Bell Telephone Laboratories erzeugten die US-amerikanischen Physiker Clinton Davisson und Lester Germer mit Elektronen ein Interferenzmuster. 1957 führte der deutsche Physiker Claus Jönsson dann das eigentliche Doppelspalt-Experiment mit Elektronen durch – und produzierte ebenfalls Interferenzstreifen. Und weitere 17 Jahre später gelang den Italienern Pier Giorgio Merli, Gian Franco Missiroli und Giulio Pozzi mit Elektronen, was einst G. I. Taylor mit Photonen geschafft hatte: der Doppelspalt-Versuch mit einzelnen Teilchen. Auch die Italiener sahen Interferenzstreifen.



In diesen Versuchen verhalten sich die Materiebausteine sowohl wie Wellen als auch wie Teilchen: Ein Elektron passiert offenbar ähnlich einer Welle beide Spalte, es bildet dahinter ein Interferenzmuster aus – doch auf einem Detektorschirm kommt es als winziges Päckchen an. Zwei scheinbar unverträgliche Verhaltensweisen auf einmal.

Besondere Rätsel wirft auf, wie das Elektron mit seiner Masse und elektrischen Ladung ein Interferenzmuster bilden kann. Es müsste als Welle zwei getrennte Wege nehmen, um sich dann wieder zu überlagern: an beiden Seiten von Thomas Youngs Kartonstreifen vorbei oder im Doppelspalt-Versuch durch beide Spalte der Blende. Aber wie kann ein Materiebaustein zwei verschiedene Wege gleichzeitig durchlaufen? Teilt es sich auf, um hinter der Blende wieder zu fusionieren?

Die Physiker versuchten, den Elektronen auf die Schliche zu kommen. Sie brachten zum Beispiel Detektoren an den Spalten an, um durchfliegende Elektronen zu registrieren. Doch niemals beobachteten sie so etwas wie ein halbes Elektron. Und noch vertrackter: Sobald sie mit Messgeräten darauf lauerten, welchen Spalt ein Elektron passiert, verschwand plötzlich das Interferenzmuster – als merkten die Elektronen, dass sie beobachtet wurden, und wollten ihr Geheimnis bewusst verbergen.

In den 1920er Jahren fanden Physiker wie Werner Heisenberg und Erwin Schrödinger eine Theorie, die das Verhalten zwar nicht erklären, aber immerhin beschreiben konnte: die Quantenmechanik. Demnach sind Licht und Materie weder reine Wellen noch Teilchen, sondern etwas Neues, das man „Quantenobjekt“ nennen kann.

Von Quantenobjekten lässt sich allerdings niemals gleichzeitig der Ort und die Geschwindigkeit präzise messen – das sagt die **Unschärferelation**. Beim Versuch, den Ort der Elektronen am Doppelspalt zu lüften, ruiniert man das Interferenzmuster, da die Geschwindigkeit der Elektronen „unschärfer“ wird. Aus der Unschärferelation folgt, dass wir den seltsamen Weg der Elektronen nicht weiter enträtseln können. Wir müssen das so hinnehmen.

Und auch das größte Geheimnis der Quanten kann die Physik zwar präzise mathematisch beschreiben, aber nicht für unseren Verstand fassbar machen: Wenn ein unbeobachtetes Elektron den Doppelspalt als Welle passiert, warum verdichtet es sich im Moment der Beobachtung auf dem Schirm zu einem punktförmigen Teilchen? Warum ist der Ort des aufblitzenden Teilchens zufällig, ist willkürlich innerhalb der Grenzen, die die Welle vorgibt? Warum bleibt von den vielen Orten des Musters nur einer übrig – und wie können die anderen Bereiche der Welle spurlos verschwinden? Dieser Übergang von Welle zu Teilchen lässt sich bisher nicht erklären. Bei jedem Versuch, den Prozess zu fassen, entzieht sich die Natur stets unserem Zugriff.

»Das zentrale Mysterium der Quantenmechanik«

nannte der US-amerikanische Physiker und Nobelpreisträger Richard Feynman den Doppelspalt-Versuch. Für die menschliche Vorstellungsgabe mag es aberwitzig sein, dass Photonen, Elektronen und andere Materiebausteine scheinbar widersprüchliche Aspekte von Teilchen und von Wellen in sich vereinen. Doch die Formeln der Quantenmechanik beschreiben ihr Verhalten ganz exakt. Unsere Fantasie kapituliert vor der Theorie. „Das Paradox ist nur ein Konflikt zwischen der Wirklichkeit und unserem Gefühl, was die Wirklichkeit sein sollte“, sagte Richard Feynman.

In den vergangenen Jahren haben Physikerinnen und Physiker Varianten des Doppelspalt-Experiments mit ganzen Atomen, mit immer größeren Molekülen, ja sogar mit Antimaterie durchgeführt. Jedes Mal hat sich bestätigt, dass dieses seltsame Verhalten, weder ganz Welle noch ganz Teilchen, ein Grundprinzip der Natur ist.

Unvorstellbar, und gerade deshalb faszinierend: Es bleibt eines der am besten untersuchten und am meisten diskutierten Rätsel der Physik.

DER KAMPF

Vor dem Tagungsgebäude entsteht ein berühmtes Gruppenbild mit einer Dame – Marie Curie (Dritte von links in der ersten Reihe, Albert Einstein vorn in der Mitte, Niels Bohr mittlere Reihe ganz rechts)



DER

.....

Im Oktober 1927 treffen sich die Urväter der Quantenmechanik und die jungen Wilden in Brüssel bei der fünften Solvay-Konferenz. Das Treffen ist der Beginn einer intensiven Debatte über die weltanschauliche Bedeutung der neuen Wissenschaft. Einer Debatte, die geprägt wird von den ganz unterschiedlichen Auffassungen zweier Koryphäen:
Niels Bohr und Albert Einstein

.....

Text: Alexander Stirn



f

Frühstück mit Albert Einstein kann anstrengend sein. Zeit für Kaffee und Croissants? Für einen Plausch im eleganten Speisesaal? Fürs Wachwerden? Nicht mit dem Großmeister der Physik. Ganz besonders nicht, wenn Einstein unzufrieden ist. Wenn er etwas nicht verstanden hat. Wenn er die Verfechter einer neuen Theorie herausfordern, intellektuell kitzeln und von der Ausweglosigkeit ihrer Gedanken überzeugen will.

Dann kommt statt Kaffee und Croissants etwas anderes auf den Tisch: ein Gedankenexperiment. Dann geht es schon am frühen Morgen um Elektronen, die durch Schlitze fliegen, um Wellenmuster und um Platten, die sich kaum spürbar bewegen. Ob es den Tischgenossen bei all dem noch schmeckt? Egal, außergewöhnliche Zeiten erfordern schließlich außergewöhnliche Maßnahmen. Selbst beim Frühstück.

Und die Zeiten sind 1927 in der Tat außergewöhnlich. Die Physik ist auf einem Höhepunkt und zugleich in einer tiefen Krise: Nichts ist mehr, wie es war, und Schuld daran ist die Quantenmechanik. Durch die revolutionäre Theorie haben die klassischen Begriffe von Ort, Geschwindigkeit, Messung ihre Bedeutung verloren. Ursache und Wirkung verschwimmen. Stattdessen dominieren Ungewissheit, Statistik, ja der Zufall. Ein physikalisches Teilchen, so will es die neue Theorie, ist überall und nirgends. Seinen Ort legt es erst bei der Messung fest, und selbst die ist nicht beliebig genau. Das hinterlässt viele Fragezeichen.

Andererseits sind die Forschungsarbeiten zur neuen Theorie mittlerweile zu einem ersten Abschluss gekommen. Die Quantenmechanik scheint in sich stimmig, ihre Formeln beschreiben hervorragend alle beobachteten Effekte. Doch warum das so ist, was all das bedeutet, für die Physik und für die reale Welt, ist offener denn je. Es fehlt eine schlüssige Interpretation, es fehlt ein philosophisches Gerüst. Und es geht um nicht weniger als um die Frage, was in dieser schönen, neuen Quantenwelt überhaupt noch Wirklichkeit ist.

Genau deshalb sitzt Einstein an diesem grauen Oktobertag im Frühstücksraum des Grand Hôtel Britannique in Brüssel – und mit ihm all die anderen führenden Physiker seiner Zeit plus eine einzige Physikerin. Sie sind in Belgiens Hauptstadt gereist, um an der Solvay-Konferenz teilzunehmen, dem mit Abstand wichtigsten Physiker-treffen des noch jungen 20. Jahrhunderts. Es ist ein exklusiver Club: Teilnahme nur auf Einladung.

Ins Leben gerufen hat die Konferenzreihe der belgische Industrielle Ernest Solvay. Als überzeugter Philanthrop wollte er Forschern die Möglichkeit geben, in großer

Runde die jeweils drängendsten physikalischen Probleme der Zeit zu diskutieren. Nun steht die fünfte Auflage der Konferenz an, auch wenn diese fast ausgefallen wäre. Denn es bedurfte erst einer Privataudienz bei Belgiens König, um das Spitzentreffen der Physik Wirklichkeit werden zu lassen.

Höchstpersönlich musste Solvay-Organisator Hendrik Lorentz, der große alte Mann der Physik, in den königlichen Palast pilgern, schräg gegenüber vom Grand Hôtel Britannique. Er musste seine Pläne vorlegen und eine Lanze brechen für die einzuladenden deutschen und österreichischen Physiker. Denn die waren, nach dem deutschen Überfall auf Belgien im Ersten Weltkrieg und der üblen Behandlung der Bevölkerung, im Lande eigentlich unerwünscht.

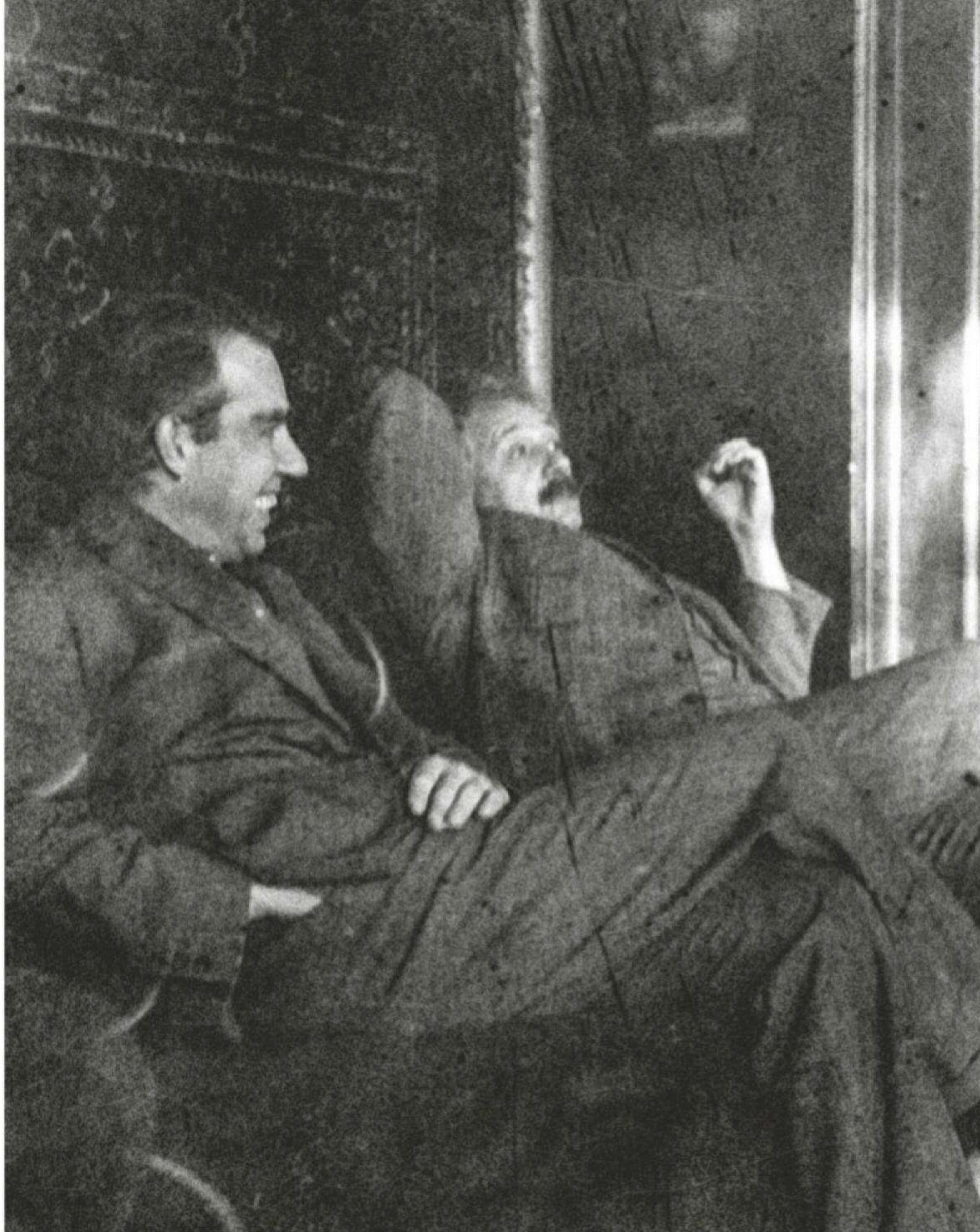
Und doch konnte Lorentz den König davon überzeugen, dass ein „besseres Verständnis zwischen den Völkern in der Zukunft absolut notwendig sei und dass die Wissenschaft dazu beitragen könne“, wie er sich später erinnern wird. Nur die Einladungsliste, die sollte vor der deutschlandkritischen Presse lieber geheim gehalten werden.

a

Alle auf der Liste sind gekommen. Da ist Albert Einstein, der mit seinen Arbeiten zum photoelektrischen Effekt, bei dem die Quanteneigenschaften des Lichts zutage treten, den Interpretationsschlamassel einst ausgelöst hat. Da ist der selbstbewusste Niels Bohr aus Kopenhagen, zu der Zeit der unangefochtene Meister der Quanten. Da ist der Göttinger Privatdozent Werner Heisenberg, Bohrs Schüler und einer der jungen Wilden, die mit ihren neuen Theorien gerade die Physik aufmischen.

Und da ist der gebürtige Österreicher Paul Ehrenfest, ein Mann des Ausgleichs, der Klarheit, des offenen Wortes – und, wie seine Kollegen schwärmen, das „Gewissen der Physik“. 28 Männer sind insgesamt nach Brüssel gekommen und eine Frau, Marie Curie. 17 von ihnen sind zu dem Zeitpunkt bereits oder werden künftig noch mit dem Nobelpreis ausgezeichnet.

Der Weg ist kurz vom Grand Hôtel Britannique zum Leopold-Park, wo im Institut für Physiologie die Solvay-Konferenz angesetzt ist. Punkt zehn Uhr soll es losgehen. Zum Start hat Organisator Lorentz das Thema „Reflexion von Röntgenstrahlen“ auf die Tagesordnung gesetzt, gefolgt von einem Vortrag zur klassischen Strahlungstheorie und ihrem Unvermögen, die neuen Quanteneffekte zu erklären. Leichte Kost, nichts Kontroverses. Trotzdem entspannt sich eine muntere Diskussion. Am Ende des ersten Tages haben sich alle wichtigen Konferenzteilnehmer und die eine Teilnehmerin zu Wort gemeldet. Nur einer schweigt: Albert Einstein.



Trotz ihrer unterschiedlichen Auffassungen darüber, was wir über die Natur der Dinge wissen können, schätzten Albert Einstein und Niels Bohr einander sehr (hier bei einem Gedankenaustausch 1925)

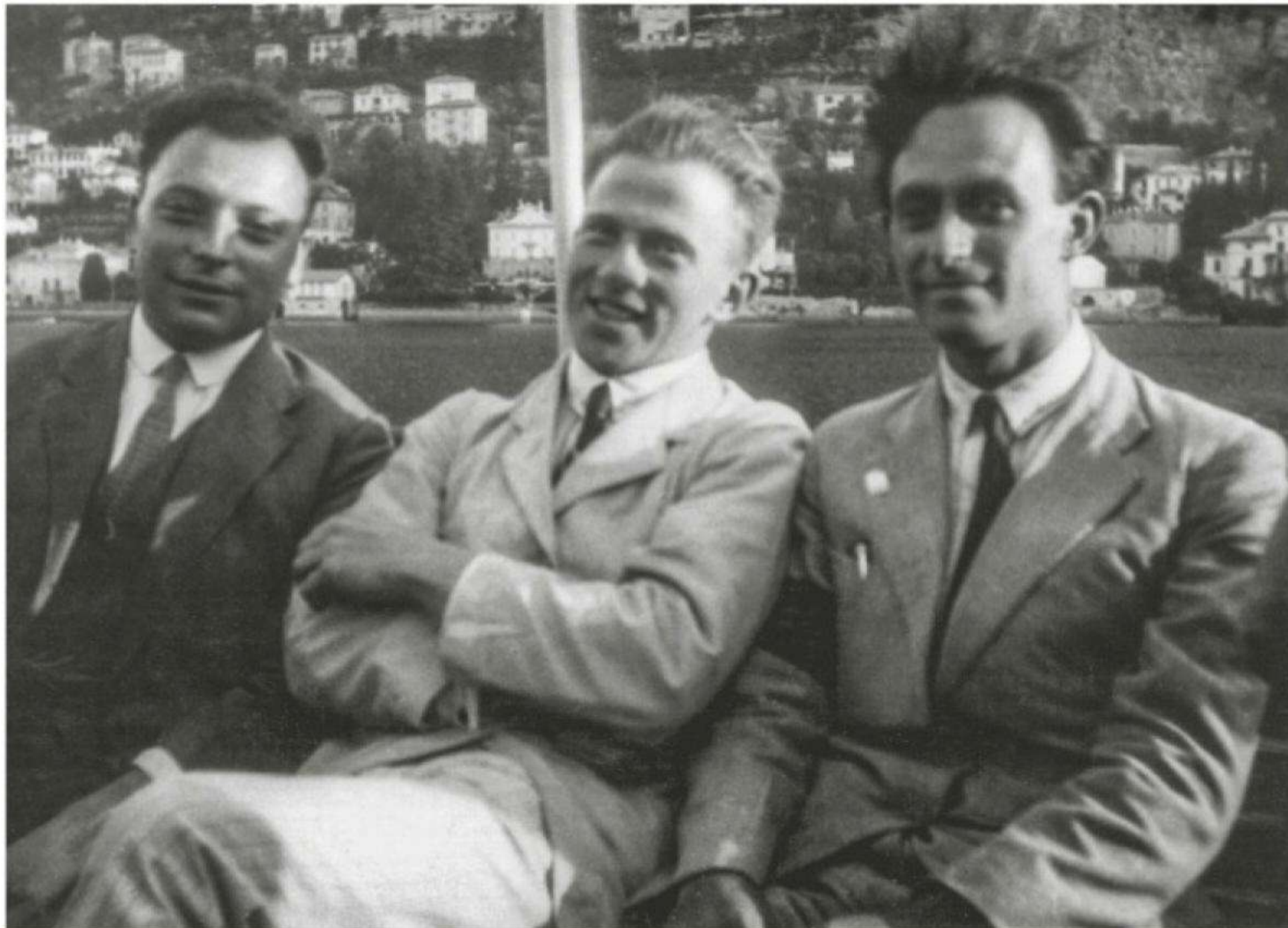
.....

Albert Einstein sagt seinen Vortrag ab. Er fühle sich »nicht kompetent« genug, begründet er seinen Rückzieher. Aber der Altmeister lügt

.....

Dabei hätte auch Einstein einen Vortrag halten sollen. Er hatte sogar schon zugesagt, machte vier Monate vor Konferenzbeginn aber einen Rückzieher. Immerhin ist er als Zuhörer angereist. Gegenüber Lorentz begründet er seine Absage damit, er fühle sich „nicht kompetent“ genug: „Der Grund liegt darin, dass ich an der modernen Entwicklung der Quantentheorie nicht so intensiv teilnehmen konnte, wie es für diesen Zweck notwendig wäre.“

Das allerdings ist eine Lüge. Einstein verfolgt den Sturm um die Quantenmechanik im Detail. Er kennt die wichtigsten Veröffentlichungen genau. Sein Problem liegt woanders: Einstein wird mit der Quantenmechanik nicht so recht warm, er fremdelt mit ihr. Nicht, dass er sie fachlich ablehnt. Nicht, dass er ihre Formeln in Zweifel zieht. Im Gegenteil. Mit seiner Arbeit zu den Lichtquanten hat er sogar einen entscheidenden Baustein geliefert. Es ist vielmehr ein grundsätzliches Unbehagen: Eine Theorie, die nicht mehr streng deterministisch ist, bei der sich ein



Kurz vor der Brüsseler Konferenz trafen sich Quantenphysiker zu einer Tagung in Como in Italien, unter ihnen Wolfgang Pauli, Werner Heisenberg und Enrico Fermi (von links bei einem Schiffsausflug). Bohr trug seine Idee der Komplementarität von Welle und Teilchen vor. Einstein war nicht angereist

bestimmtes Ereignis nicht mehr zwangsläufig auf eine definierte Ursache zurückführen lässt, passt nicht zu seinem physikalischen Wertesystem, zu seinem Verständnis von Wahrheit. „Das mit der Kausalität plagt mich viel“, schrieb er bereits 1920.

Und dann ist da noch die Sache mit den Teilchen und den Wellen. Jedes quantenphysikalische Objekt – sei es ein Elektron, ein Lichtquant oder ein mikroskopisch kleines Stück Materie – lässt sich in der Quantenmechanik sowohl wie eine Welle als auch wie ein Teilchen beschreiben. Dabei ist beides grundverschieden, jedenfalls in der klassischen Welt: Teilchen sind zu einem bestimmten Zeitpunkt nur an einem bestimmten Ort zu finden. Wellen breiten sich hingegen überall aus.

Wie soll das zusammenpassen? Gar nicht, meint Einstein. Seit Langem versucht er daher, Wellen- und Teilchenbeschreibung zu verschmelzen, bislang allerdings ohne Erfolg. Trotzdem ist Einstein überzeugt, dass es hinter der Quantenmechanik eine andere, eine grundlegendere Theorie geben muss – eine Theorie, die sein Weltbild geraderückt. Die derzeit diskutierten Ideen, so viel ist für Einstein klar, beschreiben die Wirklichkeit jedenfalls nicht widerspruchsfrei und erst recht nicht vollständig.

Der junge Werner Heisenberg, gerade einmal 25 Jahre alt, sieht das anders. Wenige Monate vor Beginn der Solvay-Konferenz hat er eine Gesetzmäßigkeit aufgestellt, die alle klassischen Vorstellungen zu sprengen scheint. Der Ort und der sogenannte Impuls, also die Wucht eines Teilchens, lassen sich demnach nicht exakt bestimmen,

zumindest nicht zum selben Zeitpunkt: Je genauer die Position eines Objekts ermittelt wird, desto ungenauer wird sein gemessener Impuls – und umgekehrt.

a

Als »Unschärferelation« wird die kühne These später in die Physikbücher eingehen (siehe Seite 48). Heisenberg hat sie direkt aus den Quantenregeln abgeleitet. Die schreiben vor, dass sich die Eigenschaften eines Objekts immer nur mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit angeben lassen. Ihren tatsächlichen Wert, argumentiert Heisenberg, erhielten sie erst bei der Messung. Vorher sei jede Frage nach Ort und Geschwindigkeit sinnlos. Heisenberg schließt seinen Vortrag mit einer selbstbewussten, provokanten Feststellung. Er halte die Quantenmechanik „für eine abgeschlossene Theorie, deren physikalische und mathematische Grundannahmen keine Veränderungen mehr zulassen.“ Problem gelöst. Fall abgeschlossen.

Es ist eine Spitze gegen Einstein. Und es ist die Hoffnung, dem Großmeister endlich eine Reaktion zu entlocken – schließlich ist die versammelte Physik-Elite auch deshalb nach Brüssel gekommen, um Einsteins Meinung zu den Entwicklungen in der Quantenmechanik zu hören.

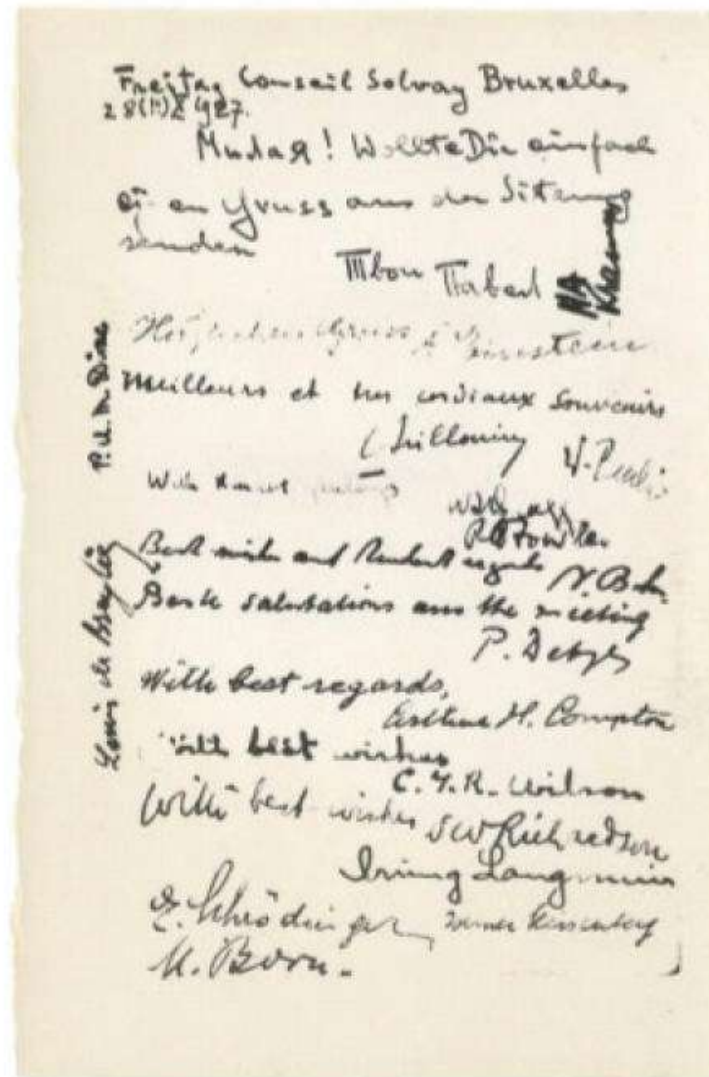
Und Einstein? Schweigt.

Auch Werner Heisenberg bringt etwas zu Papier. Es ist ein Brief an seine Eltern. Und eine Kampfansage. Heisenberg schreibt: „Die eigentliche Schlacht fängt morgen an.“

Nun also der nächste Versuch: Ein quantenphysikalisches Objekt, referiert Bohr, besitze schlichtweg keine ihm innewohnenden Eigenschaften. Es existiert nicht einmal, solange niemand es beobachtet. Es folgt nur bestimmten Tendenzen, bestimmten Möglichkeiten. Das Teilchen hat somit auch keinen Ort, keine Geschwindigkeit, keine anderen physikalischen Eigenschaften. Erst durch eine Messung werden all diese Attribute erschaffen. Es gibt somit, folgert Bohr, keine Quantenwirklichkeit, die unabhängig von einem Beobachter existiert. Die Beobachtung schafft vielmehr ihre eigene Realität.

Werner Heisenberg

provoziert seine Zuhörer: Die Quanten-
theorie sei abgeschlossen, behauptet
der junge Wilde. Problem gelöst,
Fall beendet



Bohr ist perplex. Er hat Einsteins Intention nicht begriffen. Und er ärgert sich, dass der wertvolle Kollege mit keinem Wort auf seine mühsam erarbeitete Interpretation eingegangen ist. „Ich befinde mich in einer sehr schwierigen Situation, weil ich nicht genau verstehe, worauf Einstein hinaus will“, sagt Bohr. „Bestimmt ist das mein

Fehler.“ Entsprechend schwammig fällt seine Erwiderung aus: Der Kollege, meint Bohr, hänge noch immer zu sehr in der klassischen Welt fest.

Der Konferenztag endet unbefriedigend, die Verwirrung ist groß. Irgendwann steht Ehrenfest auf und schreibt einen Bibelvers an die Tafel. Genesis 11, Vers 3 bis 7, die Legende vom Turmbau zu Babel und der daraus folgenden Sprachverwirrung. Ehrenfest geht es nicht um das Konferenz-Kauderwelsch aus Deutsch, Französisch und Englisch, das der sprachgewandte Lorentz ständig dolmetschen muss. Es geht ihm um die Sprache der Physik, um die Sprache der Quantenmechanik, die offenbar niemand mehr versteht.

Neuer Tag, neues Frühstück, neues Gedankenexperiment. Einstein hat nachgedacht und serviert Bohr im Frühstücksraum des Grand Hôtel Britannique einen verfeinerten Versuchsaufbau. Die Platte mit dem Schlitz ist beweglich geworden. Hinter ihr fügt Einstein eine weitere Wand mit zwei Schlitzen ein. Und die abschließende Fotoplatte ist dieses Mal eben.

Fliegt nun ein Teilchen durch den ersten Schlitz, wird es, wie immer in der Physik, abgelenkt – manchmal in Richtung des oberen Schlitzes der zweiten Platte, manchmal in Richtung des unteren. Da der Impuls des gesamten Systems erhalten bleiben muss – noch so ein physikalisches Grundgesetz –, geht dies nicht spurlos an der ersten Platte vorbei. Sie wird, wenn sie das Teilchen nach oben ablenkt, leicht nach unten gedrückt – und umgekehrt. Dieser Effekt lässt sich messen.

S

Schafft es das Teilchen auch durch den oberen oder unteren Schlitz der zweiten Platte, schlägt es schließlich auf dem fotografischen Film ein. Auch diesen Ort können Physiker bestimmen. Die Bahn des Teilchens ist somit genau bekannt.

Durchqueren nun nach und nach viele Partikel die Apparatur, wird jedes ein klein bisschen anders abgelenkt. Auf der Fotoplatte entsteht dennoch kein zufälliges Muster. Vielmehr tauchen mit der Zeit die typischen Streifen des Doppelspalt-Experiments auf (siehe Seite 34), eines der klassischen Experimente. Das Streifenmuster lässt sich indes nur erklären, wenn Physiker davon ausgehen, dass sich Wellen von den Schlitzen ausbreiten und schließlich überlagern.

In ein und demselben Experiment lassen sich somit, argumentiert Einstein, die Teilchen-Eigenschaften der Quanten verfolgen, also ihre Bahnen, und ihr Verhalten als Welle. Das jedoch widerspricht dem Bohr'schen Konzept komplementärer Phänomene. Somit, sagt Einstein, kann die Quantenmechanik in sich nicht schlüssig sein.

Niels Bohr sieht sich mit immer kniffligeren Gedankenexperimenten konfrontiert. Er versucht sie zu widerlegen – und verfeinert so seine Ideen

Ein Fehler in seiner über Jahre entwickelten Theorie? Bohr, der aufmerksam lauscht, glaubt nicht daran. Er ist überzeugt, dass der Fehler bei Einstein liegt. Nur wo?

Im offiziellen Tagungsband der Solvay-Konferenz wird später kaum etwas von dieser Diskussion auftauchen, die als eine der wichtigsten Debatten der Physik in die Geschichtsbücher eingehen sollte. Bohr und Einstein, sekundiert von Heisenberg und Ehrenfest, diskutieren vielmehr informell – beim Frühstück, auf dem Weg zum Tagungsort, in den Pausen und schließlich beim Abendessen. Denn Einsteins Einwand ist knifflig, eine Lösung braucht ihre Zeit. Bohr muss sich den imaginären Versuchsaufbau sogar aufzeichnen, um einen möglichen Denkfehler zu erkennen.

Endlich, rechtzeitig zum Abendessen, kommt ihm die rettende Idee: Messen Physiker die Wucht, mit der die erste Platte nach oben oder unten abgelenkt wird, um daraus die Flugbahn des Teilchens zu ermitteln, dann können sie andererseits die Position des Schlitzes nicht mehr genau angeben. Heisenbergs Unschärferelation verbietet das. Der Startpunkt des Teilchens lässt sich somit nicht mehr festlegen, er variiert.

Es ist dann zwar noch möglich, die Bahn des Partikels durch den oberen oder unteren Spalt zu bestimmen. In der Wellensicht führt der unscharfe Startpunkt aber dazu, dass Berge und Täler der Wellen leicht gegeneinander verschoben sind. Sie können sich nicht mehr korrekt überlagern, das hell-dunkle Streifenmuster hinter dem Doppelspalt wird zerstört. Physiker können also entweder den genauen Weg eines Teilchens verfolgen, oder sie können seine Welleneigenschaften studieren, aber sie können nicht beides zugleich.

Und Einstein? Hat dem wenig entgegenzusetzen, zumindest fürs Erste. Er ist aber, wie sich Heisenberg später erinnern wird, „in seinem Herzen nicht überzeugt“. Irgendetwas stört den Altmeister. Irgendetwas widerspricht seinem Sinn der Ordnung und der geregelten Abläufe im Universum – welch höhere Macht auch immer dahinterstecken mag. „Die Theorie liefert viel, aber dem Geheimnis des Alten bringt sie uns kaum näher“, hatte er bereits zuvor mit Blick auf Gott, den Alten, geäußert.

„Jedenfalls bin ich überzeugt, dass der nicht würfelt.“ Bohr hält dagegen: „Aber es kann doch nicht unsere Sache sein, Gott vorzuschreiben, wie er die Welt regieren soll.“

Selbst Paul Ehrenfest, der wortgewaltige Vermittler, der enge Freund beider Konkurrenten, verliert langsam die Geduld mit Einstein. Zwar hält er Bohr „arge Beschwörungsterminologie“ und „philosophisches Rauchgewölk“ vor, den Großteil der Kritik bekommt aber sein Berliner Freund ab. „Ich schäme mich für dich, Einstein!“, sagt Ehrenfest, durchaus im Ernst. „Du versetzt dich hier ganz in dieselbe Lage wie deine Gegner in den vergeblichen Versuchen, deine Relativitätstheorie zu widerlegen.“

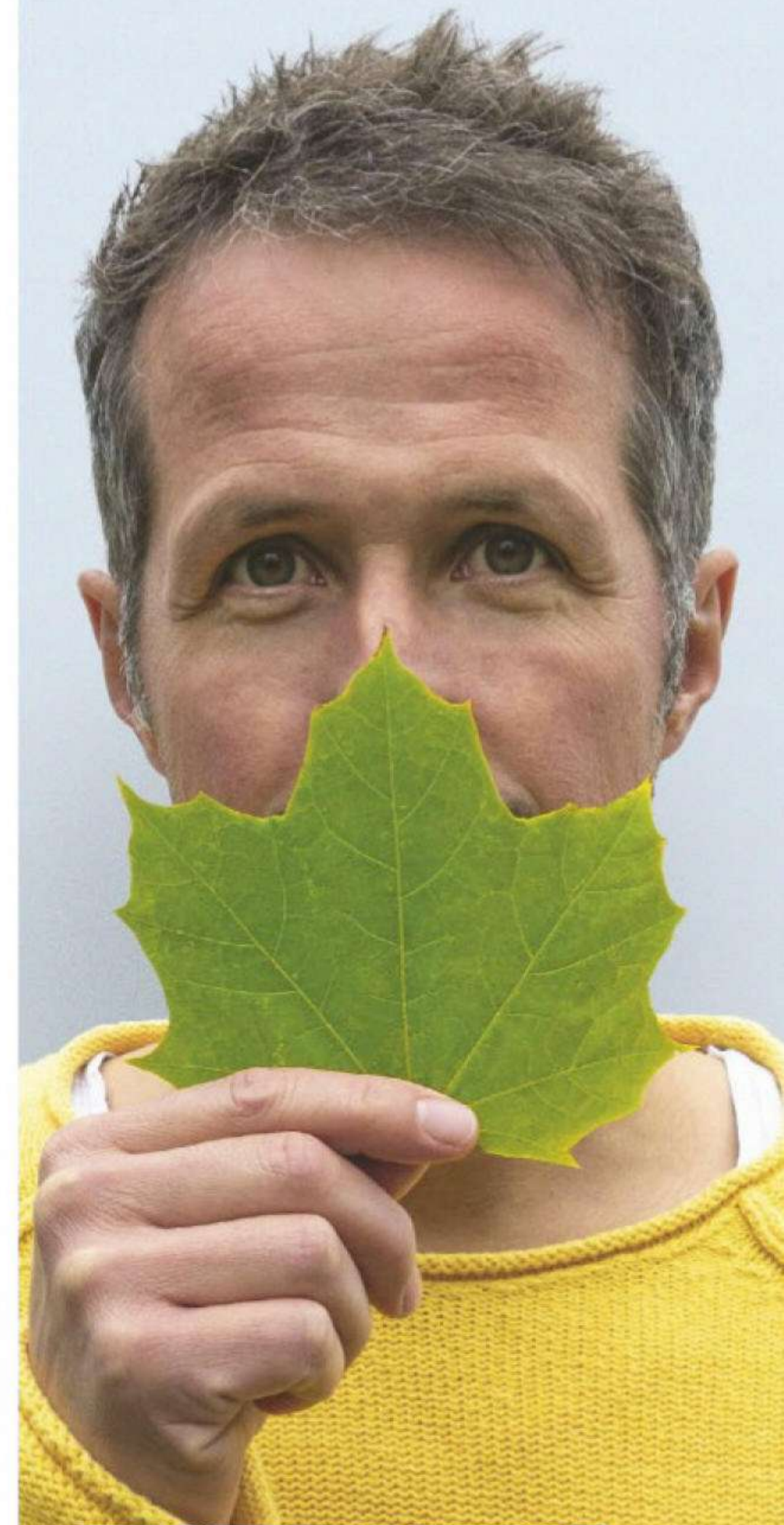
Doch ein Albert Einstein gibt nicht so schnell auf – auch wenn die Konkurrenz in Brüssel triumphiert, auch wenn ihre zunächst kühnen Thesen zunehmend Akzeptanz finden. Oder gerade deswegen: „Die Heisenberg-Bohr'sche Beruhigungsphilosophie – oder Religion? – ist so fein ausgeheckt, dass sie dem Gläubigen einstweilen ein sanftes Ruhekissen liefert, von dem er nicht so leicht sich aufscheuchen lässt“, schreibt Einstein, einige Monate, nachdem er erschöpft und niedergeschlagen aus Brüssel abgereist ist. „Also lasse man ihn liegen.“ Aber genau das will Einstein nicht zulassen.

e

Er wird weiter Gedankenexperimente entwickeln, noch ausgefeilter, noch kniffliger. Er wird Bohr weiter damit triezen, zum Beispiel bei der nächsten Solvay-Konferenz. Uhren und Waagen werden dann den imaginären Versuchsaufbau ergänzen, immer in der Hoffnung, einen Widerspruch in der Quantenmechanik offenzulegen. Bohr wird erneut stutzen, grübeln und spätestens am nächsten Tag, beim Frühstück im Grand Hôtel Britannique, durch geschickte Auslegung seiner Interpretation der Quantenmechanik jeden Widerspruch ins Leere laufen lassen.

Fast drei Jahrzehnte lang wird das so gehen. Einstein wird Aufsätze schreiben, Bohr wird versuchen, sie zu widerlegen. Und er wird seine Ideen, dank der angeregten, humorvollen, stets kollegialen Diskussionen mit Einstein, Stück für Stück verfeinern. So lange, bis aus ihnen ein Sammelsurium namens „Kopenhagener Deutung“ der Quantenmechanik wird. So lange, bis die Mehrheit der Physikgemeinde das Gedankengebäude – allen fragwürdig erscheinenden Argumenten zum Trotz – akzeptiert, bis sie es sich auf Bohrs sanftem Ruhekissen bequem macht, bis sie nur noch rechnet und nicht mehr über Widersprüche der Theorie nachdenkt.

Was allerdings bleiben wird, ist die Erinnerung an eine der ganz großen Debatten der Physik. Begonnen im Grand Hôtel Britannique, beim Frühstück, zwischen Kaffee und Croissants •



STOP TALKING. START PLANTING.

Die Klimakrise ist ein Wettlauf gegen die Zeit. Zum Glück gibt es Bäume. Sie verschaffen uns wertvolle Zeit, um Emissionen zu reduzieren. Deswegen hat **Willi Weitzel** gerade 1000 Bäume gepflanzt. Pflanz mit - mit einem Klick auf **plant-for-the-planet.org** oder unserer **App**.



An der Grenze des

WISSENS

Als Werner Heisenberg im Winter 1926/27 durch den Fælled-Park am Kopenhagener Institut für Theoretische Physik spazierte, war es schon spät in der Nacht. Heisenberg grübelte über ein Experiment, das er seit Wochen mit seinem Mentor Niels Bohr diskutierte: Nebelkammern.

Nebelkammern machen geladene Teilchen wie Elektronen fürs bloße Auge sichtbar. In dem mit Wasserdampf gesättigten Gefäß hinterlassen sie Spuren wie Flugzeuge Kondensstreifen am Himmel. Doch in der Quantenmechanik sollten Teilchen auch Wellen sein, die sich im Raum unendlich ausbreiten – unvereinbar mit dem, was die Nebelkammer zeigte. Heisenberg hatte versucht, die Bahnen der Partikel mathematisch zu beschreiben und den augenscheinlichen Widerspruch aufzulösen, bis dato aber ohne Erfolg.

Aber was wäre, dachte er in dieser Nacht, wenn es gar keine genauen Bahnen gäbe? Wenn ein Elektron keine präzise Position hätte, sondern über eine Raumregion verschmiert wäre? Könnte er damit das Rätsel lösen?

Heisenberg, damals 25 Jahre alt, kehrte an seinen Schreibtisch zurück und brachte seine neue Idee in eine mathematische Form. Dafür benutzte er die ihm vertrauten Gleichungen der Quantenmechanik, die er zwei Jahre zuvor entwickelt

hatte. Alles passte zusammen. Er schrieb seinem Freund Wolfgang Pauli: „Wenn es je ein Experiment gäbe, das p und q gleichzeitig und genau zu bestimmen gestattete, müsste die Quantenmechanik notwendig falsch sein.“ Mit p meinte er den Impuls, und q stand für den Ort eines Teilchens.

Dieser Brief ist die erste Erwähnung von Heisenbergs Unschärferelation. Ihre Entdeckung sollte Physiker und Physikerinnen zur Verzweiflung treiben, Mystiker aufjuchzen lassen und Agnostikerinnen erleichtern.

Die Unschärferelation definiert die Grenzen dessen, was sich über die Welt im Allerkleinsten aussagen lässt. Im Prinzip besagt sie, dass zwei bestimmte Eigenschaften eines Teilchens nicht beliebig genau gleichzeitig gemessen werden können. Nach Heisenberg kann das Produkt der Messungenauigkeiten nicht kleiner sein als ein fester Zahlenwert: das Planck'sche Wirkungsquantum geteilt durch 4π . Diese Konstante ist eine der Grundgrößen der Quantenmechanik.

Das Verblüffende an der Unschärferelation ist: Die Grenze beruht nicht darauf, dass die technischen Voraussetzungen fehlen, besser zu messen, sondern dass die untersuchten Eigenschaften nicht genauer *existieren*. Nicht unser Wissen über die Natur ist unvollständig, sondern die Natur selbst ist laut grundlegender Gesetze der Quantenmechanik im Kern unscharf.

Ein Eigenschaftspaar, für das Heisenbergs Relation gilt, sind der Ort und der Impuls eines Teilchens, und damit auch seine Geschwindigkeit. Je genauer bestimmt ist, wo es sich befindet, desto diffuser ist seine Geschwindigkeit, ein unvermeidbarer Kompromiss.

So löste Heisenberg das Rätsel der Nebelkammer. Was sich dort zeigt, ist nicht das Elektron selbst, das den Raum durchmisst, sondern sind Wassertröpfchen, tausendfach größer. Zu sehen ist auch keine durchgängige Flugbahn, sondern nur eine punktweise Abfolge von unscharfen Orten. Heisenberg hatte die genaue Bahn nicht berechnen können, weil sie offenbar schlicht nicht existierte.

Mit der Entdeckung der Unschärferelation revidierte Heisenberg auch das Atommodell Niels Bohrs. In dessen Vorstellung kreisten Elektronen auf festen Bahnen um den Atomkern. Die Unschärferelation verbietet eine so genaue Orts- und Geschwindigkeitsfestlegung. Statt auf präzisen Orbits sind die Elektronen in diffusen Wolken unterwegs.

Die Unschärferelation löste einen Aufruhr in der Physik aus. Die Quantenmechanik war noch jung, und es war längst nicht klar, ob sie für mehr zu gebrauchen war als zur Berechnung der Energiezustände von Atomen. Nun zog Heisenberg eine Grenze des Wissens, an der es kein Vorbeikommen gab.

„In eine kognitive und moralische Krise“ stürzte diese Erkenntnis den

Die Entmachtung der Naturwissenschaften? Eine moralische Krise?

Die Rückkehr des freien Willens? Kaum eine quantenmechanische Entdeckung

hat so viele Deutungen, Fehlinterpretationen, Phantasmen ausgelöst

wie **Heisenbergs Unschärferelation**. Was sie wirklich aussagt – und was nicht

E N S

Text: **Theresa Palm**

Physik-Nobelpreisträger Percy Bridgman. Denn das Grundgerüst der klassischen Physik brach in sich zusammen. Ihr Selbstverständnis war bisher, dass, wenn nur alles perfekt lief, sich jede Eigenschaft eines Objekts präzise bestimmen ließe. Damit machte Heisenberg Schluss. Es war das Ende der allwissenden Naturwissenschaften.

Dass die tiefgreifende Erkenntnis oft falsch interpretiert wird, liegt auch an ihrem Begründer. Obwohl Theoretiker durch und durch, versuchte sich Heisenberg an einer „anschaulichen Beschreibung“ der Unschärfe. Dabei verhedderte er sich in Widersprüchen und begründete das häufigste Missverständnis um die Relation.

Heisenberg führte ein Gedankenexperiment an, das eine falsche Fährte legte: Man stelle sich ein Mikroskop vor, schrieb er, das mit Gammastrahlen messe, deren Wellenlänge so klein sei, dass sie Elektronen wahrnehmen könnten. Dann müsse die Berührung von Lichtteilchen und Elektron Letzteres so stark anstoßen, dass eine Ortsmessung die Geschwindigkeit und damit den Impuls verfälsche. Heisenberg sah die Schuld also in der Messung. Damit widersprach er der Kernaussage seiner Unschärferelation: dass das Elektron zu dem Zeitpunkt weder eine bestimmte Geschwindigkeit noch einen definierten Ort hat.

Die Unschärferelation wird oft auch auf andere Weise missverstanden. Sie bedeutet etwa nicht, dass keine Größe genauer als ein bestimmter Wert gemessen werden kann. Eine Eigenschaft eines Objekts lässt sich präzise bestimmen – bloß nicht zwei Partnereigenschaften gleichzeitig.

Im Alltag bemerken wir von der Einschränkung nichts, auch wenn sie genauso für Fahrräder und Fußbälle gilt. Diese Dinge sind so viel schwerer als Quantenteilchen, dass die Unschärfegrenze weit unter dem liegt, was wir wahrnehmen. Vermisst man etwa einen Fußballschuss auf 0,004 Kilometer pro Stunde genau, lässt sich der Ort der Lederkugel maximal auf 10^{-28} Millimeter genau bestimmen: eine Eins, 28 Stellen hinter dem Komma. Eine unvorstellbare kleine Abmessung.

Percy Bridgman sorgte sich früh, dass der neu entdeckte blinde Fleck der Wissenschaft zweckentfremdet werden würde: „Er wird zur Substanz der Seele erklärt werden, die Geister der Toten werden ihn besiedeln, Gott wird in seinen Schatten lauern.“ Er sollte recht behalten – die Unschärferelation war ein griffiges Konzept, das seinen Weg in die Popkultur und die Philosophie fand.

In den Augen des Nobelpreisträgers Arthur Holly Compton sorgte sie für den „Gottesbeweis“. Die Unschärferelation bedeutete für ihn, dass es eine wissende Instanz geben müsse, die diese Lücke in der menschlichen Wahrnehmung schließe.

Compton glaubte wegen der Quantenmechanik an ein höheres Wesen, das die Geschehnisse des Universums leite. So wundersam die Welt der Atome war, musste sie doch von einem absichtsvollen Schöpfer geschaffen sein!

Für Atheisten lieferte Heisenbergs Entdeckung im Gegenteil die Gewissheit, dass alles im Universum zufällig ist. Und auch Mystikerinnen brachte sie neue Argumente. Im Reich hinter der Unschärfegrenze konnten Geister und andere unerklärliche Dinge Unterschlupf finden.

Philosophen und Philosophinnen hingegen sahen die Welt endlich aus den berechenbaren Bahnen des mechanischen Determinismus befreit. Der französische Mathematiker Pierre-Simon Laplace hatte noch gedacht, wenn wir Ort und Geschwindigkeit aller Himmelskörper kennen, könnten wir die Zukunft vorhersagen. Doch anstelle von festgelegten Abläufen war nun Platz für den freien Willen – oder puren Zufall.

Heisenberg fand selbst eine philosophische Konsequenz in seiner Entdeckung. Für Immanuel Kant war die Kausalität eine wohldefinierte Verkettung, es konnte keine Wirkung ohne Ursache geben. Heisenberg aber erklärte, man könne nicht mehr folgern „Aus A folgt B“, wenn der Zustand A nicht exakt zu bestimmen sei. Zum jungen Carl Friedrich von Weizsäcker soll er auf einer Taxifahrt deshalb gesagt haben: „Ich glaube, ich habe Kant widerlegt.“ •

In der Anfangszeit prägte eine überschaubare Gruppe fast ausschließlich männlicher Forscher die Quantenphysik. Heute ist daraus ein Megaprojekt mit vielen Tausend Menschen geworden. Wir stellen kluge Köpfe aus Vergangenheit und Gegenwart vor

Gesichter Wissen



Illustrationen: Anja Stiehler

einer schaft

Virtuelles Gruppenbild

Unsere Montage vereint mehrere Generationen.

Von links: Erwin Schrödinger,
Karen Hallberg, Paul Dirac, Chien-Shiung Wu
und Werner Heisenberg

Karen Hallberg engagiert sich in der Friedensbewegung: Sie sorgt sich, dass die Quantenphysik missbraucht werden könnte



»Miss Warum«

Wenn Quantenobjekte sich zusammenscharen, ist das Ganze mehr als die Summe der Teilchen. Karen Hallberg untersucht dieses Gruppenphänomen. So will sie die Grundlagen schaffen für Materialien mit neuen Eigenschaften

Rückblickend war Karen Hallbergs Karriere als Quantenphysikerin vermutlich an jenem Tag besiegelt, an dem ihr Vater ihr von Albert Einstein erzählte. „Kaum jemand in der Welt versteht die Relativitätstheorie“, sagte der Vater. „Wie kann das sein?“, entgegnete die Tochter, damals noch eine Jugendliche. Die Frage ließ ihr fortan keine Ruhe.

Karen Hallberg, geboren 1964 in der Industriestadt Rosario in Argentinien, liebt Herausforderungen. Sie geht sie an wie Andere Freizeitparks: Sie stürzt sich hinein. Als junge Frau kandidiert sie für die Wahl zur Miss Argentinien. Im Alter von 45 Jahren beginnt sie Cello zu spielen. „Ich bin nicht gut am Cello, aber ich spiele es mit Hingabe“, sagt sie.

Schon als Kind bekommt sie für ihre unersättliche Neugierde den Spitznamen „Señorita Por Qué“, „Miss Warum“. Gemeinsam mit Freundinnen gründet sie einen Wissen-

schaftsclub für Mädchen. Und mit Hingabe stürzt sie sich auch als junge Frau in die Naturwissenschaften: Sie studiert zwei Jahre Elektrotechnik in Rosario, im Norden des Landes.

Dann beschließt sie jedoch, sich am anderen Ende Argentiniens, 2400 Kilometer von ihrer Heimat Jujuy entfernt, einer Aufnahmeprüfung zu stellen, von der es heißt, nur Genies könnten sie bestehen: Sie will Physik am Instituto Balseiro in Bariloche studieren, einer Forschungsstätte, die teils von Argentiniens Atomenergiekommission betrieben wird. Karen Hallberg besteht, bekommt damit automatisch ein Stipendium. In Bariloche ist sie eine von nur einer guten Handvoll Frauen im gesamten Jahrgang.

Mitte der 1980er Jahre, als sie am Ende des Studiums steht, entdecken Forschende in der Schweiz keramische Materialien, die bei deutlich höheren Temperaturen als metallische Werkstoffe zu Supraleitern werden, in denen Elektronen also ohne Widerstand und ohne Energieverlust fließen. Ein Team am Balseiro beginnt die neuen Stoffe zu untersuchen, darunter Karen Hallberg.

Was sie fasziniert: Elektronen verhielten sich in diesen Materialien im Kollektiv anders als einzeln, sagt die Physikerin. „Wie Menschen bei einem Rockkonzert. Das Ganze ist mehr als die Summe der Teile.“

Dabei ist das „Rockkonzert“ unvorstellbar groß. „Ein Halbleiter in einem Handy enthält rund eine Quadrillion Elektronen – eine Eins gefolgt von 24 Nullen. Kein Computer der Welt kann die verschiedenen Zustände dieser Elektronen berechnen“, sagt Hallberg.

Sie will dem Verständnis solcher Teilchenensembles so nahe wie möglich kommen und entwickelt dazu wegberreitende Rechenansätze. Am Bariloche Atomzentrum kann sie mit ihren ausgefeilten Berechnungsmethoden wichtige „Verhaltenszustände“ von Quantenmaterie abschätzen. Sie hofft, sogar bislang unbekannte zu entdecken: Die könnten die Basis neuer Werkstoffe für noch ungeahnte Anwendungen bilden.

Die Physikerin sieht Parallelen zwischen dem veränderten Verhalten von Elektronen in der Gruppe und anderen bisher rätselhaften Phänomenen, etwa dem menschlichen Bewusstsein oder dem Leben an sich. „Ab einer gewissen Zahl von Zellen entsteht Leben. Aber wann?“, fragt sie sich.

Heute macht sich die 57-jährige Forscherin Sorgen, dass die Quantenphysik missbraucht werden kann, wie es mit der Nuklearphysik geschah. Auch hier inspiriert von Einstein, der sich gegen Atomwaffen einsetzte, engagiert sich Karen Hallberg für die Pugwash-Initiative, die Konferenzen zu Themen wie nukleare Abrüstung und die Verantwortung der Naturwissenschaft ausrichtet. Für sie ist klar: „Je mehr wir verstehen, desto mehr obliegt es uns, unser Wissen zum Wohl der Menschheit einzusetzen.“

Von Ute Eberle

Auf der Welle zum Ruhm

Als Erwin Schrödinger sich bereits fragt, ob er der Physik noch etwas Bleibendes beisteuern kann, gelingt ihm der große Wurf: die nach ihm benannte Gleichung



W einachten 1925. Der in Zürich lehrende Physiker Erwin Schrödinger hat sich in der Villa Frisia zwischen den verschneiten Bergen im Schweizer Luftkurort Arosa eingemietet. Statt seiner Frau Annemarie, mit der er wieder einmal

heftigen Zoff hatte, begleitet ihn eine verflossene Freundin. Eigentlich will er Ski fahren. Doch dazu kommt er kaum, wie er nach seiner Rückkehr berichtet. Der Grund ist nicht sein außereheliches erotisches Abenteuer. Schrödinger rechnet.

Er ist auf der Suche nach einer mathematischen Formel, die Teilchen als Materiewellen beschreibt und das Verhalten des Elektrons im Wasserstoff zu erklären vermag. In Arosa gelingt Schrödinger der wissenschaftliche Durchbruch: Er entwickelt die „Schrödinger-Gleichung“, die Schlüssel-formel der Quantenmechanik. Sie wird ihm erbitterte Diskussionen einbringen – ebenso wie den Nobelpreis für Physik.

Erwin Schrödinger kommt 1887 in Wien zur Welt. Er ist begabt, studiert Physik und Mathematik, übersteht den Ersten Weltkrieg als Artillerieoffizier. 1920 heiratet er die

23-jährige Annemarie Bertel: Die Schrödingers verstricken sich beide immer wieder in mal schnell wechselnde, mal längerfristige Affären außerhalb ihrer Ehe. Mit einer Geliebten des Physikers – und einer Tochter aus der Beziehung – wird das Ehepaar später sogar unter einem Dach wohnen.

Schrödinger findet zunächst keinen klaren Fokus für seine Forschung. Er arbeitet über Radioaktivität, Thermodynamik, statistische Physik und Farbtheorie. 1921 erhält er schließlich nach kurzen Stationen in Jena, Stuttgart und Breslau einen Ruf nach Zürich als Professor für Theoretische Physik. Zusehends beschäftigt er sich mit den neuen Entwicklungen in der Atom- und Quantenphysik. Angeregt hat ihn die Arbeit des französischen Physikers Louis de Broglie, der Materie, bis dato als Teilchen beschrieben, auch Eigenschaften einer Welle zuerkennt.

1925 ist Erwin Schrödinger bereits 38 Jahre alt, und er fragt sich, ob er es noch schaffen wird, etwas Großes für sein Fach beizusteuern. 30 Jahre gelten etwa als Grenze, jenseits derer die Kreativität bei Theoretiker*innen in der Physik schwindet. Der Urlaub in Arosa bringt für Schrödinger die Wende: Die Gleichung, mit der sich die Entwicklung eines Quantensystems präzise beschreiben lässt, katapultiert ihn auf den Olymp der Physik.

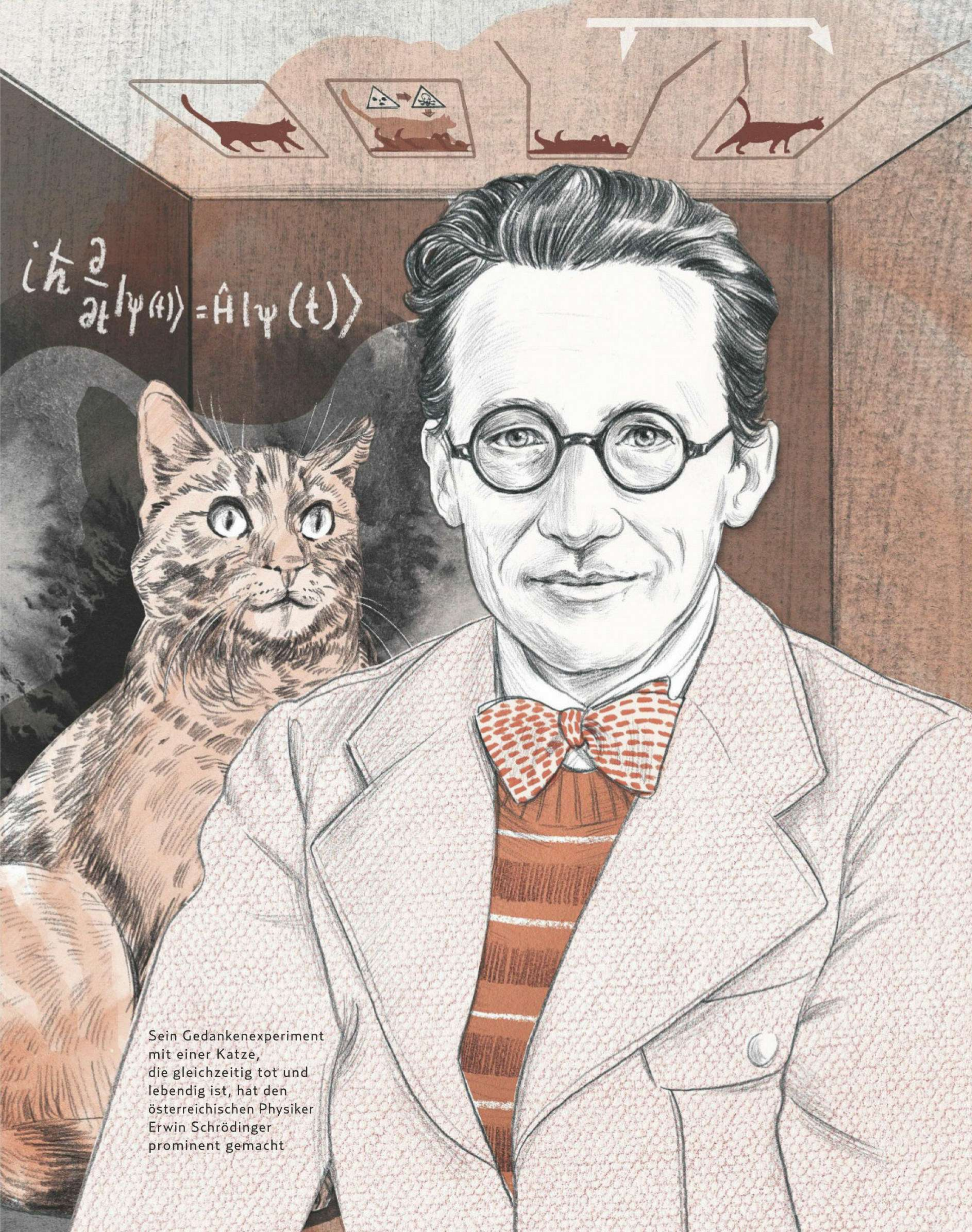
Schrödinger erhält enthusiastischen Zu- und heftigen Widerspruch von nobelpreisprämierten Kollegen: Albert Einstein etwa schreibt ihm, „der Gedanke Ihrer Arbeit zeugt von echter Genialität!“, der deutsche Physiker Werner Heisenberg findet den physikalischen Teil von Schrödingers Theorie schlichtweg „abscheulich“.

In der Folge entwickelt sich eine heftige Kontroverse um die Interpretation der jungen Quantenmechanik. Schrödinger lehnt die Vorstellungen von Heisenberg und Niels Bohr ab, dass Quantenzustände sich überlagern können und erst durch die Beobachtung eindeutig werden. Das sei blanker Unsinn, sagt er und ersinnt sein berühmtes Gedankenexperiment (siehe Seite 112): Schrödingers Katze, die Bohrs Ideen zufolge zugleich tot und lebendig sein könne.

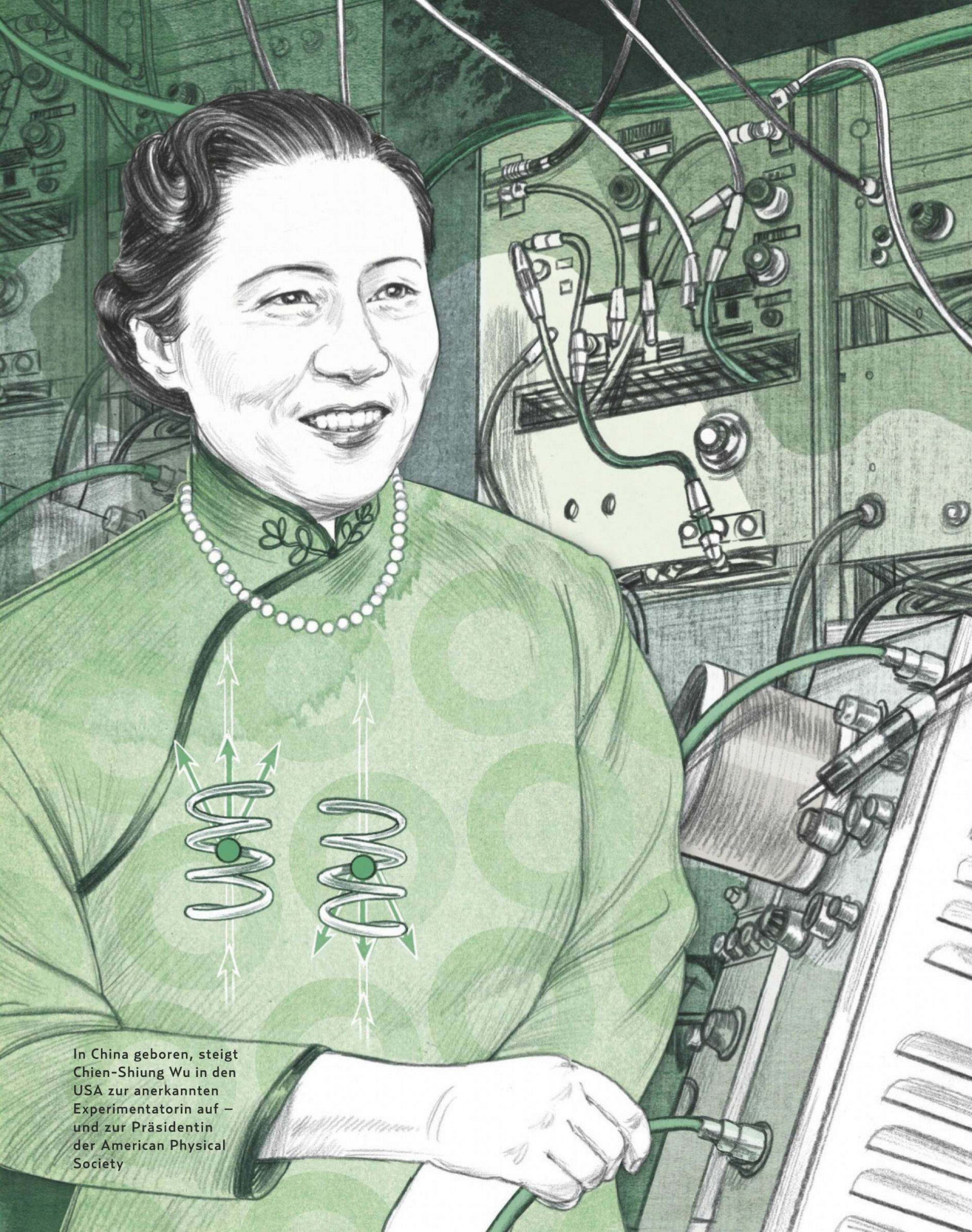
Die Debatte dauert an. Einmal, so erzählt man sich, ist Schrödinger so verärgert, dass er über die Quantenmechanik sagt: „Ich mag sie nicht, und es tut mir leid, dass ich jemals etwas mit ihr zu tun hatte.“

Erwin Schrödinger aber wird noch eine zweite Naturwissenschaft inspirieren: 1944 – er lebt mittlerweile in Dublin, nachdem er vor den Nazis erst aus Berlin, dann aus Graz geflohen ist – veröffentlicht er einen populärwissenschaftlichen Bestseller: In „What Is Life?“ schreibt der Quantenphysiker über den genetischen Code des Lebens. Er bringt damit eine Reihe genialer junger Köpfe auf eine Spur, die Jahre später zur Entschlüsselung der DNA und der Begründung der Molekulargenetik führt.

Von Viola Kiel



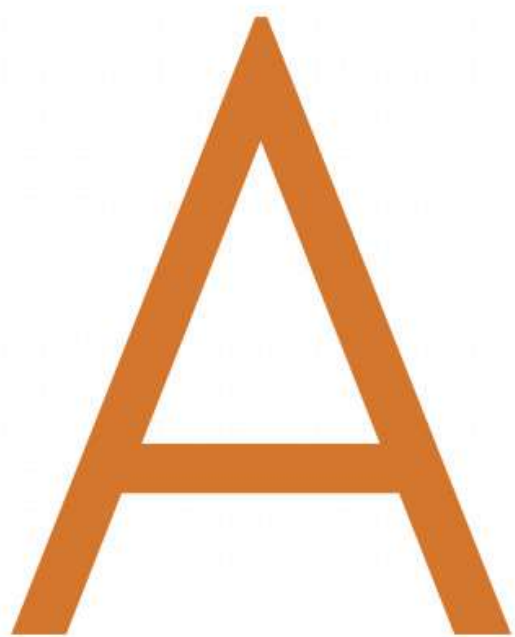
Sein Gedankenexperiment mit einer Katze, die gleichzeitig tot und lebendig ist, hat den österreichischen Physiker Erwin Schrödinger prominent gemacht



In China geboren, steigt Chien-Shiung Wu in den USA zur anerkannten Experimentatorin auf – und zur Präsidentin der American Physical Society

Ein Riss in der Symmetrie

Die Physikerin Chien-Shiung Wu hat bewiesen, dass die Natur zwischen rechts und links unterscheidet. Der Nobelpreis für diese Leistung blieb ihr versagt



Am Heiligabend 1956 sitzt Chien-Shiung Wu im Zug von Washington nach New York. Es schneit so stark, dass die Flüge gestrichen wurden. Wus Zug ist der letzte vor Weihnachten. Sie hat aufregende Neuigkeiten im Gepäck: Das Experiment hat funktioniert! Das will sie ihrem Kollegen an der Columbia University so schnell wie möglich mitteilen.

Bis dahin galt es als wissenschaftlicher Konsens, dass physikalische Prozesse immer symmetrisch ablaufen. Dass also beispielsweise ein perfekt runder, wassergefüllter Ball, der unter idealisierten Umständen platzt, in alle Richtungen gleichberechtigt Tropfen sprüht – und nicht oben oder unten, rechts oder links bevorzugt sind. Diese „Paritäts-erhaltung“ galt als Naturgesetz.

Madame Wu, wie Kollegen sie nennen, hat nun mit ihrem Experiment gezeigt, dass subatomare Vorgänge manchmal asymmetrisch vonstattengehen. Sie hat damit eine völlig neue Sicht auf die Welt der kleinsten Teilchen eröffnet.

Chien-Shiung Wu schien zunächst nicht prädestiniert dafür, der Physik zu einem Durchbruch zu verhelfen. Als sie 1912 in einem kleinen ostchinesischen Ort zur Welt kommt, werden im Land noch vielen Mädchen die Füße gebunden. In die Schule lässt man wenige.

Doch Wus Vater, ein Ingenieur, ist progressiv. Und tatkräftig. Als Banditen das Dorf terrorisieren, verjagt er die Bande, indem er ihren Anführer tötet. Dann gründet er im Ort eine Schule für Mädchen, in die er auch seine Tochter schickt.

Später geht Wu ins Internat, entdeckt ihre Liebe zu Mathematik und Physik, schafft es auf die Universität. „Ignoriere Hindernisse. Mach ruhig weiter, und schreite immer vorwärts“, rät der Vater.

Als Wu 1936 ein Schiff nach Amerika besteigt, ahnt sie nicht, dass sie ihre Familie nie wiedersehen wird. Sie promoviert in Berkeley an der amerikanischen Westküste unter dem Nuklearphysiker Ernest Lawrence.

Wu arbeitet viel, bleibt oft die halbe Nacht im Labor. Nach ein paar Zwischenstationen gelangt sie an die Columbia University in New York, wo sie den Rest ihres Lebens verbringt und auch im Manhattan-Projekt am Bau der Atombombe mitwirkt. Sie heiratet und bringt einen Sohn zur Welt.

Bald gilt sie als brillante Experimentalphysikerin. Deswegen wenden sich 1956 zwei Landsmänner an sie: der Physiker Tsung-Dao Lee von der Columbia University und Chen Ning Yan vom Institute for Advanced Study in Princeton. Die beiden vermuten, dass die Parität beim radioaktiven Beta-Zerfall – dabei werden Elektronen beziehungsweise ihre Antiteilchen frei – verletzt wird. Wu gelingt es, die Idee zu testen: Sie kühlt ein radioaktives Isotop, Kobalt-60, auf eine Temperatur knapp über dem absoluten Nullpunkt ab. Mit einem Magnetfeld richtet sie die Kobaltatome aus, die sich wie kleine Kompassnadeln verhalten. In Detektoren registriert sie, welche Richtungen die Elektronen beim Zerfall nehmen.

Monatelang pendelt Wu zum Nationalen Institut für Standards und Technologie in Washington, einem der wenigen Institute, die damals in der Lage sind, derart tiefe Temperaturen herzustellen. Sie verschiebt sogar eine Reise nach Asien, die sie geplant hatte, um ihre Familie erstmals wiederzusehen. Beide ihrer Eltern und einer ihrer Brüder werden tot sein, als sie es Jahre später nach China schafft.

Das Experiment zeigt eindeutig: Die Elektronen fliegen in einer bevorzugten Richtung davon. Das Prinzip der Paritätserhaltung ist gebrochen. Für diese sensationelle Entdeckung erhalten Lee und Yan 1957 den Nobelpreis. Wu, die die These der Männer bewies, geht leer aus.

Sie arbeitet ungebremst weiter, macht wichtige Entdeckungen in der Nuklearphysik und Biophysik, gewinnt fast jede andere Auszeichnung in ihrem Fach. 1975 wird sie als erste Frau Präsidentin der American Physical Society.

Nach ihrem Tod mit 84 Jahren kehrt die Forscherin, die bis zuletzt oft traditionell chinesische Kleidung unter ihrem Laborkittel trug, zu ihren Wurzeln zurück. Auf Chien-Shiung Wus Wunsch wird ihre Asche im Hof der Schule begraben, die ihr Vater gründete.

Von Ute Eberle

Der seltsamste Mensch

In den Augen seiner Zeitgenossen ist der Brite Paul Dirac ein Sonderling. Doch dank seiner außergewöhnlichen mathematischen Begabung entdeckt er eine Antiwelt

Im Herbst 1926 reist ein junger Physiker aus Cambridge für einige Monate nach Kopenhagen, ans Institut von Niels Bohr, damals eine zentrale Figur der noch neuen Quantentheorie. Schon kurz nach dessen Ankunft beschwert sich Bohr bei Ernest Rutherford, der den Besucher aus seinem Labor in Cambridge kannte: „Dieser Dirac scheint eine Menge über Physik zu wissen, aber er sagt überhaupt nichts.“ Jahre später wird Bohr einem Kollegen anvertrauen, von allen Besuchern an seinem Institut sei Paul Dirac „der seltsamste Mensch“ gewesen.

Diracs Schweigsamkeit war legendär. Bei gesellschaftlichen Anlässen saß er oft wortlos neben seinen Tischnachbarn, Fragen beantwortete er meist nur mit Ja oder Nein. Ein „Dirac“, scherzten seine Kollegen, entspreche einem Wort pro Stunde. Der junge Mann war nicht nur schüchtern und exzentrisch, er hatte auch kein richtiges Gespür für die Gefühle seiner Mitmenschen, vermutlich zeigte er Anzeichen von Autismus.

Doch er verfügte über eine außergewöhnliche mathematische Intuition und Präzision, die ihn zu einem der größten Theoretiker des 21. Jahrhunderts werden ließen.

Paul Dirac selber, 1902 in Bristol geboren, führte seine Wortkargheit auf seine Kindheit zurück, auf die Tyrannei seines Vaters, der aus der französischsprachigen Schweiz nach England eingewandert war. Der zwang ihn, beim Essen nur Französisch zu sprechen, und bestrafte ihn für jeden Fehler. Also schwieg Paul lieber.

Dirac absolvierte zunächst ein Ingenieursstudium in Bristol. Als er danach, mitten in der wirtschaftlichen Depression, keine Stelle fand, wandte er sich der Mathematik zu. 1923 schaffte er es, dank eines Stipendiums dem elterlichen Gefängnis zu entfliehen und zur Promotion nach Cambridge zu wechseln. In dem Universitätsstädtchen fühlte er sich aufgehoben, dort fand er sein Lebensthema, die Quantenmechanik.

1926 formulierte der Physiker eine eigene, höchst abstrakte Version der Quantenmechanik, die Erwin Schrödingers Wellenmechanik und Werner Heisenbergs eigenwilligen Ansatz mit Matrizen als Spezialfälle einschloss. 1928, im Alter von 25 Jahren, veröffentlichte er seinen größten Wurf: „The Quantum Theory of the Electron“. Dabei gelang es ihm, Anforderungen von Albert Einsteins Spezieller Relativitätstheorie in der Quantentheorie des Elektrons zu berücksichtigen und so das Verhalten des Elementarteilchens umfassender als vorher zu beschreiben.

Quasi nebenbei sagten Diracs Gleichungen neben den zu erwartenden positiven auch negative Energiezustände für ein Elektron voraus – einen Effekt, den der Physiker und seine Kollegen zunächst nicht zu erklären wussten. Viele legten ihn zunächst ad acta. Doch ab 1931 war Dirac sicher: Hinter diesen merkwürdigen negativen Energiezuständen steckt ein Antiteilchen zum Elektron, genauso schwer wie dieses, nur mit entgegengesetzter Ladung.

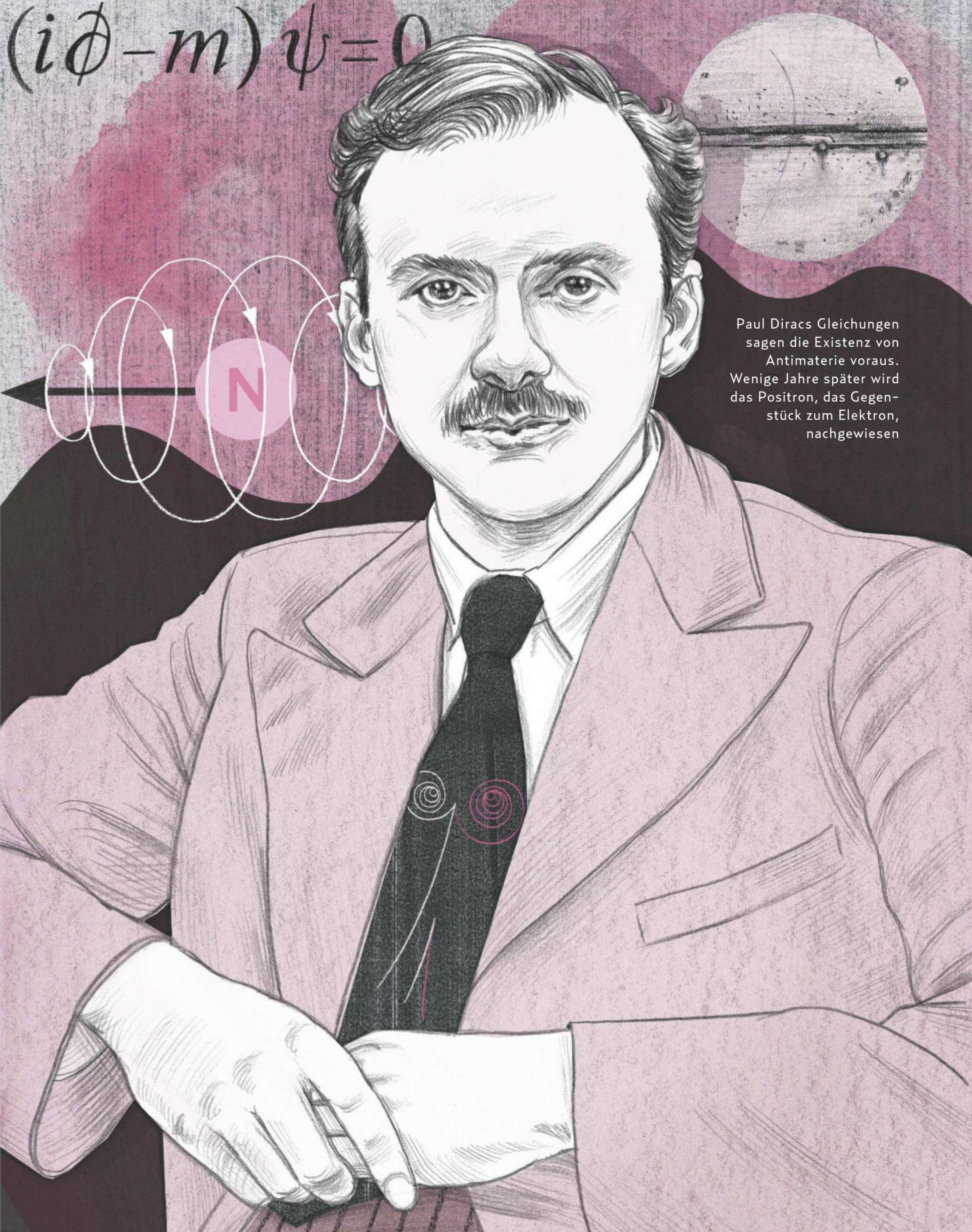
Bereits 1932 konnte der US-amerikanische Physiker Carl Anderson das Positron genannte Partikel in einer Nebelkammer nachweisen. Ein Riesenerfolg für ihn – und für Dirac. Damit war das Tor aufgestoßen zu einer komplett neuen Welt aus Antimaterie. 1933 erhielt Dirac den Nobelpreis für Physik für seine Leistung.

Ob seiner Schüchtern- und Zurückgezogenheit konnten sich viele in seiner Kollegenschaft nicht vorstellen, dass Dirac je Interesse an Frauen entwickeln würde. Doch bei einem Gastaufenthalt in Princeton/USA lernte er Manci Balasz, die Schwester des ungarischen Physikers Eugene Wigner, kennen. Sie fand Gefallen an ihm und ließ nicht locker, besuchte ihn in England, schrieb ihm. Schließlich verliebte er sich in sie. 1937 heirateten die beiden.

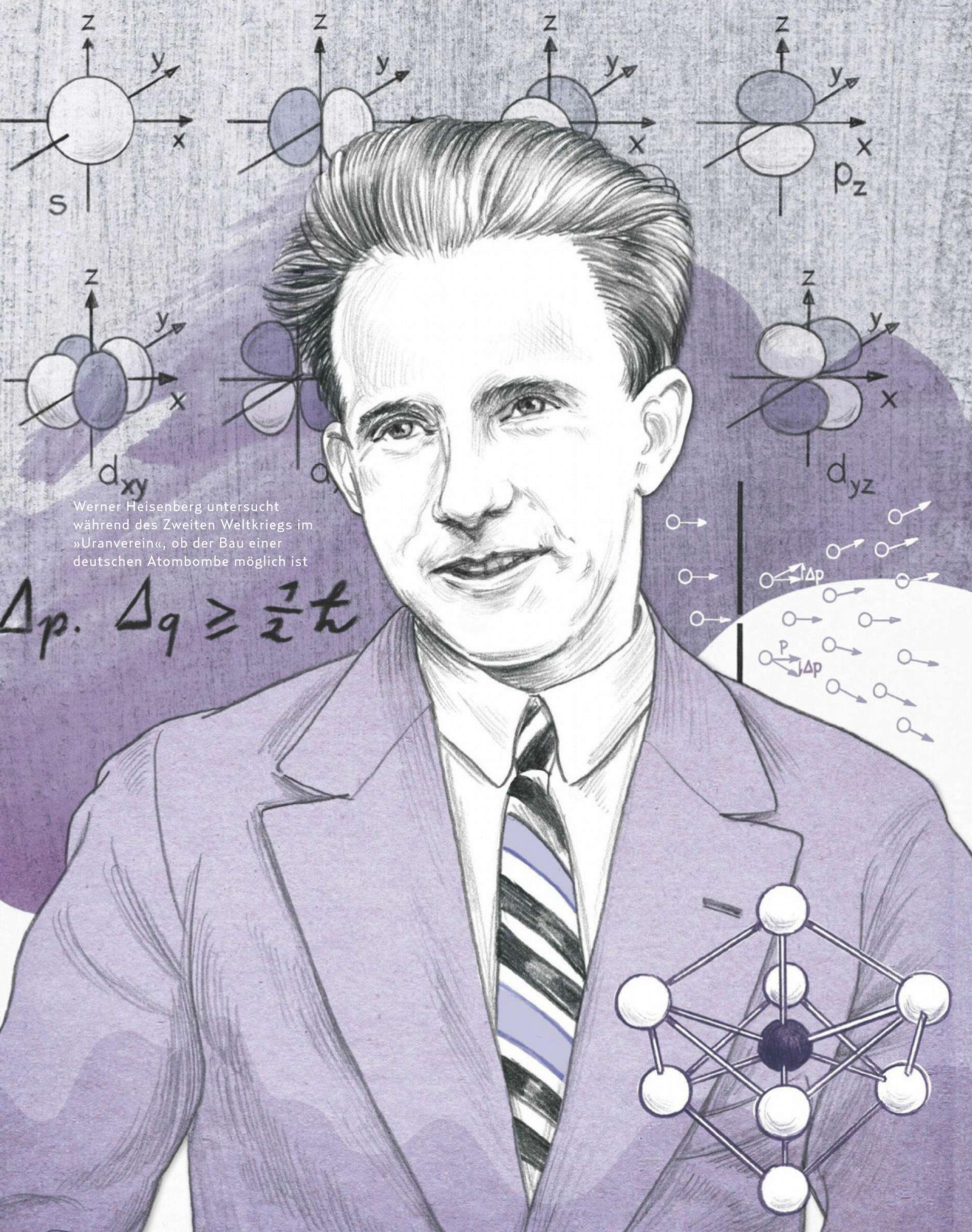
Sie war so ganz anders als ihr steifer, kühler, emotionsarmer Mann. Sie liebte Gesellschaft, war extrovertiert, temperamentvoll. In ihr hatte Dirac sein eigenes Antiteilchen getroffen, mit dem er zusammenlebte bis zu seinem Tod 1984.

Von Klaus Bachmann

$$(i\partial - m)\psi = 0$$



Paul Diracs Gleichungen
sagen die Existenz von
Antimaterie voraus.
Wenige Jahre später wird
das Positron, das Gegen-
stück zum Elektron,
nachgewiesen

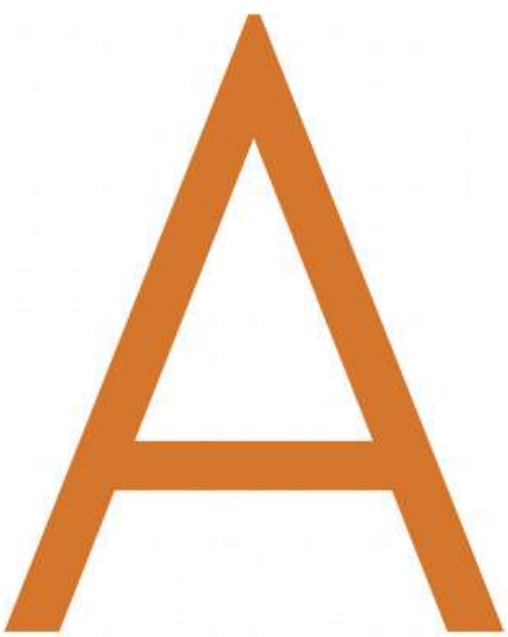


Werner Heisenberg untersucht
während des Zweiten Weltkriegs im
»Uranverein«, ob der Bau einer
deutschen Atombombe möglich ist

$$\Delta p. \Delta q \geq \frac{1}{2} \hbar$$

Jung und wild

Im Alter von 23 Jahren schafft Werner Heisenberg den Durchbruch in der Quantentheorie. Deren naturphilosophische Deutung prägt er über Jahrzehnte maßgeblich mit



Als die Sonne an diesem Frühsommertag über der Nordsee aufgeht, erwartet Werner Heisenberg sie auf einem Felsturm im Süden der Insel Helgoland. Erregt hat er bis fast drei Uhr früh gerechnet, Spalte um Spalte Zahlen geprüft, dass auch ja alles stimme. An Schlaf war dann nicht mehr zu denken, also kletterte er auf den Felsen, der ihn schon seit Tagen gereizt hatte.

Jahrelang rätselte die Physik über die Bahnen, auf denen Elektronen um den Atomkern kreisen. In einer Kammer auf Helgoland, wohin er wegen seines Heuschnupfens geflüchtet ist, gelingt dem 23-jährigen Heisenberg im Juni 1925 der Durchbruch – er erkennt die ersten Umrisse der neuen Quantenmechanik. Letztendlich schafft er es, die Spektrallinien der Atome mit einem neuen Ansatz zu erklären. Und revidiert damit die Vorstellung, Elektronen kreisten auf streng definierten Bahnen um den Atomkern, wie Planeten um ihre Sonne.

Die mathematische Formulierung der Theorie mittels Matrizen, die Heisenberg nach seiner Rückkehr von Helgoland zusammen mit Max Born und Pascual Jordan entwickelt, markiert die Geburtsstunde der Quantenmechanik.

Heisenberg wächst privilegiert auf. Sein Vater ist Geschichtsprofessor. Er studiert Physik und Mathematik, untersucht die Eigenschaften der Atome. Nach dem Studium arbeitet er in Göttingen und Kopenhagen. Immer

wieder zieht es Heisenberg in die dänische Hauptstadt, wo er in Niels Bohr einen lebenslangen Mentor und Freund und an dessen Institut ein zweites Zuhause findet. Auf langen Wanderungen, in Bohrs Wohnzimmer und auf seinem Segelschiff diskutiert ein enger Kreis aus Physikern intensiv die neue Theorie und prägt die Kopenhagener Deutung der Quantenmechanik. Bei einem Aufenthalt in Dänemark formuliert Heisenberg 1927 auch die Unschärferelation (siehe Seite 48), die seinen Namen trägt.

Für den jungen Wissenschaftler sind es glückliche Jahre. Das soziale Leben in Kopenhagen erfüllt ihn, die Arbeit ist aufregend. 1927 wird er mit gerade einmal 25 Jahren zum Professor in Leipzig berufen, für das Jahr 1932 erhält er den Nobelpreis. Dann setzt der Aufstieg der Nationalsozialisten der Hochphase ein jähes Ende.

Obwohl er für seine Quantenphysik angefeindet, als „weißer Jude“ diffamiert und von der Gestapo verhört wird, lehnt er Angebote ab, das Land zu verlassen. Als der Krieg beginnt, wird Heisenberg zum Heereswaffenamt nach Berlin beordert. Von 1939 bis 1945 ist er als führender theoretischer Physiker Teil des „Uranvereins“.


Der Verein ist daran beteiligt, die mögliche Entwicklung von Kernwaffen zu untersuchen. Eine Bombe – oder ihr ernsthafter Versuch – wird aber nie Wirklichkeit. Warum, ist bis heute umstritten: Sind die Physiker an den Berechnungen gescheitert? Fehlten die Mittel? Oder haben sie die Entwicklung einer Atombombe absichtlich verzögert? Später betont Heisenberg, sein Ziel sei keine Bombe, sondern ein Reaktor gewesen.

1941 reist er zu Bohr ins deutsch besetzte Kopenhagen: Er habe versucht, sagt er später, ihm mitzuteilen, dass der Bau einer Atombombe derzeit nicht beabsichtigt sei und Physiker auf den weiteren Verlauf Einfluss nehmen könnten. Bohr, jüdischer Abstammung, hat jedoch den Eindruck, Heisenberg glaube an einen deutschen Sieg und an die Bombe. Er bricht das Gespräch verstört ab.

Heisenberg fühlt sich isoliert, stürzt sich in die Physik und die Musik. Im Februar 1945 – über den Großstädten fallen Bomben – gibt er im baden-württembergischen Hechingen, dem Rückzugsort des Uranvereins, ein Klavierkonzert. Zwei Monate später flieht er mit dem Fahrrad zu seiner Familie nach Urfeld am Walchensee. Am 3. Mai holen ihn US-Soldaten ab.

Sieben Monate lang ist Heisenberg mit anderen deutschen Kernphysikern im britischen Farm Hall interniert, dann kehrt er nach Deutschland zurück. Nach dem Krieg leitet er bis 1970 das Max-Planck-Institut für Physik. Während er die zivile Nutzung der Kernenergie befürwortet, wendet sich Heisenberg 1957 gemeinsam mit 17 weiteren Atomphysikern in der „Erklärung der Göttinger 18“ öffentlich gegen die Aufrüstung Westdeutschlands mit Atomwaffen. Eine damals unerhörte Einmischung der Wissenschaft in die Politik, die gleichwohl den Keim legt für die deutsche Friedensbewegung.

Von Lara Hartung



Blick unter die Haube:
Das Gros der Bauteile
eines Quantencomputers
dient der Kühlung
auf Temperaturen knapp
über dem absoluten
Nullpunkt

PLAN



Schneller *rechnen*

Die außergewöhnlichen Fähigkeiten des Allerkleinsten könnten helfen, die großen Probleme der Menschheit zu lösen. Wir müssen nur lernen, sie in einem neuartigen Rechner zu zähmen: in einem **Quantencomputer**

Text: Christian J. Meier

für den ETERN



Die Welt steht vor gewaltigen Herausforderungen: Wir müssen den Klimawandel stoppen, die Umwelt retten, komplexe Krankheiten bekämpfen. Damit dies gelingt, müssen wir fast alle Bereiche unseres Lebens neu denken.

Zuweilen trennt uns eine Rechnung von einer besseren Zukunft. Dabei helfen uns bislang Supercomputer – aber manche Aufgaben sind selbst für sie zu komplex. Forschungsteams weltweit arbeiten daher an einer neuen Art Computer. Da die klassische Art des Rechnens an ihre Grenzen stößt, suchen sie Zuflucht in den Gesetzen der Mikrowelt. Ein Quantencomputer könnte auf teils sehr viel schnellere Weise Lösungen finden – und damit der Schlüssel sein zu revolutionären Materialien, Verfahren und Arzneien.

Doch das Vorhaben ist eine gewaltige Herausforderung. „Einen Quantenrechner zu bauen ist schwieriger als die Mondlandung“, sagt Andreas Wallraff von der ETH Zürich.

Immerhin: Gerüstet mit Milliarden Euro an Fördergeldern, haben einzelne Teams erste spektakuläre Erfolge erzielt. Im Herbst 2019 verkündete Google: Sein Quantenchip namens „Sycamore“ habe erstmals eine Aufgabe schneller berechnet, als es der leistungsstärkste Supercomputer der Welt gekonnt hätte.

Steht also jetzt der Quantenrechner vor der Tür? Oder müssen wir noch Jahrzehnte warten, bis er uns darin unterstützt, Menschheitsaufgaben zu meistern?

Die Aufgaben, die es zu lösen gilt, können schnell höchst komplex werden. Das zeigen schon alltägliche Probleme wie etwa die Planung einer optimalen Route. Für eine Geschäftsreise durch die vierzehn größten Städte Deutschlands gibt es über 43 Milliarden mögliche Wege. Eine fünfzehnte Stadt würde diese Zahl um den Faktor fünfzehn erhöhen; eine weitere Station sie noch einmal versechzehnfachen. Die Anzahl der Alternativrouten explodiert also schon, wenn die



Unzählige Rechenschritte
auf einen Schlag –
 klingt unmöglich. Doch
 der **Quantenrechner**
könnte das

Größe der Aufgabe nur moderat anwächst. Selbst die schnellsten Supercomputer sind da bald überfordert.

Schade, denn der kürzeste Weg würde viel Geld und Treibstoff sparen. Ein Fahrer des Lieferdienstes UPS klappert pro Tag im Schnitt 120 Stationen ab. Für die Route gibt es mehr Alternativen als Atome im sichtbaren Universum. Der Lieferdienst würde 30 Millionen US-Dollar jährlich einsparen, wenn jede der 55 000 zustellenden Personen in den USA pro Tag nur eine Meile weniger führe, wie das Magazin „Wired“ berichtet.

Um das Optimum zu finden, bräuhete es einen Computer, der unzählige Rechenschritte auf einen Schlag bearbeitet,



Kopfüber hängt der Quantenrechner von IBM von der Decke: Seine Denkeinheiten, die Qubits, sitzen unten. Vakuumbehälter schützen die Exemplare im Hintergrund

so als dampfe er viele Stunden des Kalkulierens auf einen Moment ein. Unmöglich? Der Quantencomputer kann es.

Google hat bewiesen, dass Quantencomputer die erhoffte Fähigkeit zum Parallelrechnen tatsächlich besitzen. Der Chip namens Sycamore markiert somit einen Meilenstein – aber keinen Durchbruch. Denn er löste eine akademische Spezialaufgabe. Das Forschungsteam wählte sie so, dass sie einem Quantenrechner besonders leicht-, einem klassischen Rechner allerdings besonders schwerfällt. Bei anderen Aufgaben hätte Sycamore keinen Tempovorteil.

Dennoch beflügelt der Erfolg die Forschung. Tech-Riesen, Universitäten, Start-

ups – sie alle wetteifern um den nächsten Meilenstein auf dem Weg zum Quantencomputer.

Dessen Fähigkeit zum Parallelrechnen setzt sehr tief in seiner Architektur an. Wie klassische Rechner arbeitet er mit dem Binärsystem, speichert also Information in Form von 0 und 1. Im normalen Computer verwirklicht eine Art elektrischer Schalter diese beiden Zahlen: „Strom aus“ bedeutet 0 und „Strom an“ heißt 1. Der Schalter repräsentiert eine Informationseinheit, ein Bit (vom englischen Begriff „binary digit“).

Der Quantenrechner hingegen nutzt als Informationsträger submikroskopische Teilchen, etwa Atome. Ein solches

kann nur bestimmte Energiestufen annehmen, ähnlich einem Schalter, der sich nicht stufenlos einstellen lässt. Definiert man zwei seiner „Schaltzustände“ als 0 und 1, erhält man ein Bit.

Die Quantenphysik bricht nun mit unserer vom Alltag geprägten Vorstellung von Wirklichkeit, nach der ein Objekt immer nur einen der beiden Zustände 0 und 1 einnehmen kann. Im Mikrokosmos hingegen beinhaltet die Wirklichkeit nicht nur, „was der Fall ist“, sondern auch alles, „was der Fall sein kann“, wie es der Wiener Physiker Anton Zeilinger ausdrückt. Ein Quantenobjekt kann somit beide Zustände 0 und 1 simultan annehmen – als würde eine Lampe hell leuch-

ten und zugleich dunkel bleiben. Diese **Überlagerung** von zwei möglichen Informationen nennt die Physik „Quantenbit“ oder kurz „Qubit“.

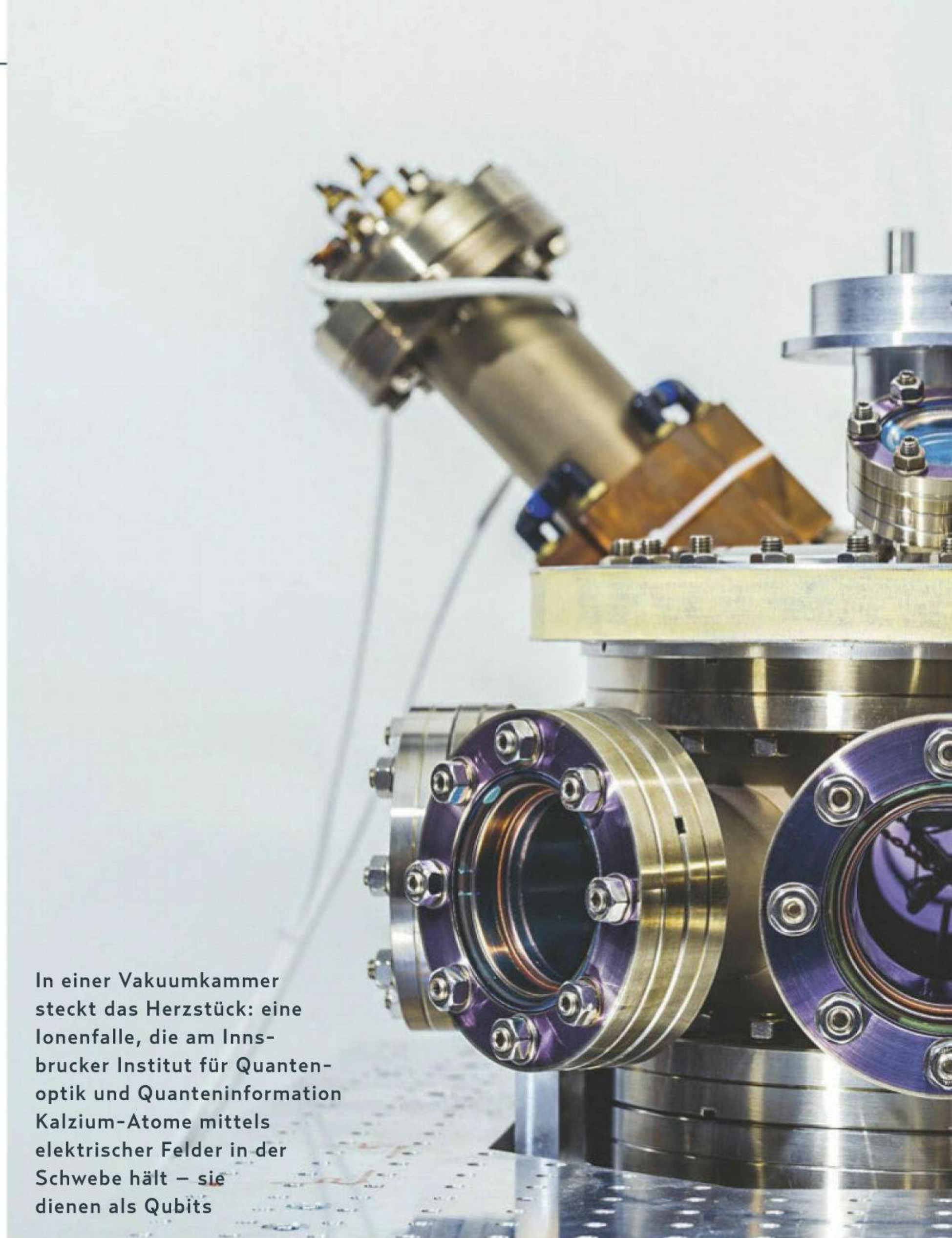
Die menschliche Intuition sträubt sich gegen das Qubit. Und doch erschafft die wundersame Überlagerung nachweisbar fast grenzenlosen Raum für paralleles Rechnen. Mit zwei klassischen Bits lässt sich jeweils nur eine der vier Binärzahlen 00, 01, 10, 11 darstellen – zwei Qubits können alle vier Werte gleichzeitig repräsentieren. Die Kapazität lässt sich durch Zufügen nur einer weiteren Informationseinheit verdoppeln: Drei Qubits stehen für acht Zahlen, vier Qubits für 16 und so weiter. Schon 80 Qubits können unvorstellbare Quadrillionen Werte darstellen.

Die simultane Existenz vieler Werte ermöglicht parallele Datenverarbeitung. Da das Qubit zugleich 0 und 1 ist, lassen sich zwei Rechenschritte – einer für den Fall 0 und der andere für den Fall 1 – in einem Rechenschritt zusammenfassen. Ein klassischer Computer muss beide Aktionen nacheinander ausführen. Allerdings braucht der Quantencomputer noch eine zweite Zutat aus der mysteriösen Quantenwelt: die **Verschränkung**. Verschränkte Teilchen behalten eine intime Verbindung, selbst wenn sie sich Lichtjahre voneinander entfernen.

Führt man innerhalb einer Rechnung eine logische Operation an einem Qubit aus – schaltet man etwa seinen Wert um –, wirkt sich das automatisch und augenblicklich auf alle anderen mit ihm verschränkten Qubits aus: Rechnen ohne Zeitverzögerung. Je mehr Qubits verschränkt werden, desto mehr logische Operationen kann der Rechner parallel verarbeiten. Theoretisch sind der Rechenkraft somit kaum Grenzen gesetzt.

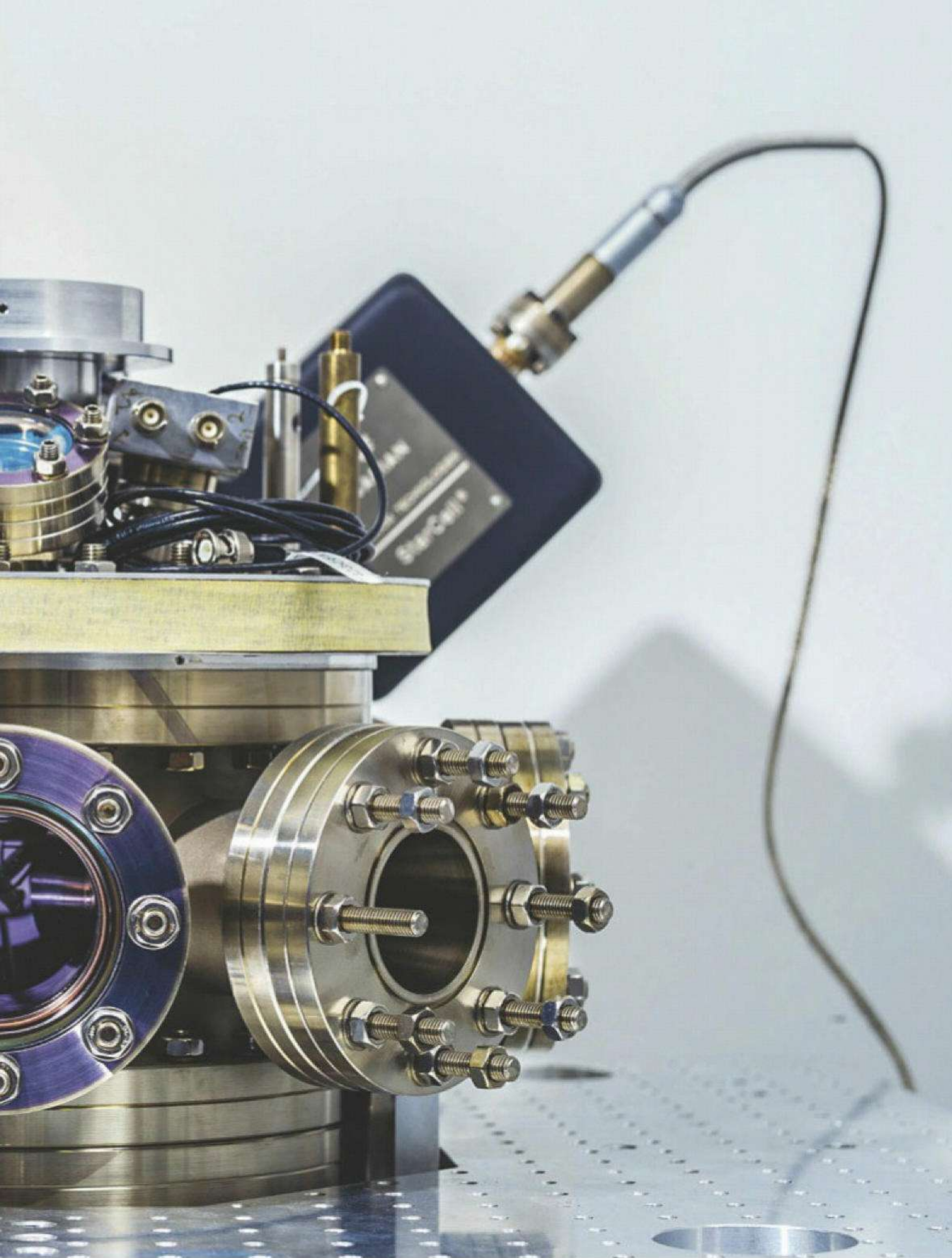
Die Krux ist der konkrete Bau eines Quantenrechners. Denn der erfordert es, einzelne Atome, Elektronen oder Photonen präzise zu kontrollieren. Der Mensch

Im Juni 2021 präsentierte die Fraunhofer-Gesellschaft ihren Quantencomputer in Ehningen nahe Stuttgart. Universitäten wie auch Unternehmen sollen ihn nutzen



In einer Vakuumkammer steckt das Herzstück: eine Ionenfalle, die am Innsbrucker Institut für Quantenoptik und Quanteninformation Kalzium-Atome mittels elektrischer Felder in der Schwebe hält – sie dienen als Qubits





muss also den Mikrokosmos steuern, in dem die Gesetze der klassischen Physik nicht gelten und vieles für Forschende noch rätselhaft ist. Wie in der Raumfahrt arbeiten sie außerhalb der bisherigen Erfahrungswelt. Sie müssen die neuen Kenntnisse mühsam erwerben.

S

Schon am Grundbaustein, dem Qubit, tüfteln Hunderte Physikerinnen und Physiker seit mehreren Jahrzehnten. Die Schwierigkeit beginnt damit, dass sich Qubits auf verschiedenste Art realisieren lassen. Ein Team um Rainer Blatt an der Universität Innsbruck etwa nutzt Kalzium-Ionen: Kalzium-Atome, denen ein Elektron fehlt. Ein elektrisches Wechselfeld hält die Teilchen in einem Vakuum in der Schwebe – aufgereiht wie die Perlen einer Kette. Mithilfe von Laserstrahlen kann das Team die Ionen zwischen ihren Energiestufen schalten und sie verschränken. Bislang gelingt das mit 24 Qubits.

Am Forschungszentrum Jülich wiederum bauen Forschende aus ganz Europa einen Quantencomputer, der zum eine Milliarde Euro schweren „Quanten-Flaggschiff-Projekt“ der EU gehört. Sie setzen auf supraleitende Leiterschleifen: In ihnen kann Strom simultan links- und rechtsherum fließen. Da dies eine Überlagerung zweier Zustände ist, lässt sich daraus ein Qubit konstruieren.

Auch Googles Sycamore besitzt supraleitende Qubits, 53 davon. So weit ist Europa noch nicht – es möchte aber aufholen. „Wir wollen in fünf Jahren mit unserem Quantenrechner einen praxisrelevanten Vorteil erzielen“, sagt Frank Wilhelm-Mauch, der den Bau des Jülicher Rechners koordiniert. Das heißt: Mit wenigen Hundert Qubits wollen die Forschenden eine nützliche Aufgabe schneller lösen als per Superrechner möglich, etwa eine komplexe chemische Reaktion simulieren.

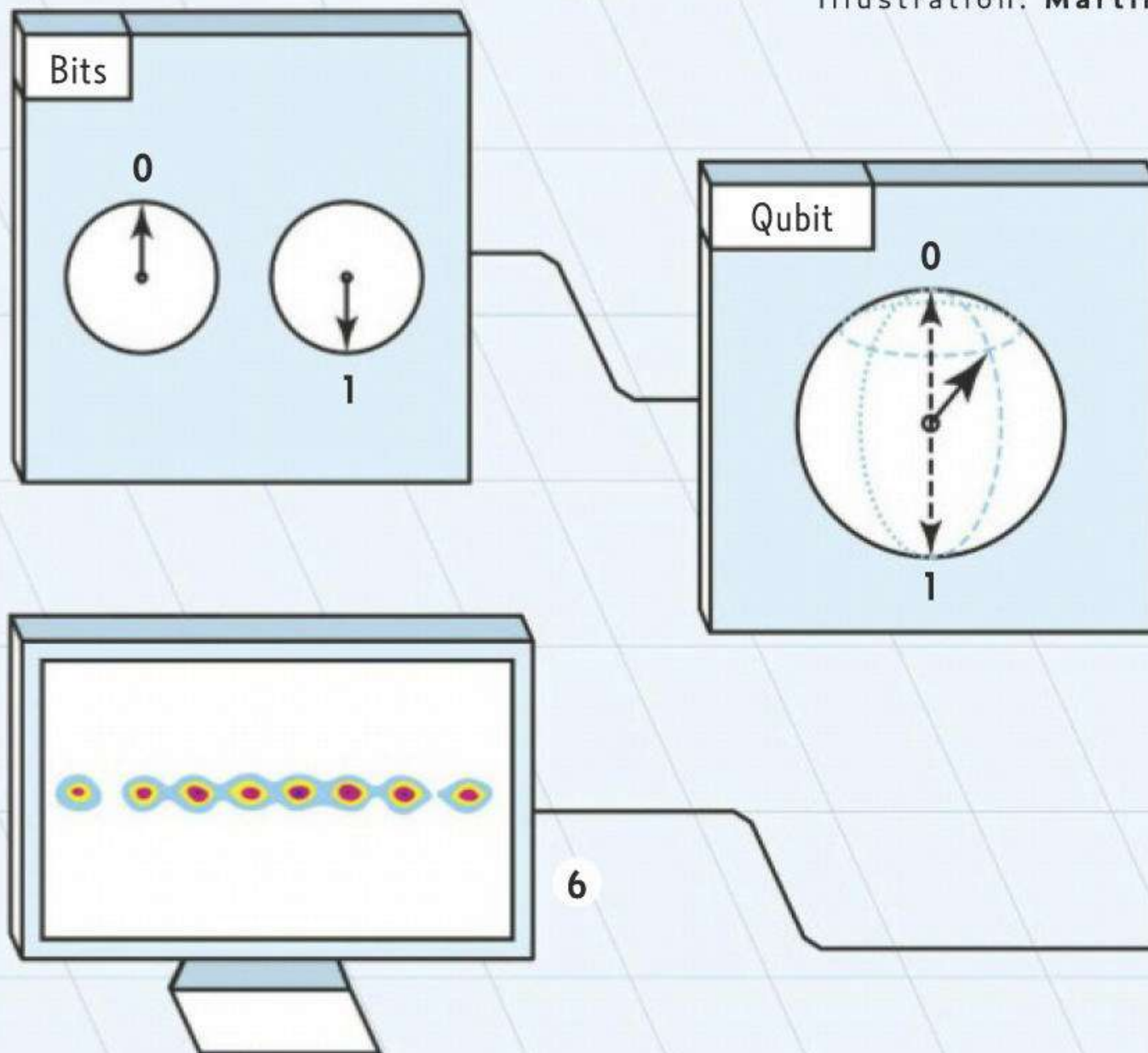
In anderen Labors dienen Lichtteilchen als Qubits; oder Elektronen, die in mikroskopisch strukturierten Halbleiter-

Die Manipulation eines
Qubits wirkt sich
 augenblicklich auch auf
 andere aus – **Rechnen**
ohne Zeitverzug

Wie sich mit Quanten rechnen lässt

Präzise beschreiben lässt sich die Funktion eines Quantencomputers nur mit Mathematik. Aber einige Grundprinzipien der neuartigen Rechenmaschine sind durchaus nachvollziehbar – und höchst bemerkenswert

Illustration: Martin Künsting

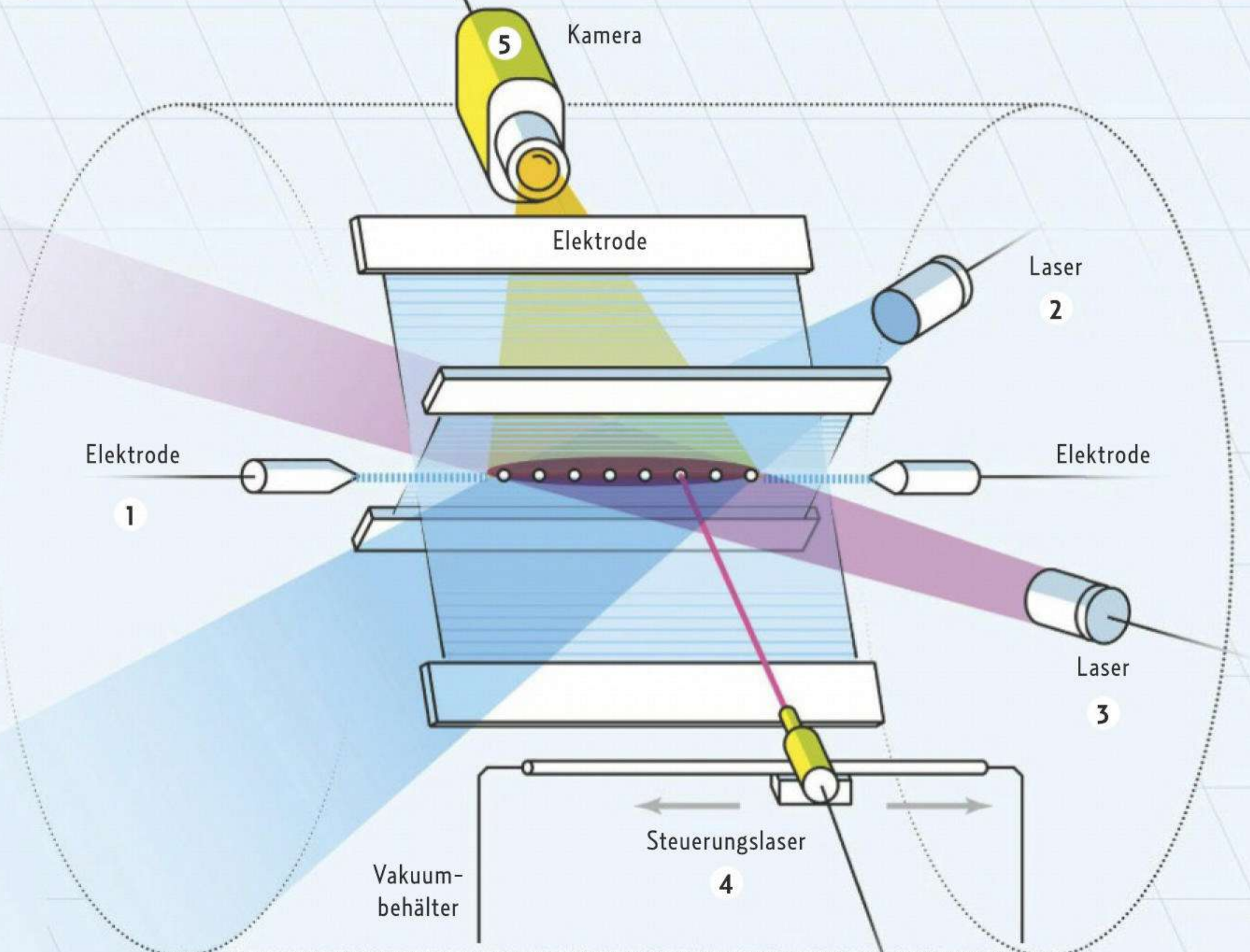


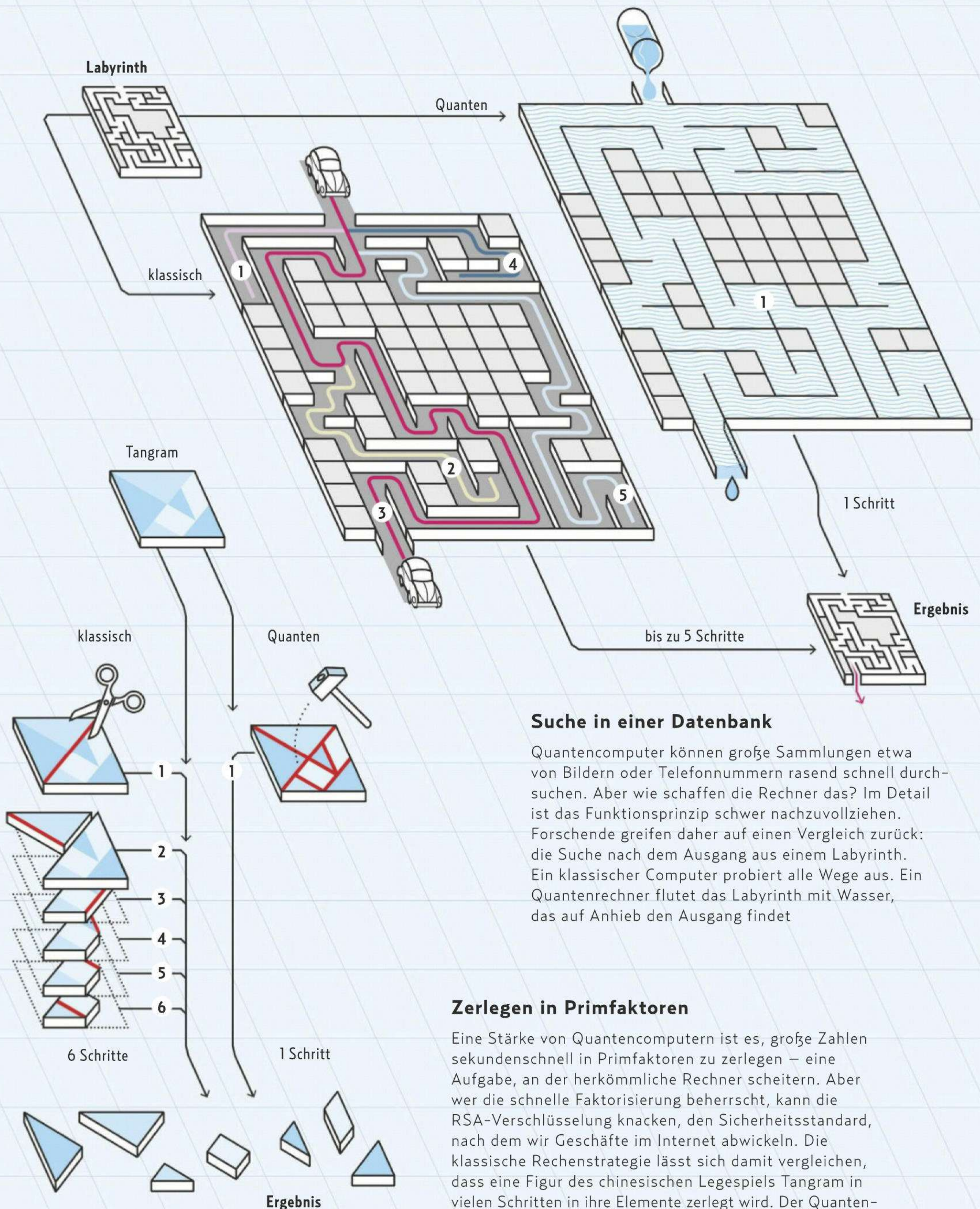
Bits und Qubits

Klassische Computer und Quantencomputer arbeiten mit dem Binärsystem, also Nullen und Einsen. Im klassischen Computer bedeutet zum Beispiel »Strom an« eine 1, »Strom aus« eine 0. Beim Quantenbit (Qubit) können sich die beiden Zustände überlagern. Die Physik stellt das als Pfeil in der sogenannten Bloch-Kugel dar: Das Qubit ist eine Mischung aus 0 und 1, mit unterschiedlichen Anteilen. Erst wenn Forschende fragen: »Welchen Wert hast du?«, antwortet es eindeutig mit 0 oder 1

Ein Gefängnis für Ionen

So könnte das Herz eines Quantencomputers aussehen: Als Qubits eignen sich Teilchen oder Schaltkreise, die gleichzeitig zwei verschiedene Zustände annehmen können, die dann als 0 und 1 definiert werden. Eine Qubit-Variante sind Kalzium-Ionen, Atome, denen Elektronen entrissen wurden. Sie lassen sich in einer »Falle« festhalten: Elektroden (1) bauen ein elektrisches Feld auf, das die Partikel in der Schwebe hält. Blaues Laserlicht (2) kühlt die Ionen und dient dazu, ihren Zustand auszulesen. Mit dem roten Laser (3) können die Forschenden alle Ionen, mit dem feinen Steuerungslaser (4) individuelle Ionen ansprechen. Per Kamera (5) nehmen sie ein Bild der Teilchen auf (6)





Suche in einer Datenbank

Quantencomputer können große Sammlungen etwa von Bildern oder Telefonnummern rasend schnell durchsuchen. Aber wie schaffen die Rechner das? Im Detail ist das Funktionsprinzip schwer nachzuvollziehen. Forschende greifen daher auf einen Vergleich zurück: die Suche nach dem Ausgang aus einem Labyrinth. Ein klassischer Computer probiert alle Wege aus. Ein Quantenrechner flutet das Labyrinth mit Wasser, das auf Antrieb den Ausgang findet

Zerlegen in Primfaktoren

Eine Stärke von Quantencomputern ist es, große Zahlen sekundenschnell in Primfaktoren zu zerlegen – eine Aufgabe, an der herkömmliche Rechner scheitern. Aber wer die schnelle Faktorisierung beherrscht, kann die RSA-Verschlüsselung knacken, den Sicherheitsstandard, nach dem wir Geschäfte im Internet abwickeln. Die klassische Rechenstrategie lässt sich damit vergleichen, dass eine Figur des chinesischen Legespiels Tangram in vielen Schritten in ihre Elemente zerlegt wird. Der Quantencomputer hingegen schafft das »auf einen Schlag«

Zum Betrieb des
Quantenrechners
hat das Forschungs-
team am Qutech
Institute im
niederländischen
Delft schränkeweise
unterstützende
Elektronik installiert



bauteilen gefangen sind. Alle diese Techniken haben ihre Vor- und Nachteile. Supraleitende Chips zum Beispiel lassen sich zwar mit etablierten Industrieverfahren herstellen, brauchen aber eine aufwendige Steuerelektronik, die sich noch nicht dort integrieren lässt, wo Quantencomputer jeder Bauart hingehören: in Vakuumkammern, die gleichzeitig als Kältemaschinen dienen.

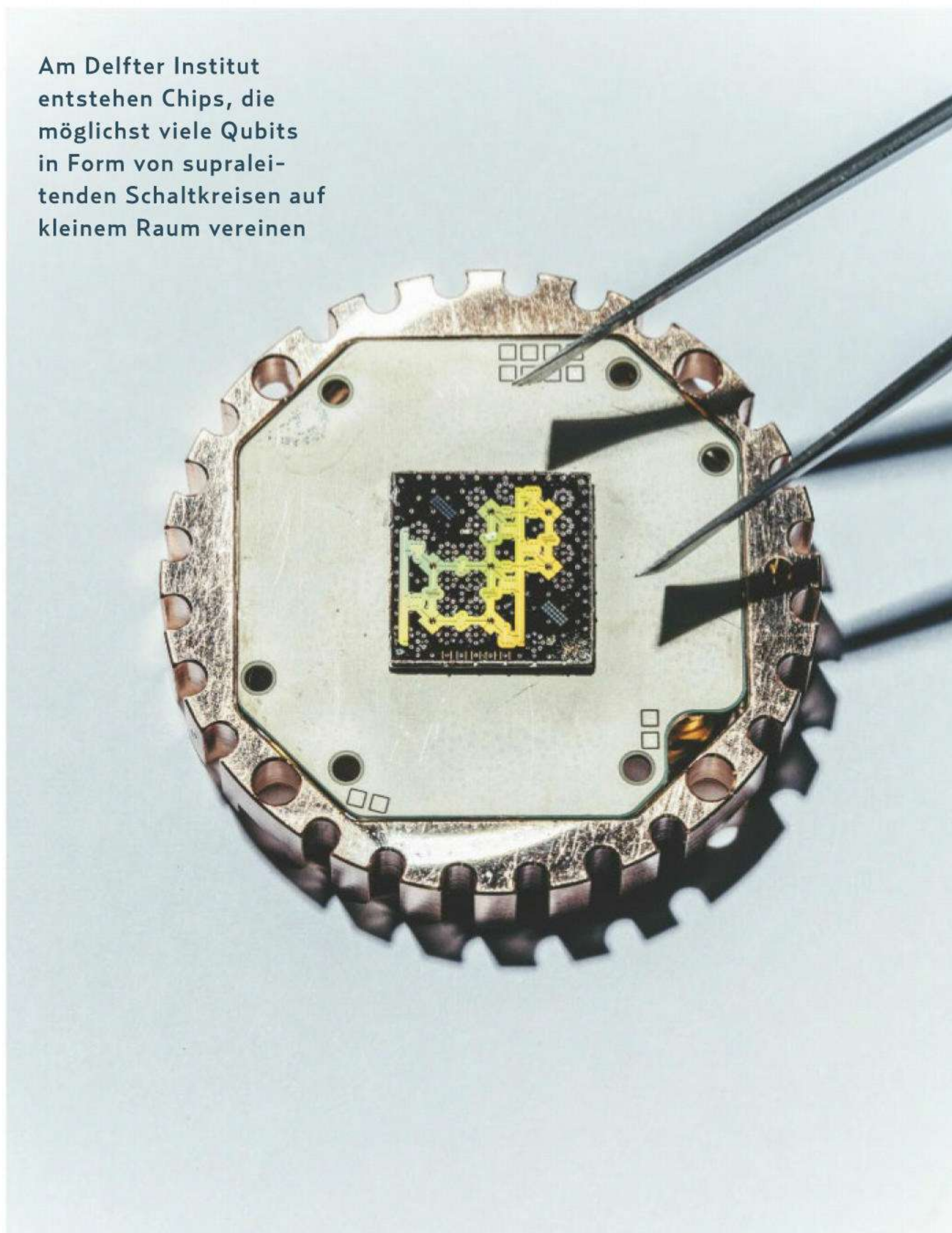


Vakuum und extreme Kälte? Das erinnert dann wieder an den Flug zum Mond. Auch dort mussten die Astronauten von ihrer Umgebung abgeschirmt werden. Doch während ein Raumschiff den Weltraum aussperrt, um das Leben der Besatzung zu schützen, müssen Qubits – genau andersherum – vom Chaos der Erdatmosphäre isoliert werden. Denn eindringende Luftmoleküle oder Photonen wechselwirken mit den Qubits. Die Umwelt verschränkt sich so mit den Qubits. Deren Verschränkung untereinander und ihre Überlagerung fallen dann zusammen wie ein Soufflé, wenn man den Backofen zu schnell öffnet.

Ein einzelnes Lichtteilchen kann also schon reichen, damit der Quantencomputer seine außergewöhnlichen Eigenschaften einbüßt. Aber ganz lässt sich die Umwelt nie aussperren, früher oder später schlägt die **Dekohärenz** zu – so heißt der Vorgang, wenn sich Qubits mit ihrer Umgebung austauschen. Normalerweise läuft dies binnen eines Milliardstels einer Milliardstelsekunde ab. Damit die Quantenmaschine genug Zeit hat, um eine Rechnung durchzuführen, müssen Forschende den Zeitpunkt der Dekohärenz hinauszögern – mit Temperaturen nahe dem absoluten Nullpunkt, mit Vakuumkammern sowie Magnetfeldabschirmungen. Bislang gelingt dies aber nur für einige Millionstelsekunden bis zu knapp einer Sekunde, je nach Art des Qubit.

Das ist sogar für einen Quantencomputer wenig Rechenzeit. Zwar zeichnet

Am Delfter Institut entstehen Chips, die möglichst viele Qubits in Form von supraleitenden Schaltkreisen auf kleinem Raum vereinen



Schon ein einzelnes
Lichtteilchen kann
die außergewöhnlichen
Eigenschaften des
Quantenrechners **zerstören**

ihn aus, dass er über schweren Aufgaben nicht Jahrtausende brüten müsste. Doch um künftig nutzbringende chemische Reaktionen zu entdecken, könnte er durchaus ein paar Wochen brauchen.

D

Die Außenwelt sorgt noch für ein zweites Problem: Manchmal ändert sie die Werte der Qubits. Dies passiert auch bei klassischen Computern: Dort „kippen“ Bits zufällig, von 1 auf 0 oder umgekehrt. Würde mit dem falschen Wert weitergerechnet, wäre das Ergebnis wertlos. Um den Fehler zu erkennen, bekommt jedes Bit zwei oder mehr Kopien zur Seite gestellt. Tanzt ein Bit aus der Reihe, wird es wieder an die anderen angepasst.

Ähnliche Methoden sollen beim Quantencomputer helfen. „Die Quanten-Fehlerkorrektur steht ganz oben auf der Agenda der Forschung“, sagt Andreas Wallraff von der ETH Zürich.

Eins zu eins lässt sich das klassische Verfahren aber nicht auf Quantenrechner übertragen. Denn Qubits kann man nicht direkt beobachten: Dies würde zwangsläufig ihren quantenmechanischen Zustand beeinflussen. Doch mit ausgeklügelten Anordnungen von Qubits und Hilfs-Qubits lässt sich der Ort des Fehlers indirekt einkreisen, um ihn anschließend zu korrigieren.

Dass das im Prinzip funktioniert, zeigte ein Team bei Google bereits 2015. Eine Schaltung aus neun supraleitenden Qubits detektierte Fehler und verbesserte sie ganz gut. Die Anordnung der neun überlebte mehr als achtmal so lange wie ein einzelnes Qubit – etwa 0,25 Tausendstelsekunden.

Solch eine Gruppe sich gegenseitig stabilisierender Qubits wird „logisches Qubit“ genannt, im Unterschied zum einzelnen, weniger stabilen „physikalischen Qubit“. Mit wie vielen Informationen ein Quantencomputer rechnen kann, ergibt sich nicht aus der Zahl seiner physikalischen, sondern seiner logischen Qubits.

Wie man aus möglichst wenigen physikalischen Qubits ein logisches konstruiert, ist eine offene Frage, um deren Beantwortung zäh gerungen wird. „Es ist nicht ausgemacht, dass Googles Ansatz zum Durchbruch führen wird“, meint Wallraff. Denn das logische Qubit des Tech-Riesen übersah schlicht viele Fehler.

Wallraffs Zürcher Team will Google übertrumpfen: Es hat ein logisches Qubit aus sieben physikalischen Qubits entwickelt, das alle Fehler erkennt. Doch es kann diese nicht korrigieren. Damit das gelingt, soll es zukünftig auf 49 physikalische Qubits anwachsen. Zur Erinnerung: Googles Quantenrechner Sycamore besitzt 53 physikalische Qubits.

Wie viele physikalische Qubits mindestens gebraucht werden, um langzeitstabile Qubit-Einheiten zu erschaffen, weiß derzeit niemand. Im Extremfall sind mehr als 1000 nötig, fürchten Fachleute. Und da hochkomplexe Probleme wiederum Tausender Recheneinheiten bedürfen, müssen Quantencomputer künftig womöglich aus Millionen physikalischen Qubits bestehen. Das wären Zehntausende Mal mehr, als heutige Prototypen besitzen. Es wäre noch ein sehr langer Weg.

Google und die Quantenüberlegenheit

Dass Quantencomputer bei vielen Problemen dem klassischen Rechner irgendwann überlegen sein werden, daran zweifelt die Fachwelt kaum. Trotzdem gibt es zum Meilenstein, den Google mit seinem Sycamore-Chip erreicht hat, auch andere Meinungen, fand Verifikationsredakteur **Tobias Hamelmann** aus dem **G+J Quality Board** beim Faktencheck.

Die Kritik stammt natürlich von der Konkurrenz: Mit neuen Algorithmen könne man Quantenrechnungen simulieren und die an Sycamore gestellte Aufgabe nicht in 10 000 Jahren, sondern schon in ein paar Tagen lösen. Dies zeigt deutlich: Nicht nur die Hardware bestimmt schnelles Rechnen, auch an der Software muss weiter geforscht werden.

Die Forschungsteams stehen vor einer kaum lösbar scheinenden Aufgabe: Sie müssen immer mehr Qubits vereinen. Aber je mehr der fragilen Einheiten zusammenkommen, umso anfälliger wird das System, umso schwerer lässt sich die Verschränkung aufrechterhalten.

Verbesserte sich jedoch die Abschirmung so weit, dass die Dekohärenzfreie Zeit eine kritische Schwelle überschreitet, ließen sich Fehler mit wenigen zusätzlichen Qubits drastisch senken. Diese theoretische Vorhersage konnte Google jüngst experimentell bestätigen. Das lässt manche Forschende hoffen, dass ein fehlerkorrigierter Quantenrechner trotz aller Herausforderungen bereits in fünf bis fünfzehn Jahren machbar ist.

Allerdings: „Der Quantenrechner wird nicht unterm Schreibtisch stehen“, sagt Wilhelm-Mauch. Privatpersonen wie auch Firmen würden die Rechenkraft der Maschinen über die Cloud nutzen. Auch wären Quantencomputer keine allmächtigen Rechner, sie machten heutige Computer nicht überflüssig.

Werden Quantencomputer – nach großem Trara – bloß ein Nischenprodukt? Keineswegs. Selbst wenn sie wohl nicht alle Hoffnungen erfüllen können, bleibt ihr Potenzial gewaltig.

Zu den überschwänglichsten Versprechen zählt, Quantencomputer würden Big-Data-Probleme lösen. Dazu sollen sie mit einer anderen Trend-Technologie zusammenarbeiten: mit künstlicher Intelligenz (KI).

Die ungeheure Menge an Daten, die in jeder Sekunde auf der Welt anfallen, ist ein Schatz, der noch lange nicht gehoben wird. KI erlernt durch Training, wertvolle Informationen und Muster in den Daten zu lesen. Wenn etwa Fitnessbänder den Puls von Personen kontinuierlich messen, kann KI daraus drohende Infarkte vorzeitig erkennen.

KI braucht viel Rechenkraft. Die riesigen Datenmengen mit künstlicher Intelligenz zu bewältigen erscheint daher nur auf einem Quantencomputer möglich. Allerdings lässt der sich längst nicht so schnell mit Daten füttern, wie er sie verarbeiten kann. Da es für diesen Engpass noch keine Lösung gibt, bleibt das Big-Data-Versprechen vage.

Für vielversprechender halten Fachleute den Einsatz in einem anderen Be-

reich: bei Computersimulationen in Chemie und Physik, in Pharmazie und Materialforschung, also bei allem, was sich um Atome und Moleküle dreht. Mit herkömmlichen Supercomputern lassen sich nur relativ kleine Moleküle bis ins Detail simulieren, denn mit jedem zusätzlichen Atom vervielfacht sich der Aufwand. Um Verbindungen mit mehr als 50 Atomen zu verstehen, bräuchte man einen Quantenrechner. Weil Qubits quantenmechanische Überlagerungen einnehmen, können sie die vielen möglichen Überlagerungszustände von Atomkernen und Elektronen in einem Molekül leicht simulieren, während klassische Rechner diese nacheinander abarbeiten müssten. Und da aus Atomen letztlich alles besteht – Medikamente, Treibstoffe, Dünger, Enzyme, Solarzellen, Katalysatoren oder Leichtbauwerkstoffe –, würden Quantenrechner unser Leben revolutionieren.

Sie könnten Ideen entwerfen, auf die kein Mensch bislang gekommen ist, aber auch bestehende Ideen in Computermo-

dellen prüfen, bevor sie im Labor getestet werden. Die zeitraubende Synthese im Reagenzglas, die bislang die Entwicklung neuer Produkte ausbremst, ließe sich auf die vielversprechendsten Kandidaten beschränken.

Auch fundamentale Prozesse der Natur ließen sich entschlüsseln. Zum Beispiel die Fotosynthese, bei der Pflanzen aus Kohlendioxid und Wasser energiereiche Zuckermoleküle herstellen. Die Menschheit könnte lernen, diesen Vorgang zu nutzen, etwa um Methanol als Treibstoff oder Grundstoff für die chemische Industrie zu gewinnen.

Dieser Teil der ersehnten Revolution startet vielleicht bereits in wenigen Jahren. Denn den Großteil der notwendigen Berechnungen übernähmen klassische Supercomputer, lediglich komplexe Teilaufgaben blieben für Quantencomputer. Diese würden sie in Sekundenbruchteilen lösen, dazu bräuchten sie keine aufwendige Fehlerkorrektur. Quanten-Co-Prozes-

soren könnten zum Beispiel die Energie eines Moleküls schnell und exakt ausrechnen – eine wichtige Größe bei der Entwicklung von Katalysatoren.

Heute noch utopische Materialien würden Realität werden, vielleicht ein Werkstoff, der federleicht, dünn und doch so fest ist wie Stahl. Oder eine leichte Batterie für E-Autos mit hoher Speicherkapazität, wie Fachleute von Volkswagen sie auf einem Quantenrechner simulieren wollen. Oder ein einfaches und effizientes Verfahren, das aus dem Treibhausgas Kohlendioxid nutzbare Rohstoffe herstellt: Damit würde der Quantenrechner zum Helfer gegen den Klimawandel.

Aber statt unseren Alltag direkt zu prägen wie Smartphones und Notebooks, werden Quantencomputer mutmaßlich aus dem Hintergrund heraus tief in unser Leben eingreifen. Sie werden Anwendung für Anwendung in die Praxis treten, über Jahrzehnte hinweg. Den einen großen Moment, die „Mondlandung“, wird es wohl nicht geben.

DIE WELT AM ABGRUND.

Der bedeutendste Roman über den Klimawandel

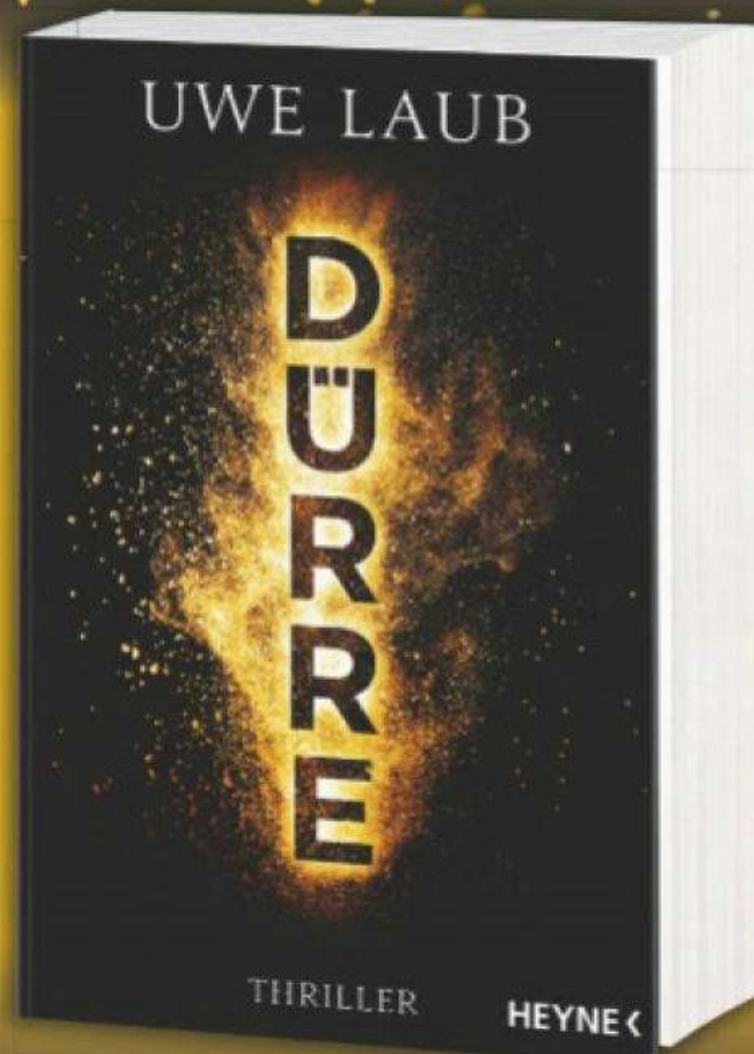
»Ein Meisterwerk.« *The Times*

»Unbeirrbarer, visionärer Optimismus!« *The Guardian*

»Pflichtlektüre für alle, die an Zukunft interessiert sind.« *Rolling Stone Magazin*



€ 17,- [D] | ISBN 978-3-453-32170-0



€ 15,- [D] | ISBN 978-3-453-44118-7

Wir dachten, wir hätten noch Zeit. Jetzt bezahlen wir den Preis.

Dürre und Hunger erreichen Europa. Bringt eine App zur Kontrolle der Menschen die Rettung?

Der packende Thriller von Uwe Laub

Weitere Wissenschaftsthiller entdecken auf heyne.de/die-welt-am-abgrund

HEYNE <

Hokus- pokus mit Quanten

Eine komplexe und oft
unverstandene Theorie, die
den Urgrund der Welt erklärt:
**Quantenphysik ist wie
geschaffen für Esoteriker
und Pseudoheilerinnen.**
Groß ist dabei die Gefahr
von Scharlatanerie
und Geschäftemacherei



Text: Holm Hümmler

Fotos: Klaus Pichler

SPIEL MIT DER LEICHTGLÄUBIGKEIT

In seiner Fotoserie »This Will Change Your Life Forever« reflektiert Klaus Pichler, wie sich Esoterik in der Mitte der Gesellschaft ausbreitet. Hier hat er ein Gruppenritual mit Lichtkristallen re-inszeniert



D

Der Proband liegt auf dem Bauch, Günter Heede steht hinter ihm, zu seinen Füßen, und hebt die Unterschenkel an. „Man sieht den bereits vorhandenen Beinlängenunterschied von etwa zwei Zentimetern“, sagt er. Heede beschreibt einen Beckenschiefstand.

Seine Frau erscheint in dem von ihm selbst verbreiteten Video. Sie legt beide Hände sanft in den Nacken des Liegenden, dann noch einmal kurz auf den oberen und unteren Rücken. Schon nach wenigen Sekunden sehen die Beine gleich lang aus – ein Effekt, der allerdings auch durch ein leichtes Bewegen beider Füße entstanden sein könnte.

„Energetische Wirbelsäulenbegradigung“ mittels „Quantenheilung nach der Matrix-Inform Zwei-Punkt-Methode“ nennt Heede das Vorgehen. Sein Heilverfahren sei auch als Fernanwendung per Telefon oder Internet möglich. Er wirbt dafür unter anderem auf einem Kongress für biologische Krebsabwehr und auf dem Videokanal eines bekannten Reichsbürger-Aktivistin. Seine Methode auch für GEOkompakt zu erläutern lehnte Heede allerdings ab.

Pseudomedizin
untergräbt das
Vertrauen in
die Wissenschaft –
und letztlich
in die **Demokratie**



HALTLOSE HEILSPRESENTE

Esoterik-Fans behaupten, Schallwellen mit der »Frequenz von Heilpflanzen« könnten das Unterbewusstsein umprogrammieren – und so Tumoren bekämpfen

„Quantenheilung ist Quantenphysik praktisch angewendet“, steht auf seiner Homepage. Heede, ursprünglich aus der Elektrotechnik kommend, erklärt die angebliche Wirkung über eine allumfassende „Matrix“, in der der Bauplan jedes Gegenstands und Lebewesens auf der Welt enthalten sei.

Jedoch: In der Quantenphysik ist von einer solchen Matrix gar nicht die Rede.

Heede ist nicht allein. Unter dem Begriff „Quantenheilung“ versammeln sich verschiedene Strömungen esoterischer Alternativmedizin, die von sich behaupten, sie könnten mithilfe der Quantenphysik Krankheiten heilen – teils bis hin zu Krebs. Doch was die „Wunderheiler“ praktizieren, macht physikalisch keinen Sinn und ist wohl meist nicht wirksamer als ein Placebo. Dennoch machen sie damit Geld – und gefährden womöglich Kranke, falls diese irrtümlich meinen, dass die erhoffte spirituelle Wirkung eine ärztliche Behandlung ersetzen könne.

Alle Praktizierenden der „Quantenheilung“ eint, dass sie physikalisch klingende Begriffe nutzen, um die angebliche Wirkung ihrer Therapien zu erklären.

Manche behaupten, das Berühren der Kranken an zwei Punkten sei eine „quantenmechanische Messung“, durch

die eine „quantenphysikalische Welle“ aus dem „Meer aller Möglichkeiten“ genau in den vom Heilenden gewünschten Endzustand kollabiere. Das klingt beeindruckend und impliziert, allein der Wille der Praktizierenden rufe die ersehnte Heilung hervor.

Doch das widerspricht der Quantenphysik: Laut ihr können sich Menschen oder ihre Organe nicht in einem quantenmechanischen Wellenzustand befinden, da die unzähligen Atome sich gegenseitig stören, wodurch ihre quantenmechanischen Eigenschaften verschwinden – weswegen wir im Alltag auch keine Quanteneffekte beobachten. Und selbst wenn es eine solche Mensch-Welle gäbe, wäre der Therapieansatz reine Lotterie: Das Ergebnis einer quantenmechanischen Messung ist im Rahmen dessen, was die Welle an Möglichkeiten vorgibt, völlig zufällig. Das Resultat ist durch nichts zu beeinflussen, auch nicht durch menschlichen Willen.

Andere Köpfe der Szene begründen die Therapie durch die Quantenverschränkung: Durch sie hänge alles mit allem zusammen. In der Realität tritt eine **Verschränkung** jedoch nur im atomaren Bereich auf, zwischen einigen wenigen winzigen Teilchen – und das auch nur, solange diese vollständig von der Außen-

welt abgeschnitten sind. Eine Verschränkung zwischen Heilenden und Kranken ist daher unmöglich: Menschen stehen im ständigen Kontakt mit der Außenwelt, etwa der Luft – diese würde jede Verschränkung zerstören, noch bevor sie sich aufbauen konnte.

Gerne berufen sich Praktizierende auf den österreichischen Physiker Anton Zeilinger, der zu den wohl bedeutendsten Quantenforschern der Welt zählt. Doch Zeilinger distanziert sich scharf davon: Für ihn ist Quantenheilung „maximal ein Placebo-Effekt. Aber mit Physik hat das überhaupt nichts zu tun.“

Dennoch finden sich im Netz Dutzende Angebote für Seminare, in denen sich jede Person in „Quantenheilung“ ausbilden lassen kann. Und während etwa Heilpraktikeranwärter*innen eine Unbedenklichkeitsprüfung absolvieren müssen, brauchen die so angelernten „Quantenheiler“ nicht einmal diese niedrige Hürde zu erfüllen, denn: Sie zählen ihre Therapien zum Bereich der Geistheilung. 2004 entschied das Bundesverfassungsgericht in einer ihm vorgelegten Verfassungsbeschwerde, dass der betref-

fende „Geistheiler“ tatsächlich keine Unbedenklichkeitsprüfung bestehen müsse, weil von ihm ohnehin niemand medizinischen – sondern allein spirituellen – Beistand erwarten würde. Eine merkwürdige Argumentation, denn warum sollten Kranke Heilende aufsuchen, ohne von ihnen Heilung zu erwarten?

Ganz so harmlos ist das Vertrauen auf wirkungslose Scheinbehandlungen aber nicht: Im Extremfall könnten Kranke womöglich nicht oder zu spät lebensnotwendige Therapien in Anspruch nehmen, oder sie lehnen wichtige Vorsorgemaßnahmen wie Impfungen ab. Pseudomedizin untergräbt zudem das Vertrauen in die Wissenschaft, in die Möglichkeit, sich auf Fakten zu einigen, und damit letztlich in die Demokratie – dies hat sich in der Querdenkerbewegung gezeigt.

„Quantenheilung“ mit ihren scheinbar innovativen Methoden ist die extremste Form, Quantenphysik für allerlei Unfug auszunutzen. Die mysteriös klingende und von vielen Menschen unverstandene Theorie muss teils auch dazu

OHNE WIRKSTOFF WIRKUNGSLOS

Die Quantenphysik übersteigt unsere vom Alltag geprägte Vorstellungskraft. Dennoch setzt sie Gewissheiten der klassischen Naturwissenschaft nicht außer Kraft – etwa, dass ein Präparat ohne Heilmittel höchstens ein Placebo ist



WIEDERKEHR DES WIDERLEGTEN

Uralte, vielfach entkräftete Ideen, etwa mittels Steinen zu heilen, erscheinen durch wissenschaftlich klingende Erklärungen modern, seriös und vertrauenswürdig

herhalten, schon etablierte Placebomedizin nachträglich zu rechtfertigen.

Ein Beispiel ist die Homöopathie: Die dort eingesetzten Globuli enthalten verschwindend wenig, oft auch nichts von den angegebenen Wirkstoffen. Dass dennoch angeblich eine Wirkung auftrete, erklären zumindest manche der Homöopath*innen mit einer Quantenverschränkung, die die Kügelchen zwischen dem weit entfernten Wirkstoff und den Kranken erzeugt. Aufgrund der störenden Außenwelt ist dies auch hier nach der echten Quantenphysik ausgeschlossen.

Mitunter werden solche Rechtfertigungen für die Homöopathie in umfassendere scheinwissenschaftliche Weltbilder eingebettet, mit Namen wie „verallgemeinerte Quantentheorie“, „Quantenhomöopathie“ oder „quantenlogische Medizin“. Meist wird sich jedoch auf die etablierte Quantenphysik berufen, ohne dass der Eindruck entsteht, dass sich die Personen jemals mit deren Erkenntnissen beschäftigt hätten. So heißt es dann so pauschal wie falsch, mit der Quantentheorie habe sich die Physik von der „materialistischen Weltsicht“ abgewandt – weswegen es eben gar nicht nötig sei, dass ein Wirkstoff in einem Arzneimittel überhaupt materiell vorkomme. Wo solche Behauptungen näher ausgeführt werden, offen-

bart sich in der Regel eine erschreckende Unkenntnis grundlegender Konzepte sowohl der klassischen Physik als auch der Quantenmechanik.

Wie sich mit der Faszination für die Quantenphysik Geschäfte machen lassen, zeigen eindrücklich vielerlei angebotene „Quantentherapiegeräte“: Sie versprechen für viel Geld eine Heilwirkung mit quantenphysikalischen Methoden.

Zu den einfachsten gehört ein „Quantenkraftstein“, laut Produktbeschreibung ein Stück unter hohem Druck gepresstes Holz in bunter Farbe zum Preis von 785 Euro. Das Objekt soll vor gesundheitsschädlichen „plus-geladenen Planck’schen Quantenteilchen“, unter anderem aus dem Mobilfunk, schützen, da es Teilchen umgekehrter (also Minus-)Ladung enthalte. Das Unternehmen gibt nicht an, um welche Teilchen es sich konkret handeln soll – „Planck’sches Quantenteilchen“ ist eine leere Phrase. Und da sich in Materie positive Ladungen automatisch mit negativen zusammenfinden, bräuchte es für solch einen Ausgleich nicht eigens einen Kraftstein.

Schon komplexer ist der „Disconder“. Dessen Produktbeschreibung ist ein Sammelsurium von pseudowissenschaftlichen Konzepten. Unter anderem wird behauptet, dass „Planck’sche Quanten“ ein Bewusstsein hätten.

Das etwa scheckkartengroße batteriebetriebene Gerät soll man mit einem Gurt 21 Tage lang um den Bauch tragen. Durch Schallwellen soll das Gerät quantenphysikalisch mittels der „Frequenzen von Heilpflanzen und Bachblüten“ (was auch immer das bedeuten mag) das Unterbewusstsein umprogrammieren. Auf diese Weise ließen sich auch physische Krankheiten bekämpfen: Selbst einen Tumor, so hieß es jedenfalls in einer früheren Produktbeschreibung, heile der Disconder ebenso schnell wie einen Schnupfen – zum Preis von 1800 Euro plus 20 Euro für die Programmierung.

Wer sich den Bauchgurt ersparen will, kann der Firma stattdessen ein Foto von sich schicken, das als „Adresse für das Quantenfeld“ dienen soll. Das Foto werde dann mit (heilenden) Informationen verschränkt, die anschließend über „Quantenverschränkung“ an den Klienten übertragen werden sollen. Vermarktet wird eine solche Disconder-Ferntherapie auch als „Immun-Check“, etwa gegen COVID-19, von dem ein Disconder-Anbieter behauptet, es sei nicht durch Viren verursacht, sondern durch 5G-Mobilfunk.

Häufig behaupten die Firmen, alles sei durch ein allumfassendes Informationsfeld verbunden, durch das der menschliche Geist – aber eben auch ihre Gerätschaft – die materielle Realität beeinflussen könne. Doch ein solches Feld kommt in der Quantenphysik nicht vor.

Dennoch beruft sich auf dieselbe Erklärung ein noch teureres Gerät mit Namen „Timewaver“. Auf der dazugehörigen Internetseite zitiert das Unternehmen in einem Beitrag zur „Wissenschaft“ des Geräts in fünf kurzen Absätzen nicht

weniger als 13 tatsächliche und vermeintliche Autoritäten der modernen Physik mit der Vorstellung, das menschliche Bewusstsein könne direkten Einfluss auf Materie nehmen – eine Aussage, die die meisten der Zitierten wohl so nie gemacht oder zumindest nicht gemeint haben dürften.

Der Timewaver, eine kleine Box mit Computeranschluss, soll mysteriöse elektrische Signale messen, die angeblich etwas über den Gesundheitszustand einer Person aussagen. In diesem als Bioresonanz bezeichneten

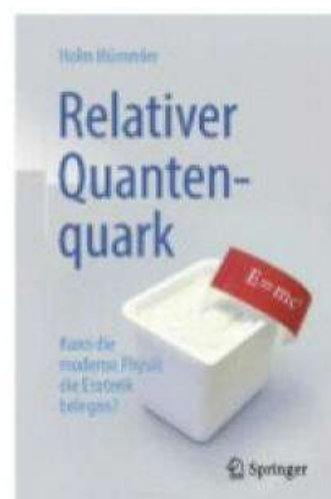
Verfahren vergleicht der Timewaver laut Anbieter diese Signale mit in einer Datenbank gespeicherten Frequenzen und wählt nach einem nicht veröffentlichten Verfahren andere Frequenzen aus, die er wiederum als ultraschwache Signale über Elektroden auf die Haut oder über ein „quantenphysikalisches Informationsfeld“ auf die Person überträgt. Die Existenz sol-

Mit der **Faszination** für die Quantenphysik lassen sich **gute Geschäfte** machen

cher Frequenzen, die etwas über Krankheiten eines Menschen verraten, ist ebenso unbelegt wie die daran anschließende Vorstellung, man könne Krankheiten durch das Senden von Informationen mittels spezifischer Frequenzen heilen. Eine Idee, die sich auch nicht aus der Quantenphysik begründen lässt.

Die Preise für Timewaver-Geräte mit samt Software reichen von 3000 Euro für Privatpersonen bis zu über 30 000 Euro für Heilpraktiker*innen. Letztere können sich mit einer Zusatzsoftware dann aber auch gleich als Unternehmensberater*innen vermarkten, denn mit den aus der Luft aufgefangenen Signalen soll der Timewaver auch soziale und wirtschaftliche Analysen für ganze Organisationen erstellen. So soll das Gerät nicht nur Probleme mit dem Personal oder der Kundenschaft aus den aufgefangenen Schwingungen erkennen, sondern durch die gesendeten Signale auch gleich beheben.

Dass naturwissenschaftliche Laien solch absurde Angebote immer wieder für realistisch halten, liegt teilweise auch an der Art, wie Physik in der Öffentlichkeit dargestellt wird. Beim Versuch, ihre Forschung interessant und spannend zu präsentieren, greifen auch seriöse Physiker und Physikerinnen allzu leichtfertig zu Begriffen wie Teleportation und Quantenspuk oder zu fragwürdigen Analogien zu Schrödingers Katzenbeispiel. Über wenig fachkundige Medien transportiert, werden solche Formulierungen von der Öffentlichkeit häufig missverstanden. Es entsteht der Eindruck, die Quantenphysik sei eine Art Magie, in der möglich wird, was die Esoterik verspricht.



Buchtipps

Holm Hümmler:
»Relativer Quantenquark. Kann die moderne Physik die Esoterik belegen?«, Springer-Verlag, Berlin/Heidelberg 2. Aufl. 2019

POSTANSCHRIFT DER REDAKTION:
BRIEFFACH 24, 20444 HAMBURG.
TELEFON: 0049/40/37 03 20 84
E-MAIL: BRIEFE@GEOKOMPAKT.DE
INTERNET: WWW.GEOKOMPAKT.DE

CHEFREDAKTEURE: Jens Schröder, Markus Wolff
REDAKTIONSLEITUNG: Meike Kirsch (Reise), Christiane Löll, Jürgen Schaefer (Wissen), Katharina Schmitz (Natur und Nachhaltigkeit), Joachim Telgenbüscher (Geschichte)
VISUAL DIRECTOR: Andreas Pufal
INNOLAB: Margitta Schulze Lohoff
STELLY. VISUAL DIRECTOR (FOTOGRAFIE): Lars Lindemann
MANAGING DESIGNER: Arne Kluge (P. M.), Torsten Laaker (GEO WISSEN, GEO kompakt), Tatjana Lorenz (GEOEPOCHE), Eva Mitschke (GEO Saison), Daniel Müller-Grote (GEO)
TEXTLEITUNG: Stephan Draf, Birte Lindlahr, Katharina Priebe
GESCHAFTSFÜHRENDE REDAKTEURE: Maike Köhler, Bernd Moeller
LTG. DIGITALE MAGAZINE/SONDERPRODUKTE: Rainer Droste
TEXTREDAKTION: Jörg-Uwe Albig, Jörn Auf dem Kampe, Klaus Bachmann, Jens-Rainer Berg, Kirsten Bertrand, Insa Bethke, Tilman Botzenhardt, Dr. Anja Fries, Marlene Göring, Gesa Gottschalk, Rainer Harf, Lara Hartung, Gunnar Herbst, Maria Kirady, Sebastian Kretz, Diana Laarz, Fred Langer, Barbara Lich, Dr. Mathias Mesenhöller, Theresa Palm, Dr. Vivian Pasquet, Ines Possemeyer, Samuel Rieth, Nora Saager, Martin Scheufens, Katja Senjor, Iona Marie Schlußmeier, Claus Peter Simon, Johannes Teschner, Bertram Weiß, Sebastian Witte
ABENTEUER & EXPEDITIONEN: Lars Abromeit
REDAKTEUR FÜR BESONDERE AUFGABEN: Siebo Heinken
GEO-TAG DER NATUR: Dr. Mirjam S. Gleßmer, geo-tagdernatur@geo.de
BILDREDAKTION: Julia Franz, Mareile Fritzsche, Christian Gargerle, Christian Gogolin, Anja Jöckel, Frauke Körting, Chantal Alexandra Pils, Roman Rahmacher, Jochen Reiß, Carla Rosorius, Trixi Rossi, Simone Thürnau, Katrin Trautner, Carina Weirauch
GRAFIK: Sharare Amirhassani, Ulrike Darwisch, Dennis Gusko, Anja Klingebiel, Jan Krummrey, Anna Primavera, Christina Schäfer, Christina Stahlke, Frank Strauß, Nele Wiewelhove
KARTOGRAFIE: Stefanie Peters
CHEF VOM DIENST/KOORDINATION: Ralf Schulte
QUALITY BOARD – VERIFIKATION, RECHERCHE, SCHLUSSREDAKTION:
 Leitung: Tobias Hamelmann, Norbert Höfler, Melanie Mönig (Stv.);
 Sven Barske, Elke von Berkholz, Lenka Brandt, Regina Franke, Hildegard Frilling, Dr. Götz Froeschke, Thomas Gebauer, Susanne Gilges, Cornelia Haller, Dagny Hildebrandt, Sandra Kathöfer, Judith Ketelsen, Petra Kirchner, Dirk Krömer, Michael Lehmann-Morgenthal, Jeanette Langer, Dirk Liedtke, Kirsten Maack, Jörg Melander, Melanie Moenig, Andreas Mönnich, Adelheid Molitoris, Susan Molkenbuhr, Alice Passfeld, Christian Schwan, Andreas Sedlmair, Stefan Sedlmair, Corinna Slotty, Olaf Stefanus, Bettina Süssmilch, Torsten Terraschke, Antje Wischow
SEKRETARIAT: Ümmük Arslan, Judith Swiderek, Silvia Wiekling
USA-KORRESPONDENT: Karl Teuschl
HONORARE/SPESEN: Angelika Györffy, Heidi Hensel, Daniela Klitz, Katrin Schäfer, Carola Scholze, Katrin Ullerich, Andrea Zysno
GEO.DE: Leitung: Julia Großmann, Jan Henne
 Redaktion: Peter Carstens, Jaane Christensen (Bildredaktion), Solvejg Hoffmann, Malte Joost
VERANTWORTLICH FÜR DEN REDAKTIONELLEN INHALT: Jens Schröder, Markus Wolff
PUBLISHER: Frank Thomsen, Toni Willkommen (Stellvertreter)
PUBLISHING MANAGER: Patricia Hildebrand, Svenja Urbach, Eva Zaher
DIGITAL BUSINESS DIRECTOR: Carina Laudage
SALES DIRECTOR: Franziska Bauske, Betsy Edakkamannil, Sarah Engelbrecht, DPV Deutscher Pressevertrieb
MARKETING DIRECTOR: Sandra Meyer, Frank Thomsen
MARKETING MANAGER: Pascale Victoir
PRESSE- UND ÖFFENTLICHKEITSARBEIT: Isabelle Haesler
HERSTELLUNG: G+J Herstellung, Heiko Belitz (Lt.), Oliver Fehling
VERANTWORTLICH FÜR DEN ANZEIGENTEIL: Fabian Rother,
 Head of Brand Print+Direct Sales, Ad Alliance GmbH, Am Baumwall 11, 20459 Hamburg.
 Es gilt die jeweils aktuelle Preisliste. Infos hierzu unter www.ad-alliance.de

Der Export der Zeitschrift GEOkompakt und deren Vertrieb im Ausland sind nur mit Genehmigung des Verlages statthaft. GEOkompakt darf nur mit Genehmigung des Verlages in Lesezirkeln geführt werden. Alle Rechte vorbehalten. Insbesondere dürfen Nachdruck, Aufnahme in Online-Dienste und Internet und Vervielfältigung auf Datenträger, wie CD-ROM, DVD-ROM etc., nur nach vorheriger schriftlicher Zustimmung des Verlages erfolgen.

Bankverbindung: Deutsche Bank AG Hamburg,
 IBAN: DE30 2007 0000 0032 2800 00, BIC: DEUTDEHH
 ISSN: 0933-9736

Druckvorstufe: 4mat Media Hamburg
 Druck: appl druck GmbH, Wemding
 GEOkompakt wird auf chlorfrei gebleichtem Papier gedruckt.
 Die Papierfasern stammen aus nachhaltiger Waldbewirtschaftung.
 Die Nachhaltigkeit ist nach ISO 14001 zertifiziert.
 © 2021 Gruner + Jahr, Hamburg,
 Printed in Germany

USA: GEO (German) (USPS no 00011476) is published monthly by Gruner+Jahr GmbH.
 Known Office of Publication: Data Media (A division of Cover-All Computer Services Corp.),
 2221 Kenmore Avenue, Suite 106, Buffalo, NY 14207-1306. Periodicals postage is paid at
 Buffalo, NY 14205. Postmaster: Send address changes to GEO (German), Data Media,
 P.O. Box 155, Buffalo, NY 14205-0155,
 E-Mail: service@roltek.com, Toll free: 1-877-776-5835

Kanada: Sunrise News, 47 Silver Shadow Path, Toronto, ON, M9C 4Y2,
 Tel. +1 647-219-5205, E-Mail: sunriseorders@bell.net

ABONNEMENT- UND EINZELHEFTBESTELLUNG
ONLINE-KUNDENSERVICE: www.geo.de/kundenservice
POSTANSCHRIFT: GEOkompakt-Kundenservice,
 20080 Hamburg
 Tel.: 0049/40/5555 89 90
SERVICE-ZEITEN: Mo–Fr 7.30–20 Uhr, Sa 9–14 Uhr

PREIS JAHRESABONNEMENT:
 44,00 € (D), 50,00 € (A), 74,40 sfr (CH);
 Preise für weitere Länder auf Anfrage erhältlich.

**BESTELLADRESSE FÜR GEO-BÜCHER,
 GEO-KALENDER, SCHUBER ETC.:**
 GEO-Versand-Service, 74569 Blaufelden
 Tel.: 0049/40/422 36 427

BILDNACHWEIS

Anordnung im Layout: l. = links, r. = rechts,
 o. = oben, m. = Mitte, u. = unten

TITEL Victor De Schwanberg/Science Photo Library

EDITORIAL Andreas Pufal: 3

INHALT siehe entsprechende Seiten

SCHÖNE NEUE QUANTENWELT

Jan Hosan: 6/7; Crommie/Lutz & Eigler/IBM: 8 u.; Olga Garnova/OIST: 8 m.;
 IBM Research/Science Photo Library: 8/9; Gerhard Hühdepohl/ESO: 10/11; Christian Ohde/
 Alamy Stock Photo: 11 u.; Science Photo Library: 12/13; Susanne Bischofs/PTB: 14/15;
 Xinhua/imago: 16/17; Phil Degginger/Science Photo Library: 18/19;
 Patrick Gaillardin/Science Photo Library: 18 o.; Dirk Bauer/WAZ FotoPool/Funke: 18 r.;
 Valentin Flauraud/AFP/Getty Images: 18 u.;
 Brendon Thorne/Bloomberg/Getty Images: 20/21; EyeEm/Getty Images: 22/23

»DAS IST IN VIELEN PUNKTEN GEHOBENER UNSINN«
 Philip Frowein für GEO kompakt: 26–31

DAS MYSTERIUM DER WELLEN UDN TEILCHEN

Timm Weitkamp/Wikipedia 34/35; Science Photo Library: 36, 37 m.;
 ullstein bild/Getty Images: 37 l.; United Archives International/imago images: 37 m.;
 Tim Wehrmann für GEO kompakt: 38/39

DER KAMPF DER TITANEN

akg-images: 40/41; MSI/Science Museum/ullstein bild: 43; Franco Rasetti/CERN: 44;
 Dirac Collection/Florida State University Libraries: 45

GESICHTER EINER WISSENSCHAFT

Anja Stiehler für GEO kompakt: 50–61

SCHNELLER RECHNEN FÜR DEN PLANETEN

Bartek Wróblewski/stock.adobe: 62/63; IBM: 64/65, 66 u.; Mattia Balsamini: 66/67, 70, 71;
 Martin Küsting: 68/69

HOKUSPOKUS MIT QUANTEN

Klaus Pichler/Agentur Anzenberger: 74–78

»JEDE MESSUNG KREIERT ETWAS NEUES IM UNIVERSUM«
 Katharina Gschwendtner für GEO kompakt: 80–83

EINSTEINS SPUK

IQQI: 86/87, 94; Lois Lammerhuber: 88/89, 90/91, 92/93, 95

AM PULS DES LEBENS

EyeEm/Getty Images: 96/97; Bo Valentino/Alamy Stock Photo: 98/99;
 Wirestock Creators/Shutterstock: 110/111; Neil Fisher/Ocean.org: 111;
 Chris Ison/Shutterstock: 102/103; Dr. Chris Henstridge/Science Photo Library: 104; Steve
 Gschmeissner/Science Photo Library: 105

WAS IST WIRKLICH?

Mattia Balsamini: 106/107, 108, 109 o., 110, 113 u.; David Vintiner: 113 o., 114;
 Ann-Marie Aring: 109 u., 111, 112

VON WEGEN LEER!

Markus Breig/KIT: 116/117; Chris Gunn/NASA: 119;
 Philip Saltonstall/NIF/Lawrence Livermore National Laboratory: 120

HINTERM HORIZONT GIBT'S EIN ZURÜCK

EHT Collaboration: 122/123; Wim Klerkx/laif: 124 o.; Sonia Fernandez: 124 u.;
 Mario Mensch/Picture Press: 125; face to face: 126 l.; Chip Somodevilla/Getty Images: 126 r.;
 NASA/Jeremy Schnittman/Science Photo Library: 127

RINGEN UM DIE NÄCHSTE REVOLUTION

NASA/JPL-Caltech/ESA/CXC/STScI: 128/129; Esa/Hubble & Nasa/Science Photo Library: 131;
 NASA/ESA: 132/133, 135; NASA/JPL-Caltech/IPAC: 136

QUANTEN KURZ UND KNAPP

Rainer Harf für GEO kompakt: 140–145

GEOkompakt

ABO

GEOkompakt erscheint viermal
 pro Jahr! Hier geht's zum Abo:
geo.de/kompakt-im-abo

Ziel der Physik sollte laut Christopher Fuchs sein, Gemeinsamkeiten von Phänomenen zu finden. So wie Kohlenstoff ein Charakteristikum von Diamanten, Bleistiften und Autoabgasen ist

In der noch **jungen Quantentheorie des QBismus**, betont der Physiker Christopher Fuchs, könnten wir lediglich eine subjektive Sicht der Welt gewinnen. Aber gleichzeitig schreibt er uns eine viel weitreichendere Rolle in ihr zu als die klassische Wissenschaft

»Jede Messung kreiert etwas Neues im Universum«

Interview: Klaus Bachmann

Illustrationen: Katharina Gschwendtner

GEOkompakt: *Sie vertreten eine Deutung der Quantenmechanik mit dem prägnanten Namen QBismus.*

Was geschieht aus Ihrer Perspektive in der Quantenwelt?

CHRISTOPHER FUCHS: Ein gutes Bild für den Unterschied zwischen dem QBismus und der klassischen Sicht auf die Quantentheorie ist der Vergleich zwischen einem Pfadfinderhandbuch und einem Weltatlas. Die Landkarten sind der Versuch, alle Orte und Länder in der Welt wiederzugeben. Natürlich muss auch ein Atlas von Zeit zu Zeit aktualisiert werden, aber im Wesentlichen beansprucht jede Ausgabe, etwas Statisches, Zeitloses zu repräsentieren. Das Pfadfinderhandbuch ist anders. Es bezieht sich auf die Dinge der Welt. Vor allem aber bietet es einen Leitfaden, Entscheidungen zu treffen, um sich in der Welt besser zu rechtzufinden – egal, in welche Umstände man gerät. Für den QBismus gleicht die Quantenmechanik so einem Handbuch, das bei der Navigation hilft.

QBisten geben damit die Idee auf, die Quantentheorie beschreibe eine objektive Realität, also die Berge, Meere, Städte einer Landkarte. Sie behaupten, wir könnten lediglich eine persönlich geprägte Sicht auf die Welt gewinnen. Was ich über die Welt erfahre, etwa durch eine Messung, kann doch nicht von meiner Person abhängen?

Eine der Innovationen des QBismus ist es, dass er eine andere Metapher für die Erfahrung der Welt wählt als üblich. Die klassische Vorstellung ist ein Auge, das sieht, was da ist. QBisten sprechen stattdessen von einer Hand, die etwas tut und eine Reaktion hervorruft. So gewinnen Handelnde Erfahrungen über die Welt.

Bei einem großen Objekt kann ich gut vorhersagen, wie es sich verhalten wird, wenn ich es zum Beispiel vermesse. In der Quantenwelt funktioniert das nicht, da können wir nur Wahrscheinlichkeiten dafür angeben, welche Erfahrung für uns aus unserer Interaktion etwa mit einem Elektron resultiert. Zum Beispiel der „Impuls eines Elektrons“ steht im QBismus für eine Erfahrung.

Der QBismus sieht in diesen Wahrscheinlichkeitsangaben rein subjektive Werte. Sie haben im Prinzip nichts damit zu tun, wie sich die Welt wirklich verhält, sondern

spiegeln wider, welches Ergebnis wir aufgrund unserer persönlichen Vorinformationen erwarten.

Wahrscheinlichkeiten lassen sich doch berechnen, etwa wie häufig Kopf oder Zahl erscheinen, wenn ich eine Münze werfe. Das sind objektive Eigenschaften.

Ihre Formulierung lässt vermuten, dass Sie Wahrscheinlichkeiten frequentistisch sehen. In dieser Sichtweise wirft man die Münze viele Male und zählt, was jeweils oben liegt. Nach vielen Versuchen stellt sich das Verhältnis von 50 Prozent zu 50 Prozent ein. Der QBismus beruft sich auf eine andere Variante der Wahrscheinlichkeit. Sie geht zurück auf den englischen Pfarrer Thomas Bayes. Daher auch der Name QBismus, es ist die Abkürzung von Quanten-Bayesianismus. In dieser Sichtweise geben Wahrscheinlichkeiten die subjektive Überzeugung an, dass ein Ereignis eintritt. Tauchen neue Informationen auf, wird die Einschätzung revidiert. So gelangen wir zu den Grundlagen unserer Entscheidungen.

Wie haben wir uns das konkret vorzustellen?

Nehmen Sie einen Arzt oder eine Ärztin, bei deren Patient Verdacht auf Krebs besteht. Anhand der Daten, wie häufig die Krankheit in der Bevölkerung auftritt, der Familiengeschichte und weiterer Parameter bestimmen die Mediziner eine Ausgangswahrscheinlichkeit. Kommen weitere Ergebnisse von Tests und Untersuchungen hinzu, wird die Wahrscheinlichkeit in deren Licht neu bestimmt. Dafür gibt es mathematische Regeln. In die Neubewertung können dabei auch ärztliche Erfahrungswerte mit einfließen. Wir konnten nun zeigen, dass sich allein mithilfe dieser Art der Wahrscheinlichkeitstheorie die Born'sche Regel der Quantenmechanik formulieren lässt.

Born'sche Regel? Das müssen Sie uns erklären.

Die Born'sche Regel schlägt die Brücke zwischen einem Quantenzustand – oder wie manche auch sagen: der Wellenfunktion – und einem Experiment. Das Quadrat der Wellenfunktion ergibt die Wahrscheinlichkeit, dass ein Handelnder bei der Interaktion mit einem Quantensystem eine bestimmte Erfahrung hat, zum Beispiel eine

»Die Idee, alles bestehe aus einem Stoff X und aus ihm ergebe sich alles, wirft man am besten über Bord«

Erfahrung von Spin. Das lässt sich experimentell messen, die Wellenfunktion dagegen nicht.

Wie können denn Menschen mit ihren jeweiligen subjektiven Überzeugungen zu einer einheitlichen Beschreibung der Natur kommen?

Niemand erfindet seine subjektiven Überzeugungen völlig willkürlich. Wir schätzen Wahrscheinlichkeiten, dass etwas geschieht, aufgrund unserer Erfahrungen und unseres Wissens ab. Jedes Buch und jede wissenschaftliche Veröffentlichung, die wir lesen, jeder Gedankenaustausch, jedes Experiment – das alles sind neue Erfahrungen, anhand derer wir Wahrscheinlichkeiten neu bestimmen und unsere Überzeugungen anpassen.

Außerdem hat die Quantenmechanik neben den subjektiven auch objektive Teile. In der Schrödinger-Gleichung, die das Verhalten von Quantensystemen beschreibt, haben die einzelnen Elemente wie die Wellenfunktion subjektiven Charakter. Die Beziehung, die die Formel zwischen ihnen herstellt, ist aber objektiv. Deshalb erlaubt die Gleichung eine Aussage über die Realität unabhängig von einem Handelnden. Die Quantenmechanik ist eine Art Gebrauchsanweisung, mit der wir unsere subjektiven Überzeugungen überprüfen können.

Kritiker werfen dem QBismus vor, in seiner Vorstellung gebe es keine objektive Realität, sondern die Welt existiere subjektiv nur in unseren Köpfen ...

Subjektiv ist so ein schreckenerregendes Wort. Unser Leben lang lernen wir, dass Wissenschaft nach Objektivität strebt, dass sie keine Frage der persönlichen Meinung ist. Deshalb empfinden die meisten QBismus als einen Schlag ins Gesicht einer majestätischen Theorie.

Natürlich existiert da draußen eine Realität. Wir alle sind eingebettet in die Welt und interagieren mit ihr. Wenn ich ein Teilchen vermesse, ist das doch kein interner Dialog, der nur in meinem Kopf abläuft.

Wie real ist denn ein Elektron?

Das Wort „Elektron“ repräsentiert etwas in der Welt, das von uns unabhängig ist. Ganz anders verhält es sich mit dem Spin des Elektrons. Außerhalb des experimentellen Zusammenhangs existiert er nicht. Man sollte den Spin nicht als eine Eigenschaft des Elektrons ansehen, sondern als etwas, das zwischen dem Handelnden und seiner Außenwelt geteilt ist. Der israelische Physiker Asher Peres drückte es so aus: Versuche, die nicht ausgeführt werden, haben auch kein Ergebnis.

Wenn wir das Elektron vermessen, dann wird etwas Neues im Universum kreiert, das es vorher nicht gegeben hat. Ort, Geschwindigkeit, Spin kommen durch die Interaktion zwischen dem Quantensystem und dem Handelnden in die Welt. Das ist ein kleiner Schöpfungsakt. Ich spreche daher von einem partizipatorischen Realismus. Das Universum ist nicht unbeeinflusst von unserer Präsenz. Wir spielen eine viel größere Rolle in der Welt als im klassischen Konzept der Wissenschaft, die uns lediglich als Beobachter sieht.

Für den QBismus gleicht die Quantenmechanik einem Pfadfinderhandbuch, das hilft, Entscheidungen zu treffen und sich in der Welt zurechtzufinden



Die Quantentheorie beschreibt die kleinsten Bausteine, auf denen alles aufbaut. Ist sie das Fundament unserer Welt?

Nein, sie ist keine Weltformel. Aus ihr lässt sich auch nicht die klassische Welt, wie wir sie erleben, ableiten. Die reduktionistische Idee, alles bestehe aus einem Stoff X und aus ihm ergebe sich alles, wirft man am besten über Bord. Ziel der Physik sollte vielmehr sein, gemeinsame Charakteristika möglichst vieler Phänomene zu finden. Zum Beispiel Kohlenstoff: Die alte Antwort wäre, er ist das Bauelement, das sich mit anderen Elementen entsprechend bestimmter Regeln verbindet. Die neue Antwort lautet: Kohlenstoff ist ein Charakteristikum von Diamanten, Bleistiftminen, DNA, verbrannten Pfannkuchen, dem Raum zwischen Sternen, den Emissionen eines Pick-ups.

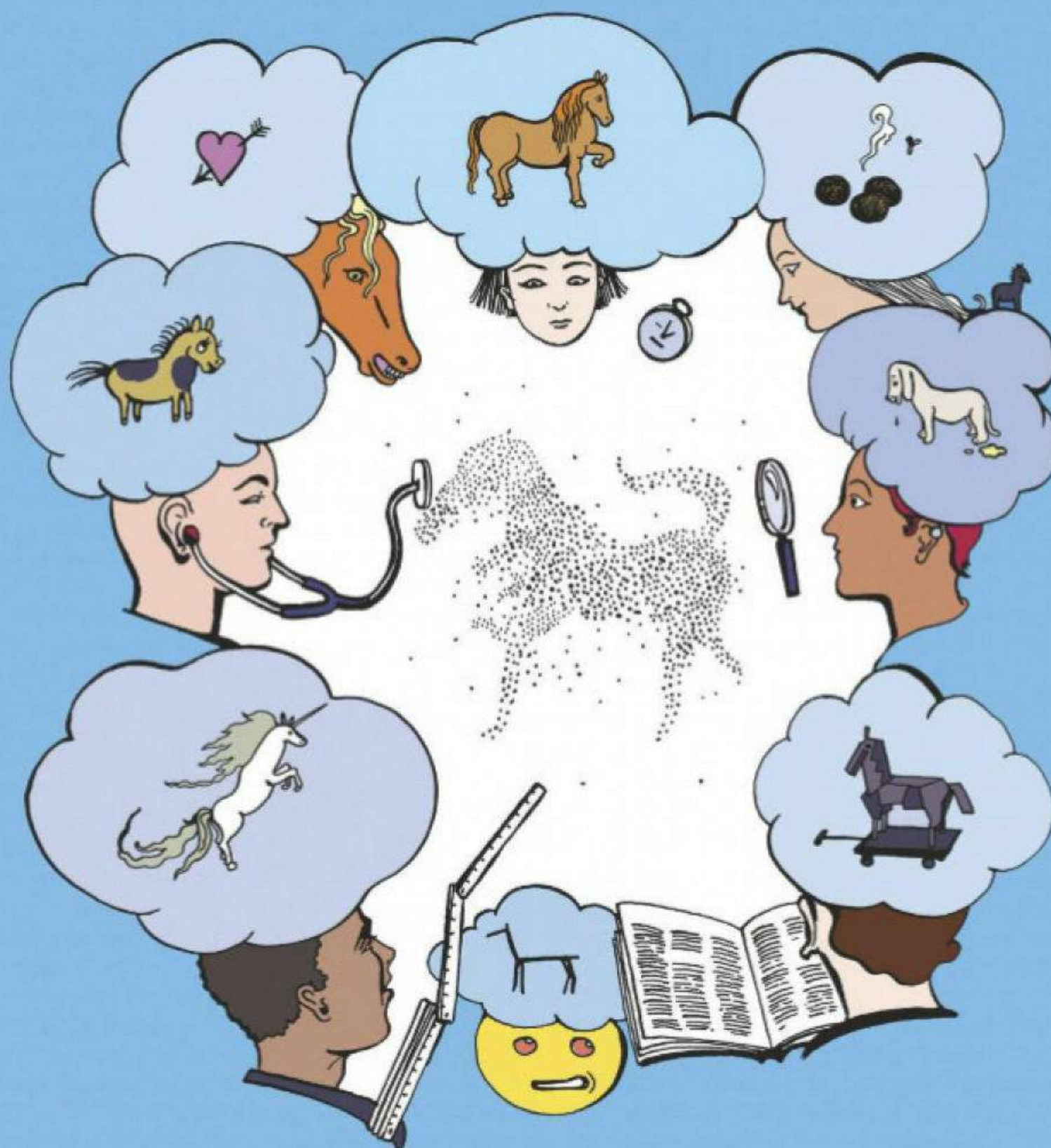
Angesichts der Bedeutung der Quantenmechanik für unsere technische Welt kommt mir der Ansatz bescheiden vor ...

Das heißt ja nicht, dass die Quantentheorie nicht durchaus grundlegend wäre. Ich vergleiche das gerne mit Newtons Gravitationstheorie. Denken Sie an den Apfel, der ihn zu seiner Formel inspiriert hat. Mit Entdeckung des Gravitationsgesetzes waren die Farbe, der Geschmack, die Textur des Apfels nicht verschwunden. Der Apfel war nach wie vor mindestens all das, was er auch schon vorher war, mit der neuen Theorie aber sogar noch mehr. Zum Beispiel wurde klar, dass er etwas mit dem Mond gemeinsam hatte.

Newton hat eine fundamentale Eigenschaft aller Dinge entdeckt, nämlich dass sich zwei Massen anziehen. Aber er hat keine Weltformel geliefert, wie sie die Stringtheoretiker entwickeln wollen. Die Gravitationstheorie erklärt uns nicht, warum sich Moleküle bilden, wir können mit ihr nicht ableiten, wie Bewusstsein entsteht. So ist es auch mit der Quantentheorie: Sie erschließt uns eine neue, sehr bedeutsame Eigenschaft der Welt. Sie fügt unserem Konzept von Materie neue Qualitäten hinzu. Und wir sind immer noch dabei herauszufinden, was diese neue Eigenschaften – nennen wir sie Quantendimensionen – genau sind.

Warum sollten Physiker sich Ihre Ideen zu eigen machen? Was hätten sie davon?

Sie vermeiden, sich mit einem scheinbar unendlichen Nachschub an Rätseln herumzuschlagen, die sich aus der Quantenmechanik ergeben. Nehmen Sie das Problem, mit dem Physiker seit Langem kämpfen: Warum sieht die Welt klassisch aus, wo sie doch eigentlich nach den Regeln der Quantenmechanik funktioniert? Es sei mysteriös, dass wir nie eine Überlagerung oder Verschränkung von Quantenzuständen sähen. In dieser traditionellen Sicht bildet die Quantentheorie die Grundlage aller Dinge, und die klassische Welt ist etwas, das sich aus ihr ergibt. Der QBismus



Aufgrund unserer Vorinformationen und Erfahrungen gewinnen wir laut QBismus ein persönlich geprägtes Bild der Welt

sagt: nein. Die Erfahrung der Welt ist weder klassisch noch quantisch. Die Quantenmechanik ermöglicht bei Experimenten neue Erfahrungen, die zu den alten klassischen hinzukommen, sie aber nicht ungültig machen.

Sie sehen sich in der Tradition von Niels Bohrs Denkschule, radikalisieren aber seine Ansätze. Was haben der Großmeister der Quantentheorie und seine Anhänger falsch gemacht?

Der Physiker E. T. Jaynes schrieb 1990, Heisenberg und Bohr hätten die subjektiven und objektiven Aspekte des Quantenformalismus zu einem Omelett verrührt, und keiner hätte sie mehr auseinanderhalten können. Heisenberg sprach manchmal über Quantenzustände, als wären sie subjektiv. Bei anderen Gelegenheiten behandelte er sie als objektive Gegebenheiten. Wolfgang Pauli verfuhr genauso. Sie waren inkonsequent. Für eine Veröffentlichung habe ich alle vier Bände mit Bohrs philosophischen Werken gelesen. Bei der Entwicklung des QBismus war er eine Inspiration. Aber so richtig durchdrungen habe ich nicht, was er sagen will •

Der Physiker **CHRISTOPHER FUCHS** forscht und lehrt an der University of Massachusetts in Boston. Er hat den Quanten-Bayesianismus mitentwickelt, abgekürzt QBismus (ausgesprochen wie Kubismus, die Stilrichtung der Malerei). Anders als viele Kollegen ist Fuchs überzeugt, dass Philosophie und Physik unbedingt zusammengehören.

Immer wieder spannende Grundlagen des Wissens erhalten

**1 Jahr GEO KOMPAKT für nur 44,– € lesen oder
verschenken und Wunsch-Prämie sichern!**

**Prämie
zur Wahl!**



GEO KOMPAKT-Bestseller

- Zwei besonders beliebte Ausgaben
- „Das geheime Leben der Pflanzen“
- „Unser Wald“

Ohne Zuzahlung



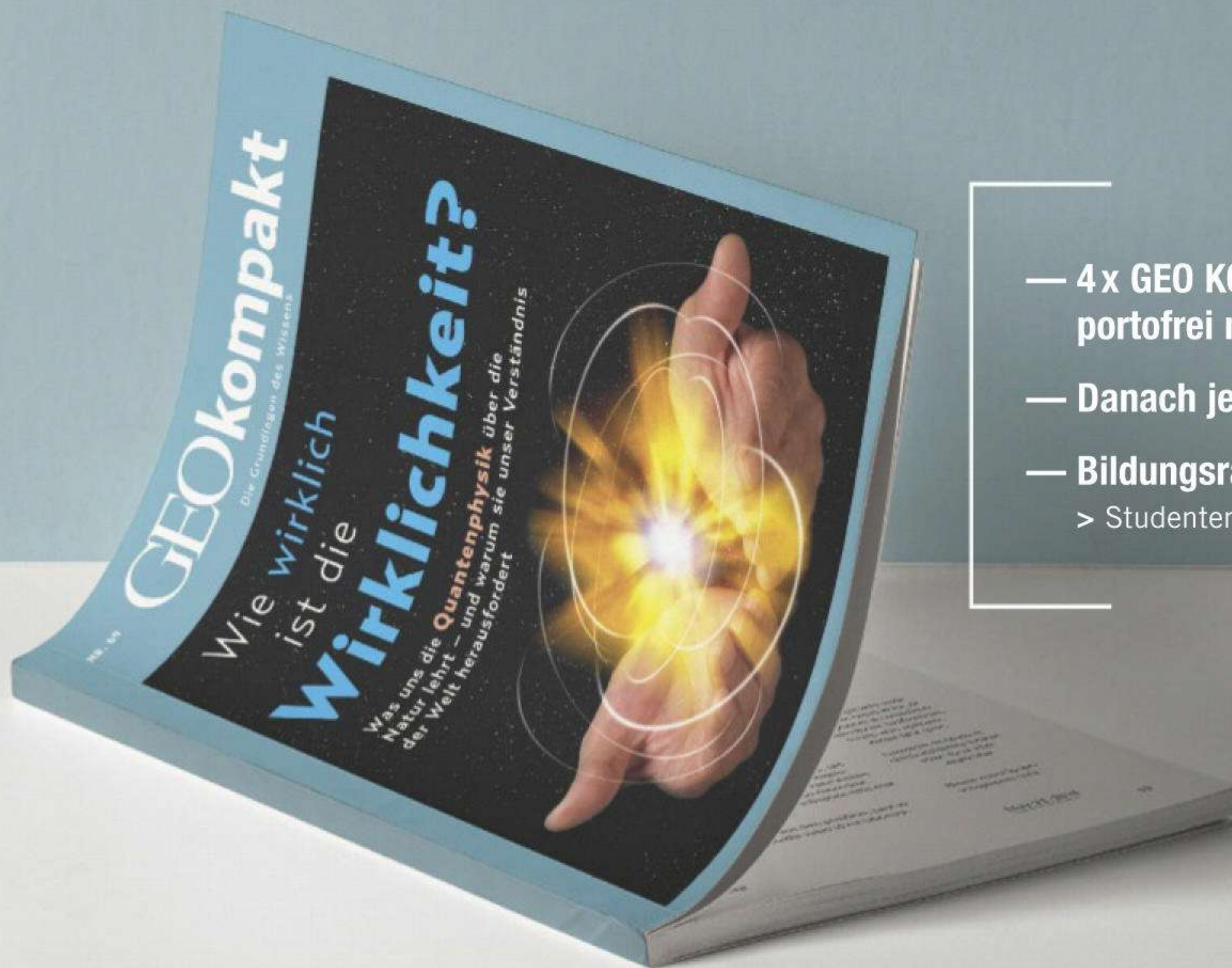
Amazon.de-Gutschein, Wert: 10,– €

- Gutschein für die nächste Online-Shopping-Tour
- Riesige Auswahl, täglich neue Angebote
- Technik, Bücher, DVDs, CDs u. v. m.

Ohne Zuzahlung

Gleich Prämie wählen und bestellen:

4 Ausgaben GEO KOMPAKT für zzt. nur 44,– € (inkl. MwSt. und Versand) – ggf. zzgl. 1,– € Zuzahlung. Es besteht ein 14-tägiges Widerrufsrecht. Zahlungsziel: 14 Tage nach Rechnungserhalt. Anbieter des Abonnements ist Gruner + Jahr GmbH. Belieferung, Betreuung und Abrechnung erfolgen durch DPV Deutscher Pressevertrieb GmbH als leistenden Unternehmer.



- 4 x GEO KOMPAKT portofrei nach Hause
- Danach jederzeit kündbar
- **Bildungsrabatt**
 > Studenten sparen 40 %



SONY Kopfhörer

- Faltbarer Kopfhörer in attraktivem Design
- Mit dynamischen 30 mm-Treibern
- Gepolsterte Ohrmuscheln für mehr Komfort

Zuzahlung: 1,-€



GEO-Baumspende

GEO pflanzt für Sie im Rahmen des Projektes „GEO schützt den Regenwald e.V.“ einen Baum in Sunaulo Bazaar/Nepal.
 Mehr dazu unter: www.regenwald.de

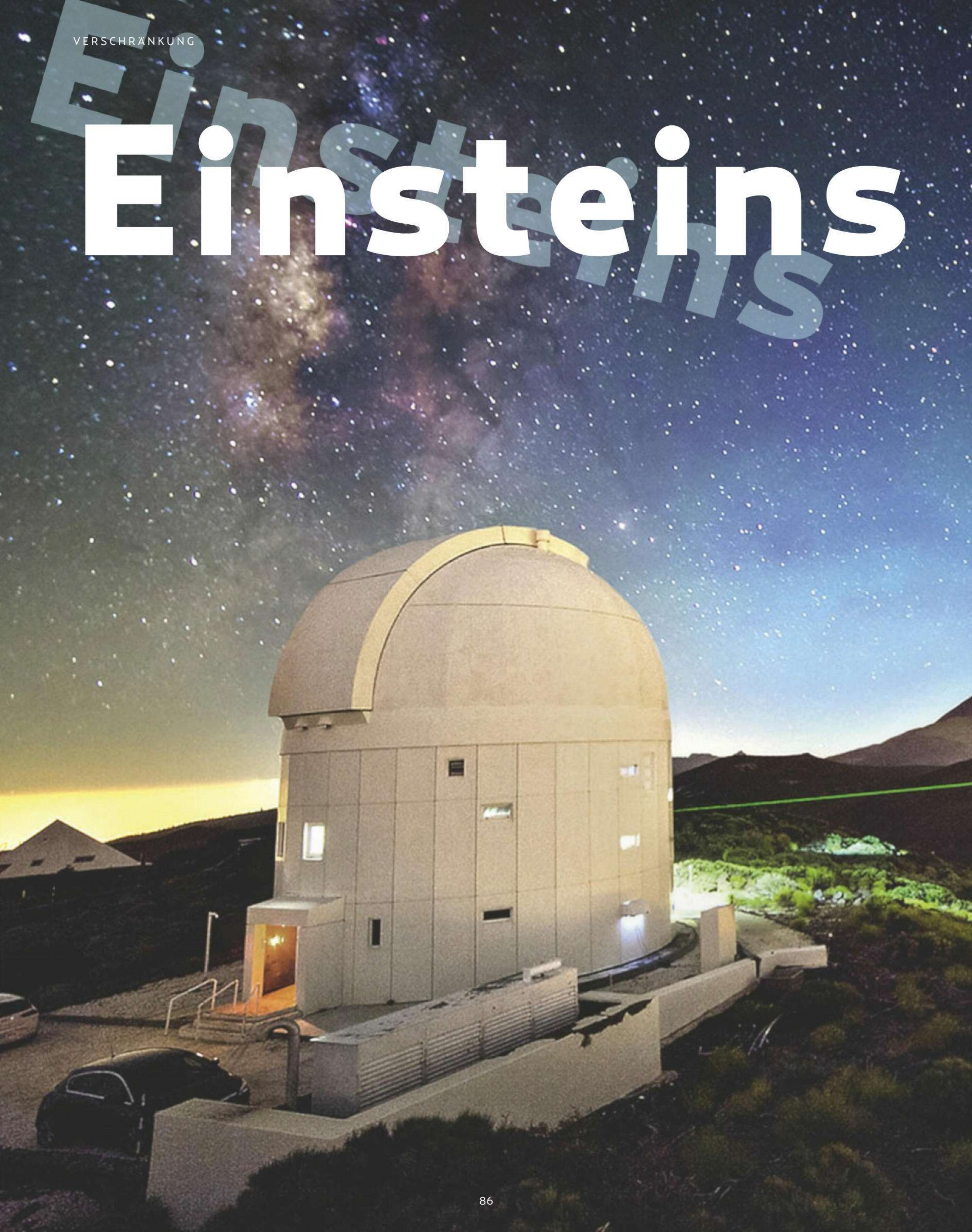
Ohne Zuzahlung

www.geo-kompakt.de/abo

+ 49 (0) 40 / 55 55 89 90

VERSCHRÄNKUNG

Einsteins



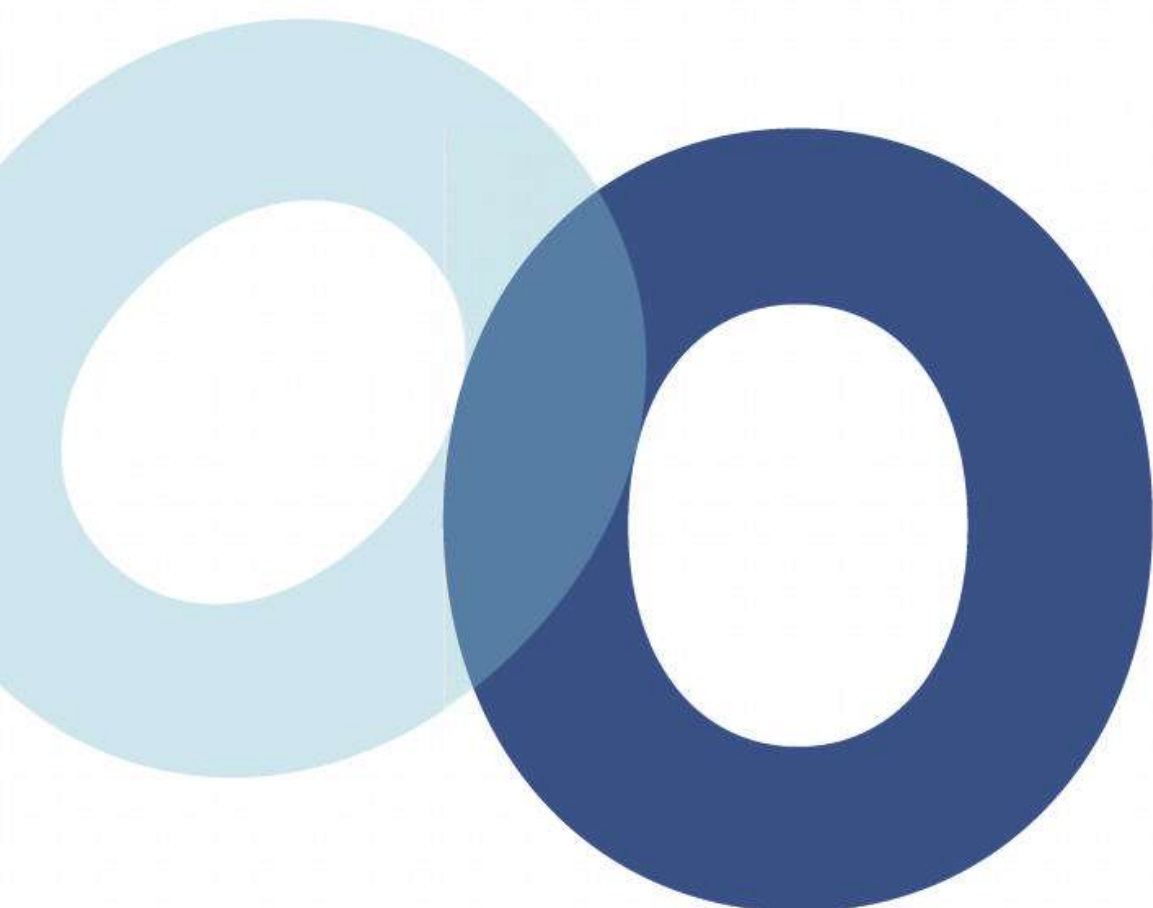
Spuk

Manche Teilchen sind über astronomische Entfernungen hinweg wie durch ein unsichtbares Band verknüpft. Mit diesem verrückten Effekt der Quantenwelt mochte sich Albert Einstein nicht abfinden. Experimente haben aber inzwischen gezeigt: Der große Physiker irrte

Text: Klaus Bachmann

Fotos: Lois Lammerhuber

Auf dem Weg zum Quanteninternet: Ein Team um den Wiener Physiker Anton Zeilinger kann mittels verschränkter Lichtteilchen Informationen zwischen den Inseln La Palma und Teneriffa übertragen. Der grüne Laserstrahl dient dabei der Ausrichtung von Sender und Empfänger. Die verschränkten Photonen selbst sind unsichtbar, da ihre Energie im Infrarotbereich liegt



Oben ist es still geworden im Herzen Wiens: Die prunkvollen Gemächer der Kaiserin Sisi liegen im Dunkeln, die Schlangen vor der Hofreitschule sind verschwunden.

Unten, im zweiten Kellergeschoss der Wiener Hofburg, ist Marissa Giustina – schwarze, kurze Locken, athletisch, 25 Jahre alt – in dieser Nacht im September 2015 drauf und dran, Albert Einstein zu widerlegen.

Unspektakulär sieht das Experiment aus, das sie in einem der hohen, labyrinthischen Gänge zehn Meter unter dem Heldenplatz aufgebaut hat: Blauviolett glimmt in einer abgedunkelten Kabine ein Laser, ein Kristall erzeugt Zwillinge von Lichtteilchen, getrennt flitzen sie zu zwei Detek-

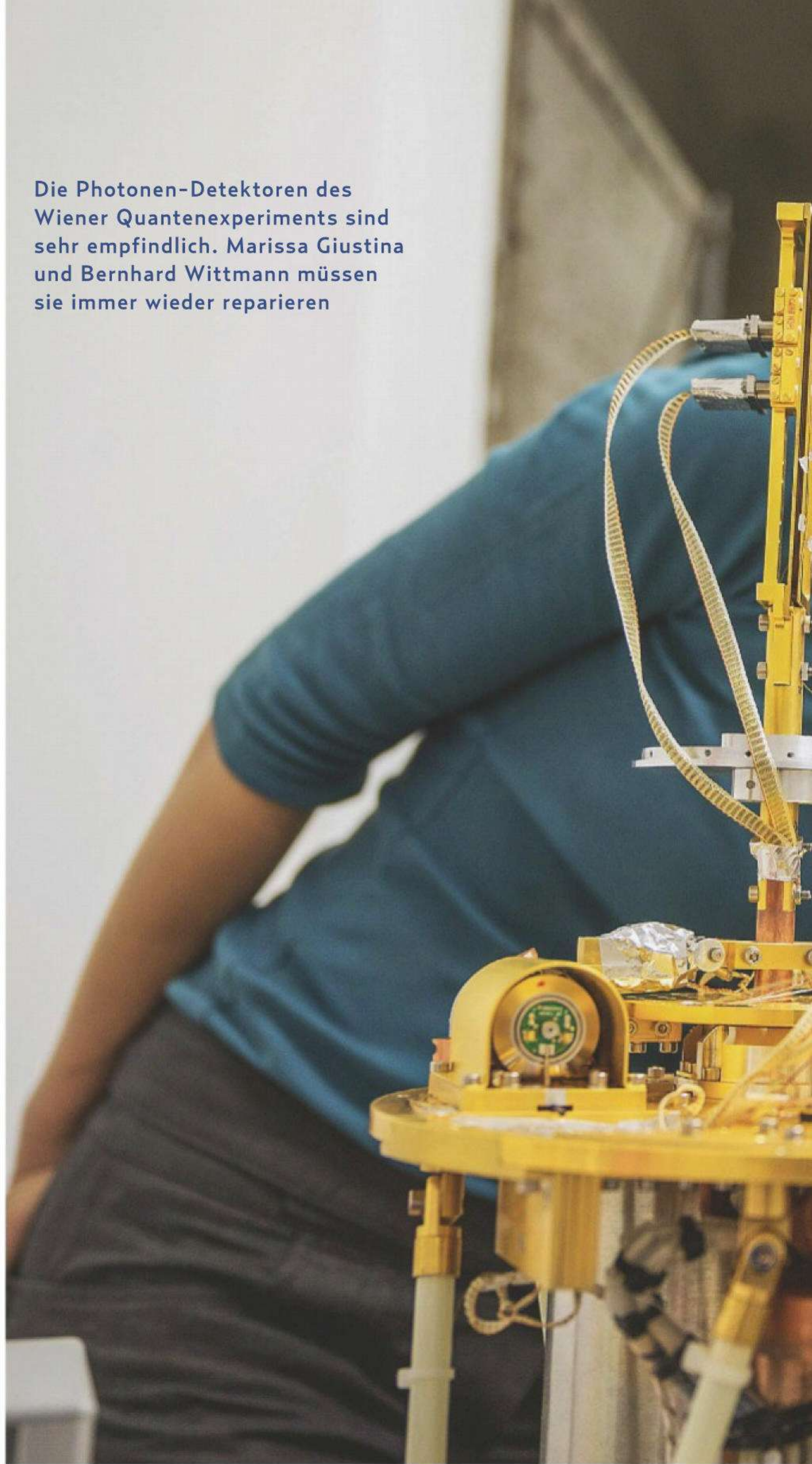
Irgendetwas entgehe den Physikern bei der Betrachtung der Quantenwelt, war Albert Einstein fest überzeugt

toren an den entgegengesetzten Enden des Ganges. Still ist es, bis auf das Keuchen der Ventile, durch die Kühlmittel in die Detektoren strömt.

In ihrem Inneren geschieht Verrücktes: Wird die Eigenschaft eines der beiden Teilchen – in diesem Fall seine Schwingungsrichtung – gemessen, dann ist augenblicklich klar, welchen Wert die Vermessung des Zwillingspartikels am anderen Ende des Korridors ergibt. Obwohl bei dieser zweiten Messung wie in der Quantenphysik üblich eigentlich der Zufall walten sollte. Es scheint, als wären die beiden Partikel durch ein unsichtbares Band verknüpft.

„Spukhafte Fernwirkung“ nannte Albert Einstein diese Merkwürdigkeit der Quanten, die von der damals neuen

Die Photonen-Detektoren des Wiener Quantenexperiments sind sehr empfindlich. Marissa Giustina und Bernhard Wittmann müssen sie immer wieder reparieren



Theorie vorhergesagt wurde. Und er mochte den Effekt nicht akzeptieren.

Irgendetwas, war er überzeugt, entgehe den Physikern. Es müsse da noch etwas geben, das unterhalb der von uns wahrnehmbaren Realität ablaufe, verborgen vor unseren Nachforschungen. Etwas, das den Spuk erklären könne.

Und sagt das nicht auch der gesunde Menschenverstand: Wie können zwei Teilchen sich beeinflussen,

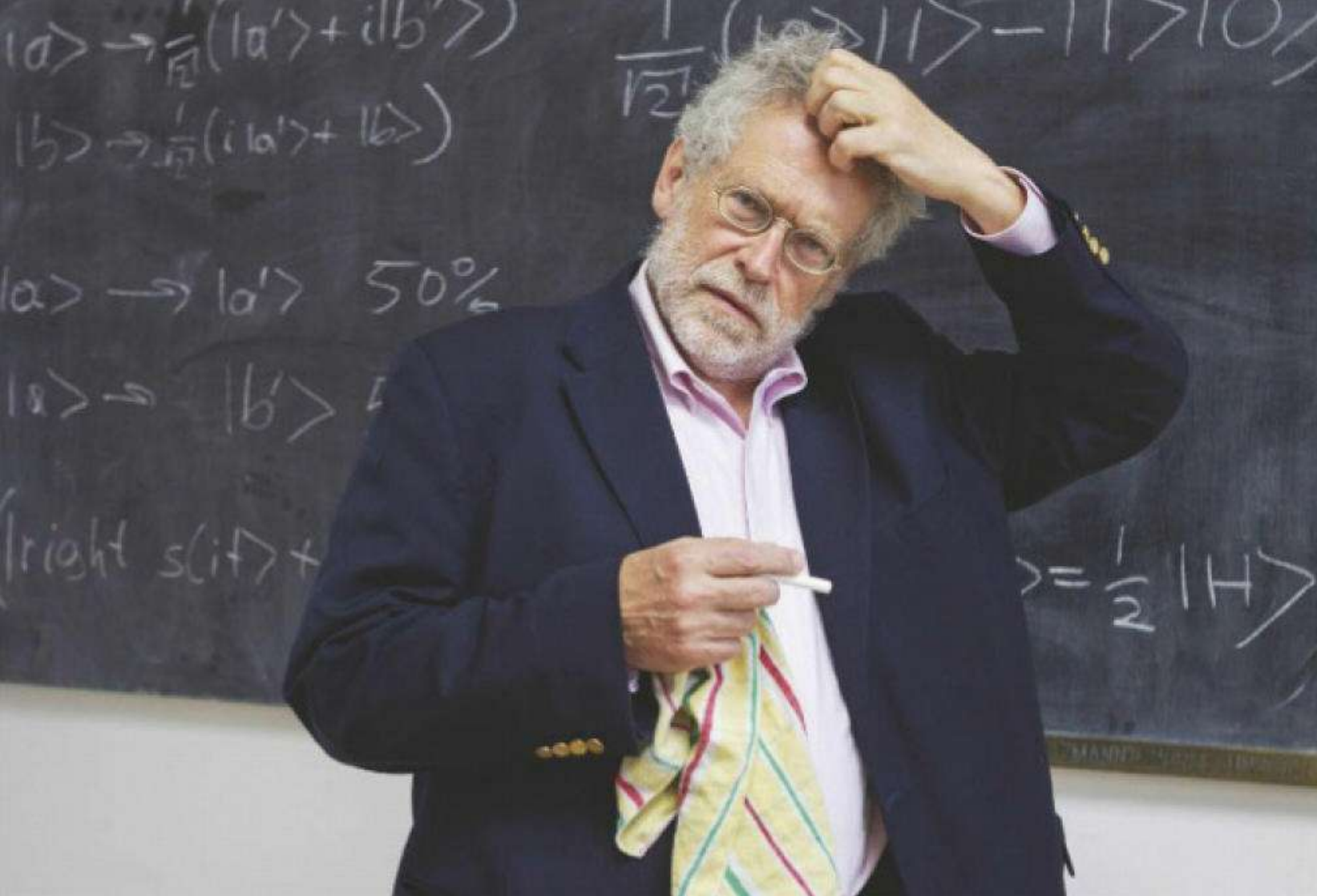


wenn sie definitiv zu weit voneinander entfernt sind, um augenblicklich Botschaften auszutauschen? Wie soll das gehen?

Dass diese Verrücktheit Tatsache ist und es keine Schlupflöcher für andere Erklärungen gibt – das wollen Marissa Giustina und das übrige Team am Wiener Institut für Quantenoptik und Quanteninformation beweisen. Und damit zeigen, dass Albert Einstein sich täuschte.

Seit dem frühen Abend haben Giustina und zwei Kollegen Daten gesammelt. Die beiden Physiker sind irgendwann übermüdet nach Hause gegangen. Nun sitzt die junge Frau alleine in dem kahlen Gang zwischen Backsteinwänden und genießt den Moment. Sie ahnt bereits, dass es ein Moment des Triumphs ist.

Denn als das Team die Daten später auswertet, offenbart sich in der Tat: Die Quantenwelt ist wirklich so verrückt.



Albert Einstein in all seinem verständlichen Zweifel – er lag falsch. Der Chef des Teams, Anton Zeilinger, ein Großmeister der Quantenexperimente, ist überzeugt: „Dieser Versuch wird in die Geschichtsbücher eingehen.“

Der Erfolg ist indes etwas getrübt. Denn im Wettlauf um diesen Nachweis wurde Zeilingers Gruppe knapp geschlagen. Wenige Wochen vorher hatte bereits ein Team der Universität Delft Einsteins Irrtum mit einem ähnlichen Versuch belegt.

Zeitgleich mit den Wienern verkündeten Wissenschaftler und Wissenschaftlerinnen des US-amerikanischen National Institute of Standards and Technology Gleiches. Beide Gruppen arbeiteten sogar eng zusammen.

Sie teilen sich nun den Ruhm, der an diesem Test hängt. Ruhm, der in der naturphilosophischen Bedeutung des Experiments gründet. Es zwingt uns, tiefe Vorstellungen unserer Welt zu überdenken: Was ist real? Stimmt unser Konzept von Raum und Zeit? Von Ursache und Wirkung?

Denn wer die Welt des Allerkleinsten betritt, gelangt in ein Wunderland, in dem noch ganz andere verstörende Dinge geschehen; Dinge, die unseren Verstand herausfordern, die Alltagserfahrung und Intuition komplett zuwiderlaufen.

Da ist zum Beispiel das Doppelspalt-Experiment, über dessen merkwürdige Befunde Niels Bohr und Albert Einstein heftig aneinandergerieten: Man nehme eine Elektronenquelle und einen Detektor, der die Teilchen auf seinem Schirm sichtbar werden lässt, wo auch immer sie auftreffen. Dazwischen stelle man eine Wand mit zwei Spalten.

Auf dem Detektorschirm entsteht dann ein überraschendes Muster: Nicht zwei einzelne Streifen scheinen auf, weil manche Elektronen links und manche rechts durchschlüpfen, so wie man das erwarten würde. Nein: Eine ganze Reihe von Streifen entsteht, deren intensivster, ausgerechnet, genau in der Mitte liegt.

Dieses Bild lässt sich erklären, indem man das Elektron als Welle interpretiert. Nicht als winzige Materieportion, die

Die »spukhafte Fernwirkung« von Photonen ist eine der Sonderlichkeiten der Quantenwelt, die den Wiener Physiker Anton Zeilinger seit Jahrzehnten umtreiben

geradewegs durch den Raum rast, sondern als gestaltloses Phänomen, das wie eine Wasserwelle auf- und abschwingt.

Das Elektron breitet sich hinter dem Doppelspalt in Form zweier Wellen aus, je eine Welle hinter einem Spalt. Bei der Überlagerung treffen an bestimmten Stellen Wellenberge aufeinander und addieren sich, an anderen Stellen heben Wellenberg und -tal sich gerade auf. Heraus kommt das charakteristische Streifenmuster.

Allerdings zeigt sich ein Elektron unbestreitbar auch als Partikel. Keinen anderen Schluss lässt die Beobachtung zu, dass immer wieder Punkte auf dem Detektorschirm aufblitzen – jedes einzelne Mal, wenn ein Elektron aufschlägt.

Welle? Oder Teilchen? Dieser Dualismus, in dem zwei eigentlich unvereinbare Eigenschaften in ein und demselben Phänomen gemeinsam zutage treten, ist ein Grundrätsel der Quantenmechanik.

Und dann sitzt da einer wie Anton Zeilinger, graue Mähne, grauer Bart, Typus Brummbar und sagt in breitem Wienerisch: „Im Reich der Quanten funktioniert unser realistisches Weltbild nicht mehr.“

Was meint er mit realistisch?

„Wenn wir die Welt um uns beobachten, so sprechen wir von Gegenständen, von Objekten, deren Existenz nicht infrage gestellt wird und die einfach existieren – ganz unabhängig davon, ob wir sie gerade beobachten oder nicht.“

Die Welt ist die Bühne, und wir sind die Zuschauer.

In der Quantenwelt aber, sagt Zeilinger, ist das ganz anders. Dort wird etwas in bestimmten Fällen erst dann wirklich, wenn ich hinsehe. Vorher hat es nicht existiert – zumindest nicht in der Form, die sich uns zeigt. Seine Eigenschaften hängen davon ab, wie ich hinsehe, welche Frage ich an das Quantenobjekt richte. Wird ein einzelnes Teilchen gefragt: Wo bist du?, gibt es eine Position preis. Das heißt aber nicht, betont Zeilinger, dass das Teilchen auch vorher an diesem Ort war. Es hatte vielmehr die Möglichkeit, an vielen Orten zu sein. Es ist ein bisschen hier und ein bisschen dort. Erst durch das Experiment, durch unser Hinschauen, wird das Teilchen gezwungen, eine Position einzunehmen. Der unbestimmte Quantenzustand schrumpft dann auf eine einzige Antwort.

Die Messung an einem verschränkten Teilchen beeinflusst unweigerlich und zeitgleich das Partnerpartikel

Zeilinger steht damit in der Tradition der **Kopenhagener Deutung**, die auf Niels Bohr und Werner Heisenberg zurückgeht.

Mit der Unbestimmtheit und Zufälligkeit der Mikrowelt wollte Albert Einstein sich nicht abfinden. Vor allem aber störte er sich daran, dass die Quantenmechanik das Prinzip der **Lokalität** aufgab. Ein Prinzip, das tief in unserer Intuition verankert ist: Ein Objekt kann ein anderes nur beeinflussen, wenn die beiden sich in räumlicher Nähe befinden. Um einen Fußball ins Tor zu befördern, muss ich gegen ihn treten. Wenn Ereignisse über größere Entfernungen aufeinander wirken, gibt es ein vermittelndes Medium: Beim Telefonieren übertragen elektromagnetische Wellen die Sprache. Jede Wirkung hat eine lokale Ursache.

Anders in der Welt der Quanten: Wechselwirken zwei Teilchen, etwa indem sie zusammenstoßen, entsteht zwischen ihnen anscheinend ein Band – sie sind „verschränkt“, sagen Physiker. Die Mes-

sung an einem Partikel beeinflusst unweigerlich und instantan – zeitgleich – das Zwillingsteilchen. Und das funktioniert, sogar wenn die Teilchen so weit voneinander entfernt sind, dass Signale zwischen ihnen selbst bei Lichtgeschwindigkeit Jahre unterwegs wären. Ursache und Effekt sind nicht mehr durch eine lokale Wechselwirkung gekoppelt.

1935 attackierte Einstein gemeinsam mit zwei Kollegen die Ideen der Quantenverfechter in einer historischen Arbeit. Anhand eines Gedankenexperiments – berühmt als **Einstein-Podolsky-Rosen-(EPR)-Paradoxon** – kamen die drei zu dem Schluss, dass es „verborgene Parameter“ geben müsse, aufgrund derer das Lokalitäts-Prinzip erhalten bleibe. Dass Teilchen also über zusätzliche Eigenschaften verfügten, die wir nicht kannten und nicht messen könnten, die aber schon von vornherein feststünden. Als gäbe es eine geheime Absprache der Teilchen.

So wäre eine objektive, lokale Wirklichkeit gerettet, die unabhängig von der

Skeptisch begutachtet
Anton Zeilinger die Signale eines
Zufallsgenerators. Auf ihrer Basis
werden die Photonen vermessen –
dies verhindert, dass menschliche
Faktoren den Versuch beeinflussen







In einem langen Gang unter der Wiener Hofburg haben Marissa Giustina und Kollegen ihr Quantenexperiment aufgebaut. In der abgedunkelten Kabine entstehen die verschränkten Lichtteilchen, die dann über Glasfasern zu den beiden Detektoren »Alice« und »Bob« an den entgegengesetzten Enden des Flurs fliegen

Beobachtung eines Menschen existiere. Und am Ende gälte in der Welt die Regel von Ursache und Wirkung. Ganz klassisch eben.

Niels Bohr antwortete etwas nebulös auf die Einwände von Einstein und Kollegen, trotzdem arrangierten sich die meisten Fachleute mit seiner Erklärung. Fast 30 Jahre dauerte es, bis sich mit John Bell ein Physiker wieder ernsthaft

Dem Physiker John Bell, einem Anhänger Einsteins, ließen die Widersprüche in der Deutung der Quantentheorie keine Ruhe

mit dem Einstein-Podolsky-Rosen-Paradoxon auseinander setzte. Der nordirische Physiker arbeitete am europäischen Forschungszentrum Cern bei Genf, Fundamentalfragen der Quantenmechanik waren sein Hobby, wie er selbst sagte.

Der 1990 verstorbene Bell fühlte sich als Anhänger Albert Einsteins. Wie der sah er die auf Niels Bohr und Werner Heisenberg zurückgehende Kopenhagener Deutung der Quantentheorie nicht als das letzte Wort an. Deren Widersprüche ließen ihm keine Ruhe. Um Einsteins Sicht der Dinge zu unterstützen, analysierte er in den 1960er Jahren das Verhalten verschränkter Teilchen: Lassen sich die Ergebnisse der Quantenmechanik mithilfe einer Theorie erklären, die lokale Wechselwirkungen annimmt?, fragte er. Bell entwickelte eine Formel, mit der sich zwischen Einsteins Sicht und dem nichtlokalen Quantenspuk unterscheiden lässt. Alles, was es für eine Entscheidung brauchte, waren experimentelle Daten.

In den 1970er Jahren begannen Wissenschaftler und Wissenschaftlerinnen die Bell-Gleichung (genau genommen ist es eine Ungleichung in der Art von $a < b$) mit immer raffinierteren Versuchsanordnungen auf die Probe zu stellen. Stets fiel das Urteil zu Ungunsten des Trios Einstein-Podolsky-Rosen aus, stets bestätigten sich bei den Tests die skurrilen Quanteneigenschaften und die Nicht-Lokalität der Welt.

Und doch führten skeptische Stimmen immer wieder an, vielleicht gebe es ein Schlupfloch, durch das die „verborgenen Parameter“ sich hätten einschleichen können, die sich Einstein so sehr wünschte.

Was Anton Zeilinger, Marissa Giustina und Kollegen leisteten, war nichts Geringeres als dies: Sie schlossen

zentrale Beweislücken, entschieden die Frage mit bis dahin ungekannter Sicherheit. Die Quanten sind tatsächlich so seltsam. Und Einstein ist, in dieser Frage, widerlegt.

So schwer es uns zu akzeptieren fällt: Wir leben in einem nicht-lokalen Universum. Der Quantenspuk ist Realität. Es ist eine Ironie der Wissenschaftsgeschichte: Bell wollte eigentlich zeigen, dass Einstein recht hatte. Am Ende bewirkte er das Gegenteil.

Was das Team um Marissa Giustina für sein Experiment braucht, sind Paare von Lichtteilchen, die auf eigenartige Weise miteinander verbunden, „verschränkt“ sind. Und eine Umgebung, in der die Temperatur einigermaßen konstant bleibt und die weitgehend erschütterungsfrei ist. Deshalb steht der Versuch in dem Kellergang unter der Hofburg.

Die Lichtteilchenpaare kreiern das Team in einer mit schwarzem Tuch abgehängten Kabine. Die Elektronik heizt dem schmalen Raum kräftig ein, zwischen Wand und Experimentiertischen ist gerade

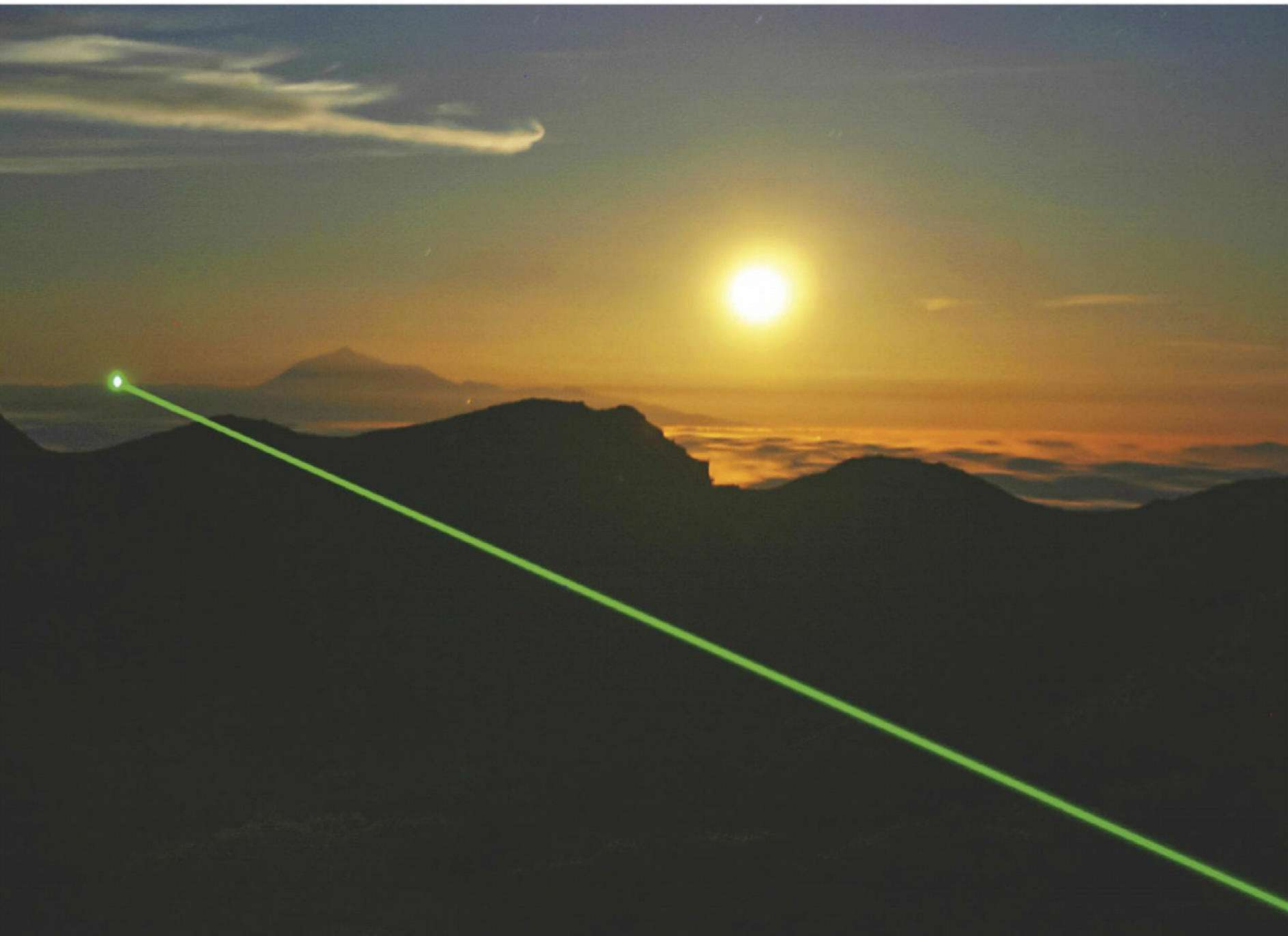
Quantenzustände über 143 Kilometer durch die turbulente Atmosphäre zwischen La Palma und Teneriffa zu übertragen ist eine extreme Herausforderung

noch Platz für eine Person, überall liegen Werkzeuge und optische Bauteile. In der Ecke leuchtet blauviolett das Herz des Versuchs: ein zentimetergroßer Kristallkubus, mit dessen Hilfe Photonenzwillinge entstehen, deren Polarisation, also Schwingungsrichtung, miteinander verschränkt ist. Und zwar stehen die Polarisierungen in diesem Fall senkrecht zueinander. Die Lichtgeschwister werden dann getrennt und verschwinden in gelb ummantelten Glasfasern – zu „Alice“ und „Bob“, den Messstationen, am jeweils entgegengesetzten Ende des Flurs.

Und worin besteht nun der Clou?

Wenn zwei verschränkte Photonen losfliegen, haben sie noch keine festgelegte Schwingungsrichtung. Klar ist nur, ihre Schwingungsrichtungen stehen senkrecht zueinander. Kurz vor dem Detektor stellen Giustina und Kollegen den Photonen mithilfe eines Filters dann quasi die Frage: In welcher Richtung schwingst du?

Die Stellung des Filters variiert auf beiden Seiten unabhängig voneinander





nach dem reinen Zufallsprinzip – wichtig für die Aussagekraft des Experiments. Millionen Photonen flitzen durch den Versuchsaufbau. Und das Verrückte ist: Bei der Messung an einem Zwilling photon ist augenblicklich auch die Schwingungsrichtung des Geschwister teilchens festgelegt. Registriert Alice ein horizontal schwingendes Photon, misst Bob mit Sicherheit ein vertikal schwingendes.

Wie kann das sein?

Wie kann die Messung an einem Ort die Eigenschaft eines Teilchens festlegen, das sich an einem ganz anderen Ort weit entfernt befindet? Gerade so, als zeigten zwei separate Würfel bei jedem Wurf zufällig, aber zuverlässig dieselbe Augenzahl.

Dass die Teilchen irgendwie miteinander kommunizieren, haben Marissa Giustina und ihre Kollegen ausgeschlossen, indem sie die Detektoren weit genug auseinander aufgestellt haben. Wollten die Teilchen Informationen austauschen, dann müsste das schneller als mit Lichtgeschwindigkeit geschehen. Und das ist unmöglich, die Lichtgeschwindigkeit ist und bleibt das absolute Tempolimit im Universum.

Es bleibt nur eine Erklärung: Die Quantenwelt ist bizarr, sie widerspricht dem, was Physiker und Physikerinnen „lokalen Realismus“ nennen und was Einstein vehement verteidigt hat.

Bei ihrem Projekt hatten Marissa Giustina und ihre Kollegen beträchtliche Hürden zu überwinden. „Wir hatten nur eine Handvoll Komponenten bei dem Experiment“, sagt sie, „aber alle mussten zur gleichen Zeit perfekt funktionieren.“ Die Spiegel und Prismen mussten perfekt justiert sein,

Bevor es auf die Kanaren flog, baute das Forschungsteam zum Test das Übertragungsexperiment mit verschränkten Photonen komplett in Wien auf

die Detektoren mussten zuverlässig ihre Temperatur nur ein Zehntelgrad über dem absoluten Nullpunkt halten. Die winzigste Unstimmigkeit – und der Beweis wäre wertlos gewesen.

Immer wieder hakte es. Im Oktober 2014 bauten sie die Lichtquelle komplett auseinander und stellten sie neu zusammen. Im Dezember bemerkten sie, dass der Staub aus dem alten Gemäuer den Versuch störte. Sie verlegten Gummimatten in den Laborräumen und betraten diese nur noch auf Strümpfen. Und zwei Wochen vor der entscheidenden Messung fielen alle Computer aus. Die hohen Temperaturen, die im Sommer sogar in den Kellerräumen herrschten, hatten ihnen zugesetzt.

Am Ende meisterte das Team alle Hindernisse.

Um Einwände zu kontern, die Einstellungen der Teilchenfilter seien nicht völlig zufällig, sondern in irgendeiner Weise menschlich beeinflusst, verschärfte ein internationales Team, dem auch Wiener Forscher angehörten, 2018 den Test: Es zapfte kosmische Signale an – im Observatorium

Roque de los Muchachos auf der Kanareninsel La Palma. Mit zwei Teleskopen fingen die Wissenschaftler*innen das Licht von Quasaren ein, sehr hellen Galaxien-Kernen, das vor Milliarden Jahren von dort gestartet war – zu einer Zeit, als die Erde und damit auch *Homo sapiens* noch nicht existierten. So konnten sie jeden menschlichen Einfluss ausschließen.

Die Farben dieser uralten Strahlung nutzte das Team, um die Filter für die verschränkten Photonen einzustellen. Auch das kosmische Bell-Experiment bestätigte die Spukhaftigkeit der Quantenwelt.

Deren Merkwürdigkeiten sind heutzutage unter Physikern und Physikerinnen unbestritten. Allerdings folgen nicht alle Niels Bohr, nach dessen Ideen Objekte unserer Welt keine definierten Eigenschaften wie Ort und Geschwindigkeit haben, solange sie nicht gemessen werden. Auch John Bell mochte diese Vorstellung nicht. Er favorisierte die vom US-amerikanischen Physiker David Bohm in den 1950er Jahren entwickelte Theorie der Führungswellen.

In der **Bohm'schen Mechanik**, wie das Konzept auch heißt, haben Teilchen zu jeder Zeit Ort und Geschwindigkeit und bewegen sich auf definierten Bahnen. Diese Bahnen werden vorgegeben von Führungswellen oder, wie es auch heißt, von Wellenfunktionen, auf denen die Partikel reiten wie Surfer auf einer Meereswelle. In dieser Theorie ist das Lokalitäts-Prinzip ebenfalls aufgehoben: Verschränkte Teilchen beeinflussen sich spukhaft.

Aber auch das Bohm'sche Konstrukt löste für John Bell nicht alle Widersprüche der Quantentheorie. Die war für ihn nur ein vorübergehender Behelf.

Das sehen viele Köpfe in der Forschung ähnlich. „Was uns fehlt“, sagt Anton Zeilinger, „ist ein Immanuel Kant der modernen Physik.“ Einer, der die Genialität hätte, alles zusammenzudenken und eine grundlegend neue Perspektive zu eröffnen auf die Welt, in der wir leben •

Am **Puls** des

Eigentlich gelten Quanteneffekte als zu flüchtig, um in lebenden Zellen Hinweise, dass das eigentümliche Verhalten der kleinsten Teilchen auch



Stets auf Kurs

Wenn Vögel wie diese Schneegänse über den Winter weit nach Süden ziehen, könnten Quantenphänomene ihnen helfen, sich zu orientieren

Texte: Lara Hartung

Lebens

aufzutreten. Doch seit einigen Jahren finden sich die Biologie prägt

Auf schnellstem Weg durchs Blatt

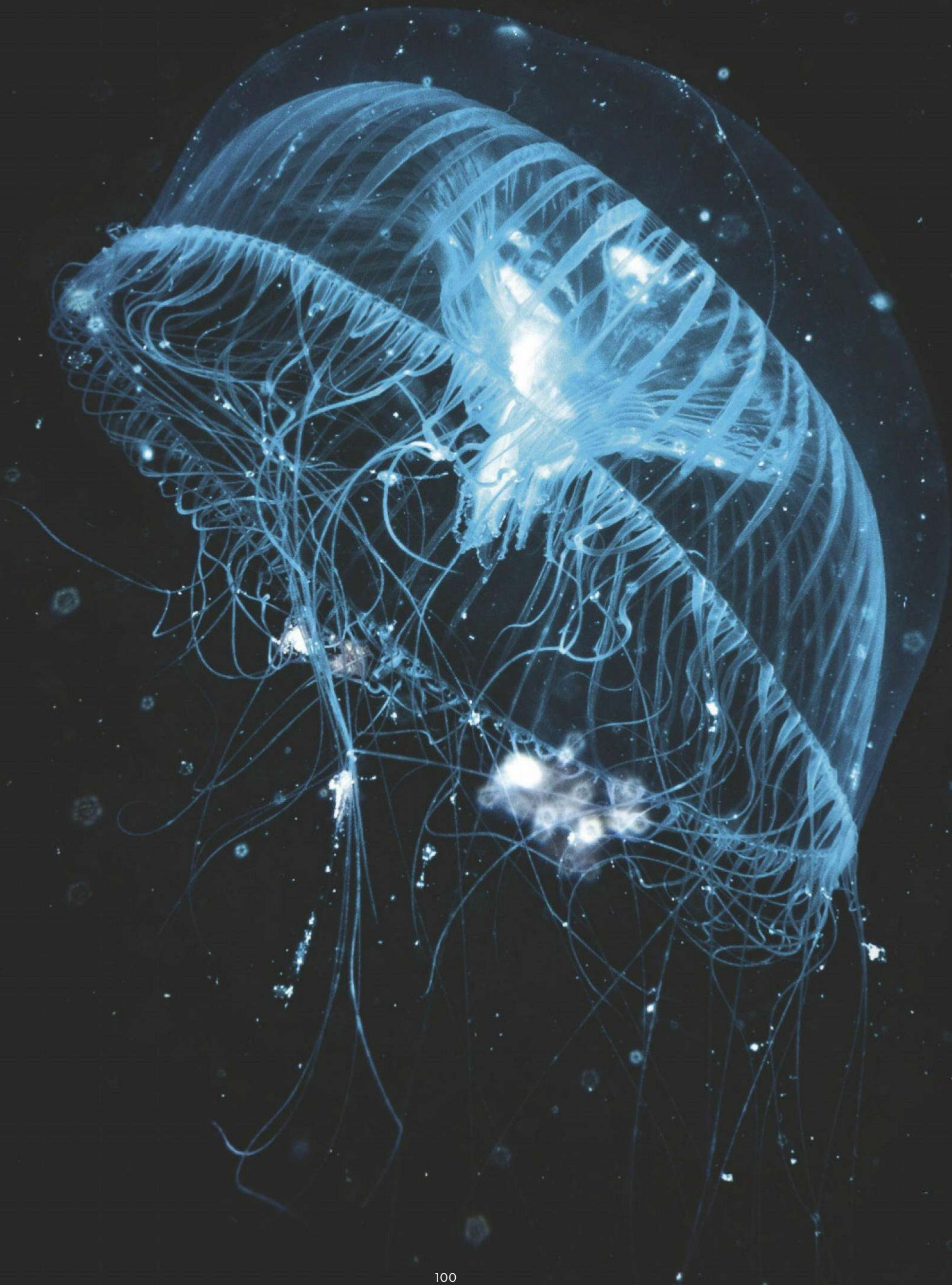
Quantische Objekte »reisen« anders als klassische – womöglich hilft das bei der Fotosynthese

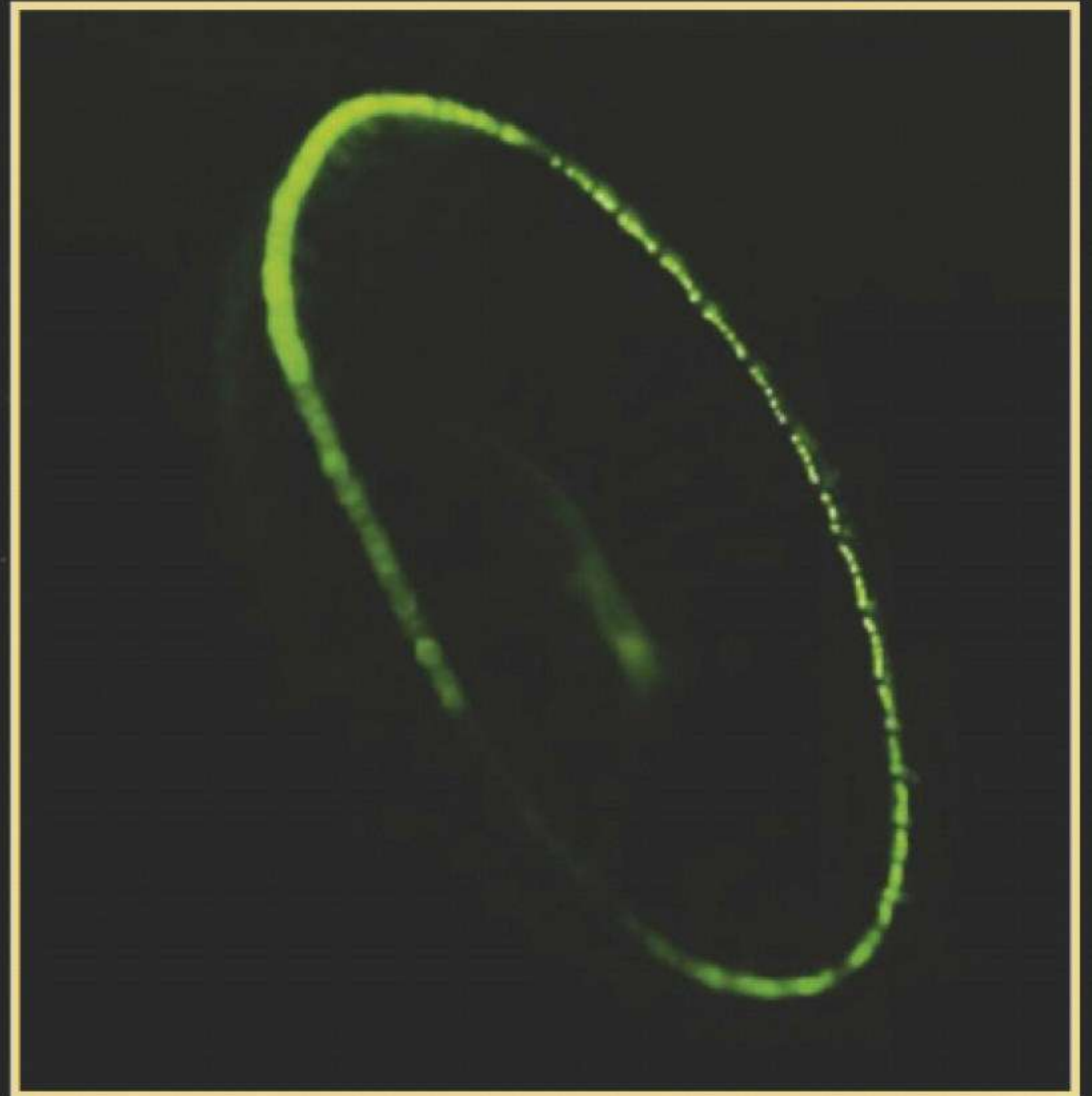
Wenn Sonnenlicht ins Kronendach eines Waldes fällt, setzt es den Prozess in Gang, der erst höheres Leben auf der Erde ermöglicht hat: die Fotosynthese. Pflanzen, Algen, manche Bakterien – sie alle betreiben diese Form der Umwandlung von Licht- in chemische Energie. Einen Grund für die Effizienz der Fotosynthese vermuten einige Wissenschaftler und Wissenschaftlerinnen in der Quantenphysik.

Trifft Licht auf das Blatt, »sammeln« Komplexe aus Karotinoid- und Chlorophyll-Molekülen die Energie und geben die Energiepakete von Komplex zu Komplex weiter. Das geschieht im klassischen Verständnis wenig zielstrebig, eher ähnlich einem Betrunkenen, der eine Straße hinabtorkelt – mal nach links, mal nach rechts stolpernd. Bestimmungsort der Energiepakete ist das Fotosynthese-Reaktionszentrum, dort sollen sie Elektronen auf höhere Energieniveaus befördern. Deren elektrisches Potenzial treibt die chemischen Prozesse an, durch die schließlich Glukose entsteht.

Betrachtet man den Transport jedoch quantenphysikalisch, so die Hypothese mancher Forschenden, wandert ein Energiepaket schnell und zielgerichtet. Denn es lässt sich auch als Welle beschreiben, und eine solche breitet sich in alle Richtungen aus. Statt orientierungslos umherzuirren, nimmt sie gleichzeitig alle möglichen Wege – und findet direkt die schnellste Route zum Ziel.







Quantenleuchten im Meer

Springende Elektronen lassen Quallen erstrahlen – und markieren Proben unter dem Mikroskop

Bläulich schimmernd schwebt eine Qualle der Spezies *Aequorea victoria* durch das dunkle Wasser. Das helle Leuchten stammt allerdings nicht von dem Tier selbst, sondern ist durch den Blitz des Fotografen entstanden. Unglücklicherweise überdeckt es ein leichtes grünes Glimmen, das *Aequorea* am Rand ihres Schirms zeigt (oben). Dieses Glimmen verdankt das bis zu 20 Zentimeter große Meereswesen einem raffinierten Quantenmechanismus.

Die Qualle besitzt zwei Arten von Chromophoren, wie die Licht erzeugenden Gruppierungen in den Proteinen im Fachjargon heißen. Der erste Chromophor erzeugt blaues Licht. Ein Teil dieses Lichts aktiviert durch einen Quanteneffekt den zweiten Chromophor. Dank der übertragenen

Energie wechseln bei ihm Elektronen auf ein höheres Energieniveau; fallen sie wieder auf ihr Ausgangsniveau zurück, sendet der zweite Chromophor grünes Licht aus. Die Fachleute sprechen von Fluoreszenz.

Das grün fluoreszierende Protein (GFP) von *Aequorea victoria* hat die biochemische und medizinische Forschung revolutioniert und seinem Entdecker 2008 den Nobelpreis für Chemie eingebracht. GFP fungiert als eine Art Sonde, als Marker-Protein, mit dem sich Vorgänge in lebenden Zellen studieren lassen – etwa der Weg, den ein Eiweiß im Metabolismus nimmt. Man muss den Chromophor nur mit blauem oder ultraviolettem Licht bestrahlen, schon leuchtet er grün und gibt seine Position preis.

Per Quantenkompass durch die Welt?

Vögel können sich auch bei Nacht orientieren: Vermutlich weist ihnen der Elektronenspin den Weg

Nicht nur standorttreue Vögel wie die in Australien lebenden Zebrafinken mit dem leuchtend orange-roten Schnabel finden sich womöglich unter anderem dank eines Quantenkompasses in ihrer Umwelt zurecht. Insbesondere Zugvögeln hilft laut einer gängigen These dieser sechste Sinn, auf ihren langen Reisen auf Kurs zu bleiben. Das »Quanten-Navi« misst demnach über einen lichtabhängigen Prozess, in welchem Winkel das Magnetfeld der Erde auf den Boden trifft, und bestimmt daraus die Himmelsrichtungen.

Das funktioniert wohl aufgrund einer Eigenschaft, die nur Quantenteilchen besitzen: den Spin. Er gleicht einem Drall, der physikalisch korrekt auch Eigendrehimpuls heißt. Fällt blaues Nachtlicht ins Auge, stößt es in einem Fotopigment der Netzhaut ein Elektronenpaar auseinander. Die frei gewordenen Elektronen haben beide einen Spin, dessen Ausrichtung von der Stärke und dem Neigungswinkel des Magnetfeldes relativ zur Erdoberfläche abhängt. Diese Wechselwirkung beeinflusst wiederum die Entstehung chemischer Produkte, die der Vogel »spürt«.

Doch nicht nur Vögel können das Erdmagnetfeld fühlen. Auch manche Schmetterlinge orientieren sich daran. Eine Studie aus Südkorea deutet darauf hin, dass sogar Menschen einen – extrem schwachen – Magnetsinn haben könnten.





Verschränktes Bewusstsein

Funktioniert unser Gehirn wie ein Quantencomputer, und sind unsere Nervenzellen Quantenspeicher?

Milliarden von Nervenzellen sind in unserem Kopf miteinander verknüpft – das zeigt ausschnittsweise die Fluoreszenzaufnahme eines Hirnschnitts. Wie aus diesem dichten Geflecht Bewusstsein entsteht, ist eines der größten Rätsel der Wissenschaft. Bereits in den 1990er Jahren vertraten der spätere Physiker-Nobelpreisträger Roger Penrose und der Anästhesiologe Stuart Hameroff die Hypothese, dass daran Quanteneffekte beteiligt sind und das Gehirn funktioniert wie ein biologischer Quantencomputer. Eine Idee, die bis heute umstritten ist.

Ein solches Quantengehirn würde voller Qubits stecken: kleinster Speichereinheiten, die im Gegensatz zu klassi-

schen Bits mehrere Zustände gleichzeitig annehmen können. Diese Qubits wären miteinander verschränkt. Die Veränderung eines Qubits beeinflusste somit automatisch alle seine Partner – ein Effekt, der das Verarbeiten von Informationen enorm beschleunigte.

Der kalifornische Physiker Matthew P. A. Fisher schlug vor einigen Jahren einen Kandidaten für ein Neuro-Qubit vor: Phosphor-Atomkerne, die durch chemische Reaktionen im Gehirn miteinander verschränkt würden. Kalzium-Atome schirmen sie nach dieser Idee ab und halten ihre Verschränkung lang genug aufrecht. Gesucht sind nun experimentelle Belege für die gewagte These.



Schwingungen liegen in der Luft

Forschende spekulieren: Was uns riechen lässt, ist das Zittern der Moleküle und der Tunneleffekt

Wie ein Glatzkopf mit wenigen borstigen Haaren ragt eine Riechzelle auf dieser Elektronenmikroskopaufnahme aus der Riechschleimhaut einer Nase. Auf den Härchen sitzen Rezeptoren, an denen Duftstoffe andocken, die ein Nervensignal auslösen. Mal weht uns ein Hauch von Vanillin an, mal sticht Essig in der Nase.

Die klassische Vorstellung, wie unser Riechsinn funktioniert, beruht auf dem Schlüssel-Schloss-Prinzip: Duftmoleküle passen mit ihrer Form exakt in Andockstellen auf Rezeptoren, die jeweils für einen Geruch stehen.

Vor allem der italienische Duftforscher Luca Turin vertritt eine andere These. Er sieht beim Riechen Quanten-

phänomene am Werk. Demnach unterscheiden wir Gerüche nicht anhand der Form der Moleküle, sondern anhand ihrer charakteristischen Schwingungen. Auch nach dieser Idee setzen sich Substanzen auf den Rezeptor. Hat nun ein passend schwingendes Duftmolekül in der dafür vorgesehenen Bindungsstelle andockt, kann im Rezeptormolekül Energie mithilfe des quantenmechanischen Tunneleffekts abgegeben werden. Dadurch wird letztendlich das Duftsinal ausgelöst.

Dass dieser Vorgang tatsächlich so funktioniert, dass wir also einen Quantenriecher haben, ist indes heftig umstritten.

Was ist Wirk

Mit ihrem bizarren Verhalten stellen Quanten unsere Idee von **Realität auf die Probe. Wieso merken wir im Alltag nichts davon? Ein Besuch bei vier Physikern – und ihren Theorien**

Text: Klaus Bachmann

Fotos: Mattia Balsamini und David Vintiner

lich?

Das Monstrum

Wie groß können Objekte sein und trotzdem noch Quantenverhalten zeigen? Um das herauszufinden, schickt ein Team um Markus Arndt (links, mit seinem Mitarbeiter Stefan Gerlich) an der Universität Wien Moleküle aus bis zu 2000 Atomen durch eine mächtige, fast fünf Meter lange Vakuumröhre

d

Das Verrückte an der Welt um uns herum: Sie ist verlässlich, solide und eindeutig. Der Stuhl ist und bleibt ein Stuhl, gleich, ob wir auf ihm sitzen oder ihn aus dem Fenster werfen. Der Hausschlüssel hängt am Haken neben der Tür und liegt nicht gleichzeitig in Flur, Küche und Wohnzimmer. Die blaue Tasse auf dem Frühstückstisch steht da, auch wenn wir nicht hinsehen. Für jede Wirkung findet sich eine Ursache, für die Delle im Kotflügel genauso wie dafür, dass die Roulettekugel im Fach mit der Zahl 17 landet. Selbst wenn die beim Glücksspiel auftretenden Kräfte zu komplex sind, um sie en détail zu analysieren: Im Prinzip ginge es.

Alles Selbstverständlichkeiten? Nein, sind sie nicht. Stuhl, Hausschlüssel, Tasse – sie alle bestehen aus Abertrillionen von Atomen. Die wiederum setzen sich zusammen aus Elektronen und Kernbausteinen, aneinandergebunden durch Kraftteilchen.

Und im Reich der Elementarpartikel herrschen andere Regeln, als wir sie aus unserem Alltag kennen. Sie muten bizarr an, laufen unserer Intuition zum Teil schockierend zuwider: Elektronen können an mehreren Orten gleichzeitig oder, wie physikalische Fachleute sagen, delokalisiert sein; mal verhalten sie sich wie ein Partikel analog einem Sandkorn, mal wie eine Welle, gleich jener, die entsteht, wenn ein Stein ins Wasser fällt. Der Zufall regiert: Wann ein radioaktives Atom zerfällt, wann ein Elektron in einem Atom auf ein niedrigeres Energieniveau springt, lässt sich nicht vorhersagen, geschieht ohne lange Vorwarnung.

Wie kann auf dieser skurrilen, spukhaften Mikrowelt unsere solide Erfahrungswelt gründen? Wieso merken wir vom flatterhaften Quantenverhalten

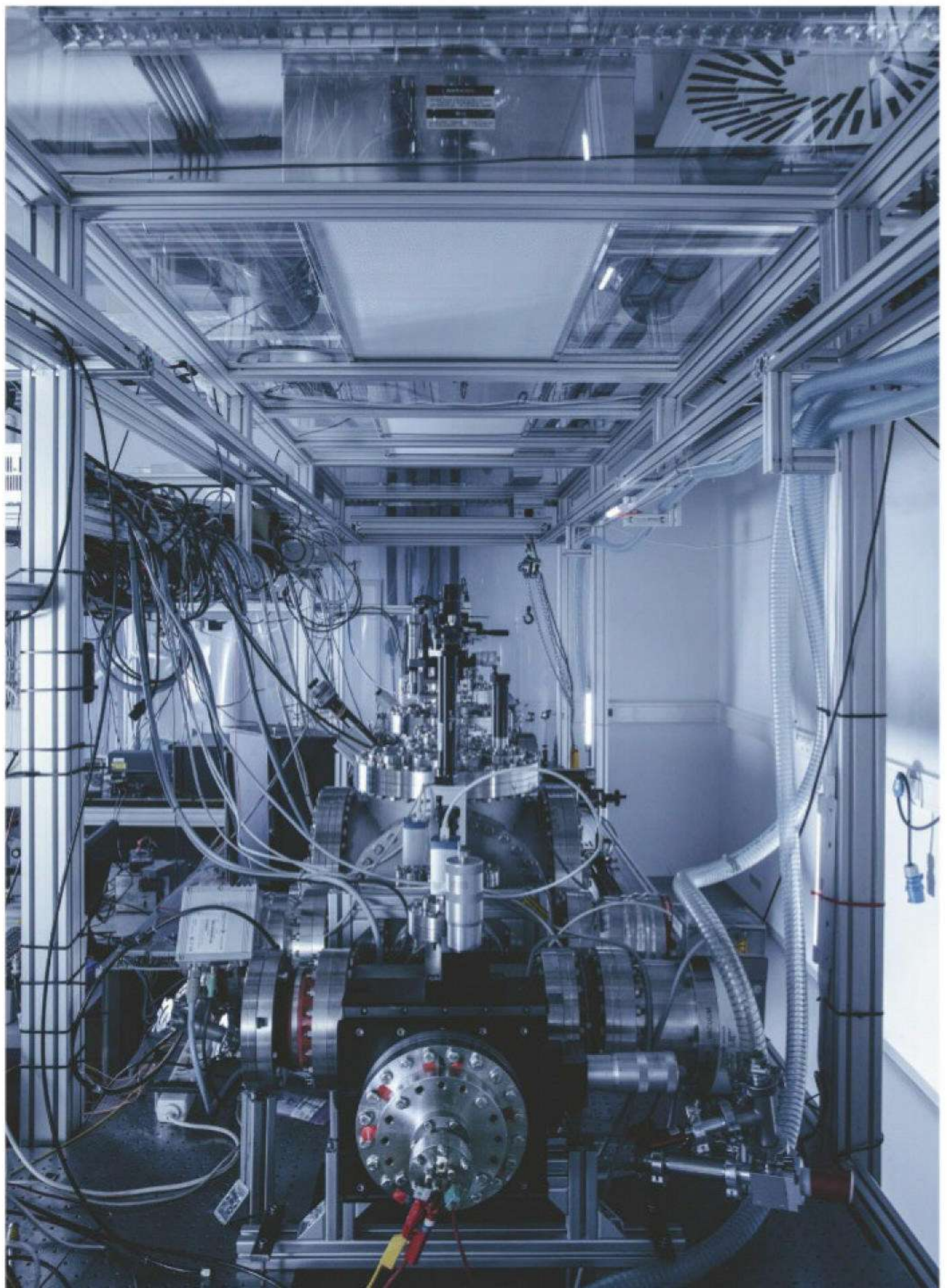
nichts in unserem verlässlichen Alltag? Existiert irgendwo eine Grenze, jenseits derer andere Naturgesetze gelten? Oder sind wir nur blind für die Merkwürdigkeiten im Kleinsten? Das mysteriöse Benehmen der Quanten nagt an unserem Vertrauen in die Verlässlichkeit von Objekten, Raum und Zeit. Es stellt unser Verständnis von Realität infrage: Was können wir tatsächlich vom Wesen der Dinge wissen?

Eines ist unbestritten: Die Quantentheorie ist eine der erfolgreichsten Errungenschaften der Wissenschaft. Dank einem eleganten mathematischen Formalismus beschreibt sie Quantensysteme unglaublich präzise.

Aber was sich hinter der Wand aus Formeln und mathematischen Funktionen verbirgt, wie wir die Gleichungen zu verstehen haben, was sie uns über die

Die Flugstrecke

Um den Wellencharakter von Teilchen zu erkennen, erzeugen die Wiener Physiker und Physikerinnen ein extremes Vakuum in ihrer Apparatur. So vermeiden sie, dass ihre Untersuchungsobjekte auf dem Weg von der Partikelquelle (im Vordergrund) zum Detektor am anderen Ende der Röhre mit Luftmolekülen kollidieren und ihre Quantennatur verlieren





Der Grenzsucher

Markus Arndt von der Universität Wien fragt sich, ob unser Gehirn in der Lage ist, Quantenverhalten von Alltagsobjekten zu erkennen

Natur sagen, darüber führen Fachleute spitze philosophische Debatten. Bereits vor 100 Jahren verbissen sich Albert Einstein und Niels Bohr, zwei Giganten der Physik, in einen Disput, den ihre wissenschaftlichen Nachfahren bis heute fortführen (siehe Seite 40). Diese Geschichte dreht sich darum, wie die Folgegenerationen mit dem Erbe verfahren sind, welche unterschiedliche Lösungen sie sich für die Rätsel ausgedacht haben. Denn eines ist inzwischen auch passiert: Die Physik hat Experimente entwickelt, die sich die Alten nicht hätten träumen lassen und die es ermöglichen zu unterscheiden, welches Verständnis korrekt ist und welches nicht.

Die Experimente

An dem wundersamen Treiben in der Mikrowelt besteht kein Zweifel, genauso wenig wie am verlässlichen, „klassischen“ Verhalten unserer makroskopischen Alltagswelt. Wo aber stoßen diese beiden Reiche aufeinander? Gibt es eine scharfe, von Naturkonstanten gezogene Grenze? Oder einen sanften Übergang?

Markus Arndt vom Physikalischen Institut der Universität Wien sucht mithilfe von Experimenten nach Antworten. Seine Erkundungen beruhen auf einem zentralen Experiment der Quantentheorie: dem Doppelspaltversuch. Für den 1988 verstorbenen Physik-Nobelpreisträger Richard Feynman steckte in dem Ex-

periment „das Herz der Quantenmechanik“. Es zeige all die Absonderlichkeiten der Theorie. Die Ergebnisse des Experiments „auf klassischem Weg zu erklären ist absolut unmöglich“.

Das Grundprinzip ist einfach (siehe Seite 34): Man nehme eine Elektronenkanone und schieße die Partikel auf eine Scheibe mit zwei parallelen Schlitzen. Dahinter stelle man einen Bildschirm, der beim Auftreffen jedes Elektrons aufleuchtet. Hätten wir es mit klassischen Objekten wie etwa Tennisbällen zu tun, wäre klar, welches Muster sich auf dem Detektor abzeichnete: zwei Linien. Entweder flöge eine Filzkugel durch den einen Spalt oder den anderen (die zurückprallenden interessieren uns in diesem Fall nicht).

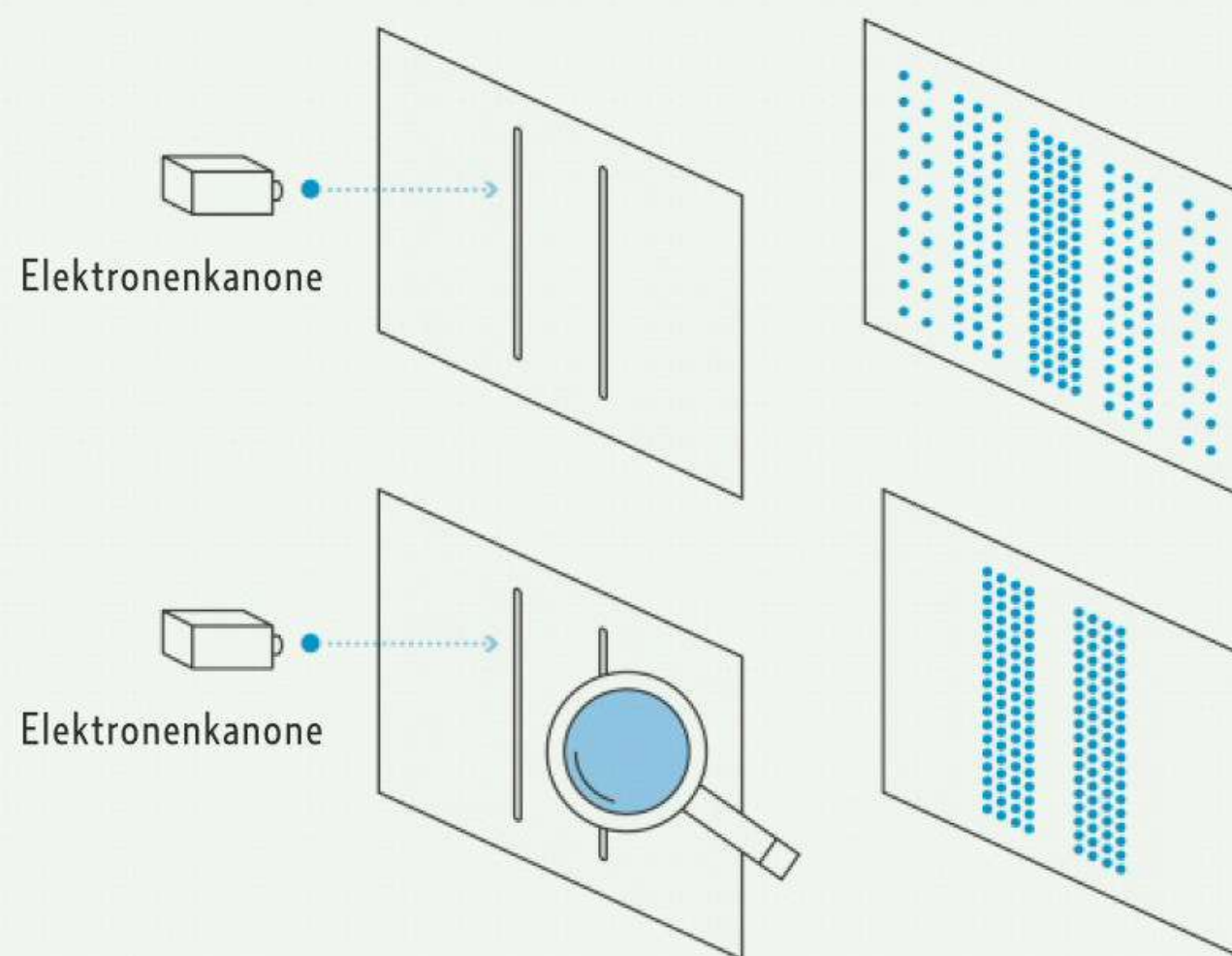
Die Elektronen liefern aber ein verstörendes Ergebnis: In der Mitte des Bild-

schirms scheint ein dicker Balken auf, auf beiden Seiten flankiert von mehreren schwächeren. Es ist ein Muster, wie es sich ergibt, wenn eine Wasserwelle durch zwei Lücken fließt und auf eine Wand trifft.

Das Resultat wird noch irritierender, wenn die Elektronenkanone so langsam feuert, dass jeweils ein einzelnes Partikel den Doppelspalt passiert. Auf dem Detektor lässt sich der Ort genau erkennen, an dem das Teilchen aufschlägt. Doch wie von Geisterhand formieren sich die vielen Elektronen über die Zeit zu dem Streifenmuster. Ein Befund, der mit Tennisbällen undenkbar wäre. Und der Beweis, dass Materie sich auch als Welle beschreiben lässt – konsequent wider unsere Alltagserfahrung.

Wer nun glaubt, er könne die Elektronen überlisten und herausfinden, welchen Spalt sie auf ihrem Weg genommen haben, der täuscht sich: Sobald jemand

Das Doppelspalt-Experiment



Es ist eines der zentralen und rätselhaftesten Quantenexperimente:

Eine »Kanone« schießt nacheinander Elektronen auf eine mit zwei Spalten versehene Blende. Auf dem Detektorschirm dahinter formieren sich die Elektronen zu einem Muster, wie es entsteht, wenn Wellen durch den Doppelspalt laufen würden (oben). Versucht aber jemand herauszufinden, durch welchen Spalt jedes einzelne Elektron fliegt, verschwindet das Wellenmuster (unten). Die Partikel landen in zwei Streifen hinter den Schlitzen – ein Verhalten, das wir von kompakten Objekten, etwa Tennisbällen, erwarten würden (siehe Seite 34)



Der Rechenkünstler

Der theoretische Physiker Časlav Brukner ist überzeugt: Es existiert keine Demarkationslinie zwischen klassischer und quantischer Welt

an einem Spalt einen Messfühler anbringt, um die Passage eines Partikels zu registrieren, verschwindet auf mysteriöse Weise das Streifenmuster zugunsten zweier Balken. Wie kann das sein? Woher wissen die Elektronen, dass sie beobachtet werden? Es bleibt ein Rätsel.

d

Die Apparate, mit denen Markus Arndt den Übergangsbereich erkundet, sind raffinierter als die simple Elektronenkanone. LUMI, das Long-baseline Universal Matter-Wave Interferometer (zu Deutsch etwa: lang gestrecktes universelles Materiewellen-Interferometer) ist so kompliziert wie sein Name: ein silbrig glänzendes Monstrum von einer Metallröhre, fast fünf Meter lang.

2019 stellte Arndts Team mit dem Gerät den derzeit gültigen Weltrekord auf. Es schickte riesige Moleküle aus 2000 Atomen durch die LUMI-Röhre. Und beobachtete am Detektor das typische Streifenmuster, das sich bei der Überlagerung von Wellen ergibt. Was belegt, dass selbst derart große Moleküle noch räumlich „verschmiert“, also an mehreren Orten gleichzeitig sind, wie es die Quantentheorie für kleinste Teilchen besagt.

„Es sind die bei Weitem schwersten Objekte bislang, an denen Materiewellen-Interferometrie gezeigt wurde“, sagt Arndt. Vorher hatte er bereits nachgewiesen, dass sich „Buckyballs“ – Kugeln aus 60 Kohlenstoffatomen – sowie Antibiotikamoleküle unter bestimmten Umständen wie Wellen verhalten und nicht wie Teilchen, als die wir sie intuitiv ansehen.

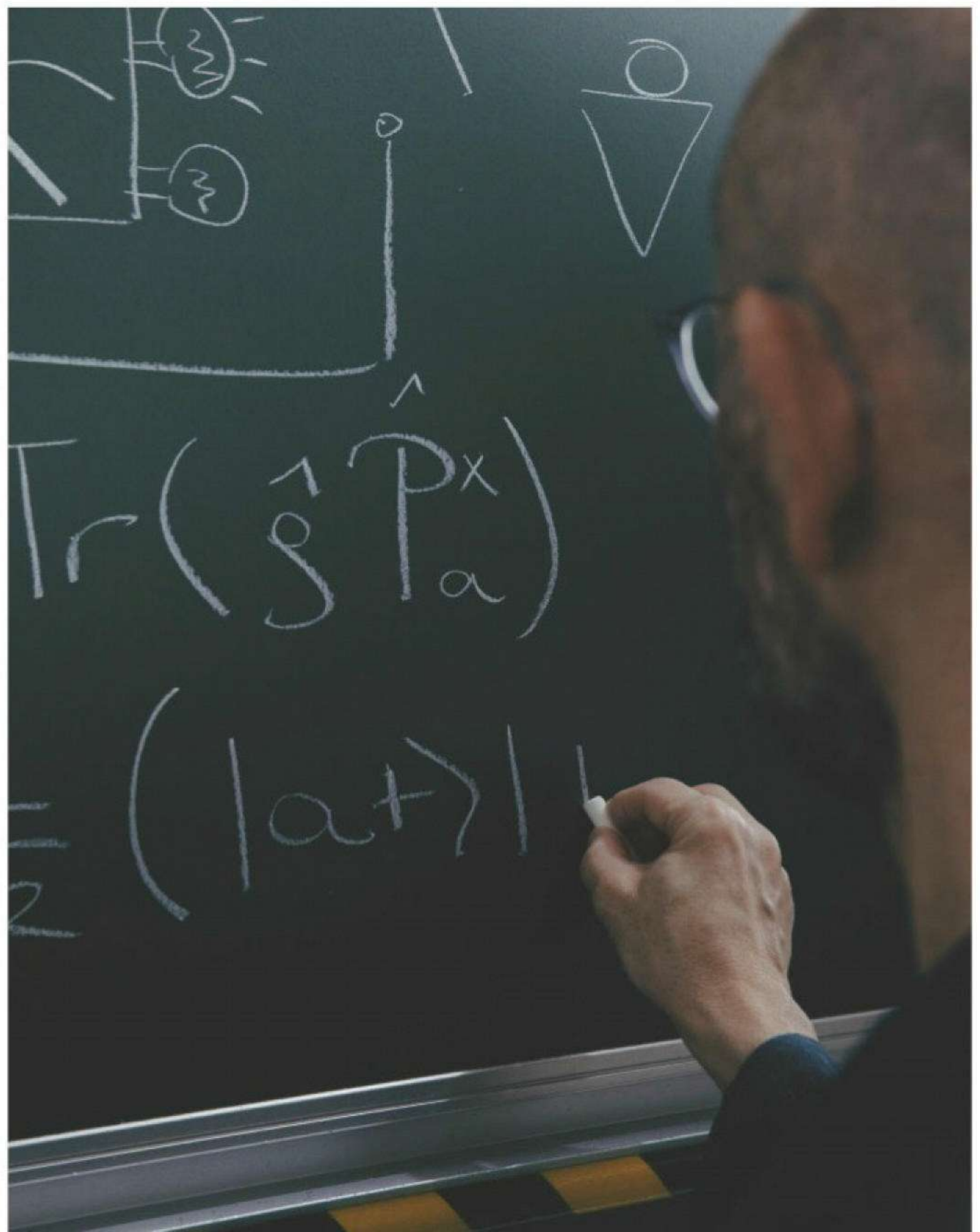
Es sind unglaubliche Befunde, die unserer Erfahrung spotten. Auch Arndt staunt immer wieder über das bizarre Phänomen: „Wir wissen, da ist ein Teilchen. Wir können es im Mikroskop sehen. Dann schwimmt es. Wenn man es un-

beobachtet lässt, ist der Ort delokalisiert. Das Komische aber ist: Im Detektor, also auf dem Schirm hinter dem Spalt, sehen wir wieder ein wirkliches Molekül, so, wie ich mir das vorstelle: mit definiertem Ort, definierter Masse und Struktur.“

Der amerikanische Physiker John Archibald Wheeler verglich die quantische Ungewissheit in den 1970er Jahren mit einem „großen, rauchenden Drachen“: Auf dem Weg von der Quelle zum Detektor besitze ein Photon am Anfang und am Ende eine eindeutig definierbare Realität. „Das Maul des Drachen ist scharf, damit beißt er in den Detektor. Seine Schwanz-

Die Mathematik

Die Formeln der Quantenphysik erlauben erstaunlich präzise Vorhersagen, wie sich die Bausteine der Natur verhalten. Doch es bleiben große Untiefen beim Verständnis der Theorie. Brukner will diese Probleme auflösen



spitze ist scharf, dort ist die Quelle.“ Dazwischen sei der Körper des Fabeltiers unwirklich und in Rauch gehüllt. „Es lässt sich nichts darüber aussagen“, konstatierte Wheeler, „wie der Drache in diesem Bereich aussieht oder was er dort macht.“ Ist also das, was wir nicht beobachten können, nicht real, nicht existent? So sah es Wheeler, und diese antirealistische Auffassung vertraten auch die Pioniere der Quantentheorie Werner Heisenberg und Niels Bohr.

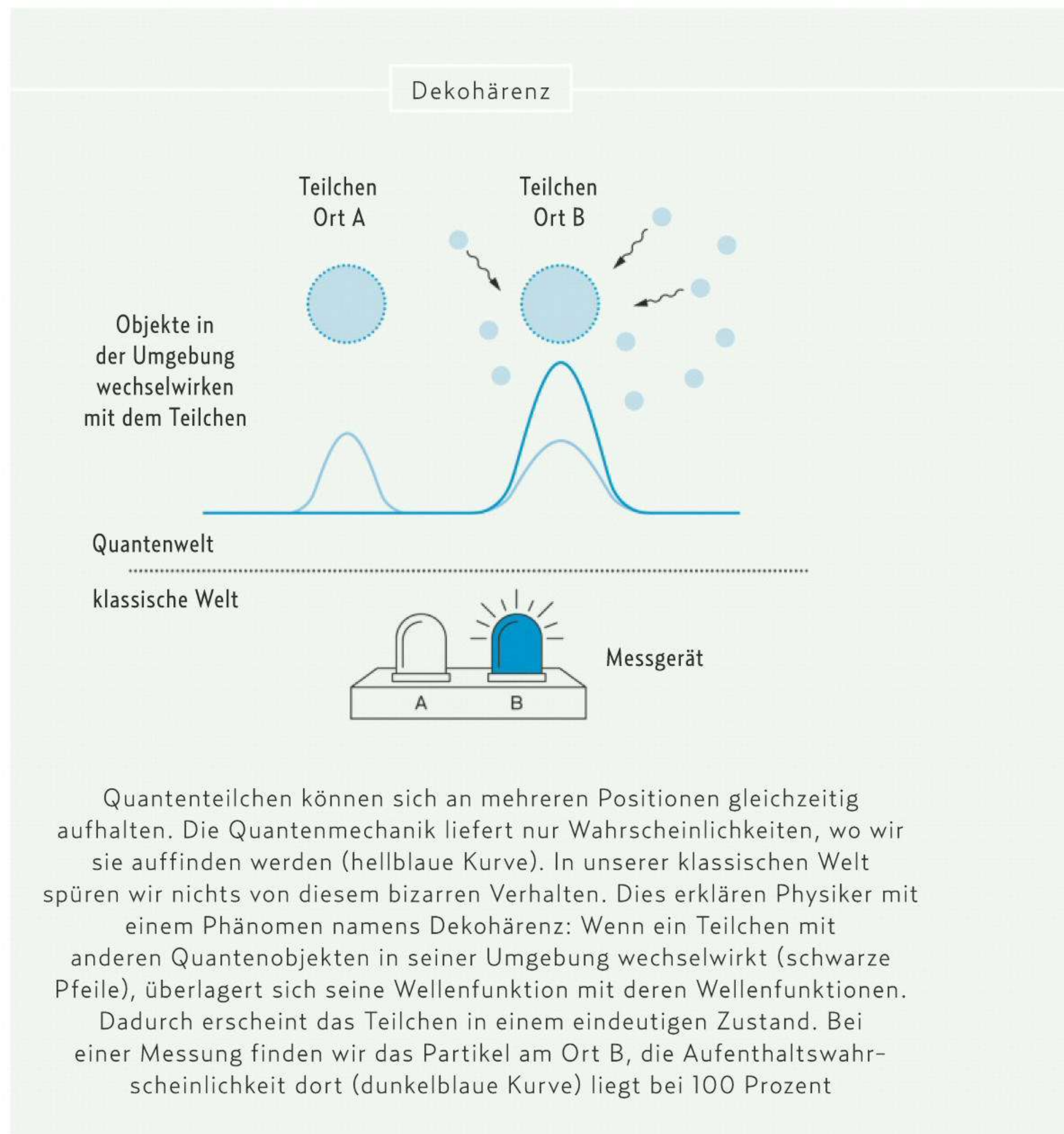
Die Orthodoxen

Bohrs und Heisenbergs Ideen gingen als *Kopenhagener Deutung* in die Lehrbücher ein. Bohr, der Großmeister der Quantenmechanik, bestand darauf: „Es ist falsch zu denken, dass es Aufgabe der Physik ist, herauszufinden, wie die Natur ist. Die Physik befasst sich damit, was wir über die Natur sagen können.“ Mit anderen Worten: Real wird ein Teilchen erst dann, wenn wir es vermessen. Darüber zu sprechen, wie ein Teilchen beschaffen ist, wenn wir es nicht beobachten, hielt Bohr für sinnlos.

Časlav Brukner vom Institut für Quantenoptik und Quanteninformation der Österreichischen Akademie der Wissenschaften und der Universität Wien stimmt dem ausdrücklich zu: „Wir müssen der Natur in einem Experiment oder mit einem Messgerät Fragen stellen, dann bekommen wir Antworten. Über quantenmechanische Systeme an sich zu sprechen, ohne festzulegen, wie wir sie beobachten, hat sich als unmöglich herausgestellt.“

Der 54-jährige Theoretiker gehört zu denjenigen, die sich den grundlegenden Fragen der Quantenmechanik stellen. „Die große Mehrheit der Physiker“, sagt er, „verfährt nach dem Motto ‚Shut up and calculate‘ – halt den Mund und rechne. Sie segeln über die Untiefen der Theorie hinweg und nutzen den ausgefeilten mathematischen Formalismus ganz pragmatisch für ihre Forschung.“

Brukner aber glaubt, dass von der Mikro- zur Makrowelt kein plötzlicher Kulissenwechsel stattfindet, sondern im Großen die gleichen Gesetze gelten wie im Kleinen. Warum unsere Alltagswelt trotzdem so anders, so verlässlich ist, dafür sieht er zwei Mechanismen am Werk.



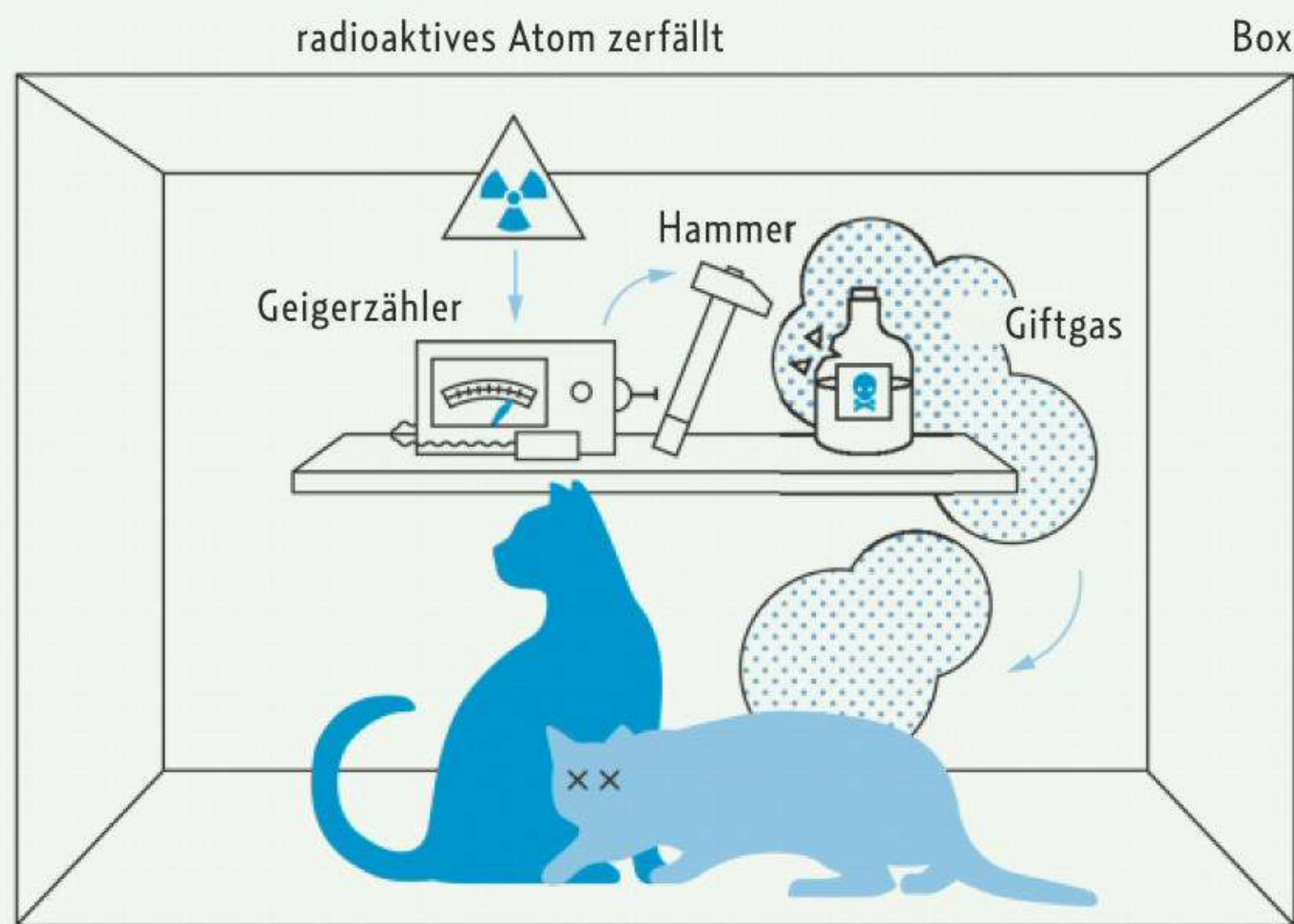
Da ist zum einen das Phänomen, das im Fachjargon Dekohärenz heißt. Quantenobjekte zeigen ihre verstörenden Eigenschaften am ehesten, wenn sie isoliert sind: ein Atom allein in einer luftleer gepumpten Röhre; ein Elektron, das weitab von einer Galaxie durch das All saust. Dann ist sein Aufenthaltsort nicht festgelegt, ist seine Geschwindigkeit unbestimmt, und es ist weder Teilchen noch Welle. Es existiert in einer Überlagerung aller Möglichkeiten, eine „Kohärenz“ liegt vor. Die geht in dem Moment verloren, wenn das Partikel in Wechselwirkung mit der Umgebung tritt, wenn es zum Beispiel vermessen wird oder wenn es mit Luftmolekülen kollidiert.

Durch die Wechselwirkung des Quantensystems mit der Umgebung entsteht ein größeres, umfassenderes Quantensystem, erklärt Brukner. Das Partikel

verschränkt sich mit dem Messgerät, dieses Konstrukt wiederum mit dem, der die Messung vornimmt, und so weiter. Wenn man so will, werden die Quanteninformationen des Ursprungsteilchens so weit verdünnt, dass wir sie nicht mehr erkennen können. Die Entwicklung ist praktisch unumkehrbar und das Teilchen „dekohäriert“.

Rasend schnell verläuft die Dekohärenz bei größeren Objekten: Ein mikrometergroßes Staubeilchen verliert seine Quanteneigenschaften, wenn Sonnenlicht darauffällt, binnen einer Billionstelssekunde. Ein noch viel winzigeres freies Elektron bleibt unter bestimmten Versuchsbedingungen dagegen mehr als 100 Tage „quantisch“. Bei Experimenten müssen daher möglichst viele Störungen ausgeschaltet werden, um diese Effekte wirklich zu erkennen. Das erfordert

Schrödingers Katze



Mit dem Gedankenexperiment wollte der Physiker Erwin Schrödinger die absurden Konsequenzen der Quantenmechanik verdeutlichen: In einer Kiste steckt eine Katze, dazu ein radioaktiver Stoff, von dem innerhalb einer Stunde ein Atom zerfallen kann. Zerfällt ein Atom, registriert das ein Geigerzähler, der einen Hammer in Bewegung setzt, der eine Giftphiole zertrümmert. Solange niemand hinschaut, befinden sich die radioaktiven Atome laut Quantenmechanik in zwei Zuständen zugleich: Sie sind sowohl zerfallen wie auch nicht zerfallen. Aufgrund des Tötungsmechanismus müssten sich dann aber auch die Wellenfunktion der toten und der lebenden Katze überlagern, beide Zustände der Katze existierten zugleich. Ein Phänomen, das es nach unserer Lebenserfahrung nicht gibt

Hochvakuum und extrem niedrige Temperaturen in der Messapparatur.

Kein Wunder also, dass sich Dinge des Alltags normal benehmen, dass der Stuhl, auf dem wir sitzen, keinen Wellencharakter aufweist, dass Schrödingers Katze nicht zugleich tot und lebendig ist.

Schrödingers Katze, sie ist zu einer Ikone der Quantenwunderwelt geworden. Der österreichische Physiker Erwin Schrödinger ersann das Gedankenexperiment, um die Konsequenzen der Quantenmechanik ad absurdum zu führen: Eine Katze wird in eine Stahlkammer gesperrt, zusammen mit einer „Höllenmaschine“ – einer winzigen Menge radioaktiver Substanz, einem Geigerzähler, einem Hämmerchen, einer Phiole Blausäure. Zerfällt eines der radioaktiven Atome, spricht der Geigerzähler an, betätigt über ein Relais den Hammer, der das

Giftgefäß zerschlägt. Da das Atom gemäß der Theorie zugleich zerfallen und nicht zerfallen sein kann, wären nach Schrödingers Worten in den Quantengleichungen „die lebende und die tote Katze zu gleichen Teilen gemischt oder verschmiert“. Das wollte der Physiker als Abbild der Wirklichkeit nicht gelten lassen.

Einen pragmatischen Ausweg aus dem Dilemma bietet die Dekohärenz. Die schlägt bei einem derart großen Objekt wie einer Katze, die in Kontakt kommt mit Luft, einer Kiste, einem Geigerzähler, sofort zu. Auch wenn niemand die Kiste öffnet und nachsieht, ist das Tier entweder tot oder lebendig.

Neben der Dekohärenz sieht Brukner einen zweiten Mechanismus, der bewirkt, dass wir unseren Alltag als normal wahrnehmen: „Unsere Sinne sind grobe Messinstrumente.“ Prinzipiell können auch

größere Objekte ihre Quanteneigenschaften bewahren, das belegte der Theoretiker vor einigen Jahren in abstrakten Rechnungen. Sogar für eine Schrödinger-Katze sollte das funktionieren. Allerdings erkennen wir ihr quantisches Verhalten nicht. Denn eine Katze, die aus Abertrilliarden Quantenteilchen besteht, kann durch Überlagerung unüberschaubar viele Quantenzustände annehmen. Deren Unterschiede sind wegen der Komplexität des Systems unvorstellbar klein. „Wir haben keine Messgeräte, die hinreichend genau sind, um diese Zustände zu differenzieren“, sagt Brukner, „deshalb erscheint uns das Objekt klassisch.“ Es ist ein bisschen wie bei einem LED-Monitor: Genau betrachtet, setzt sich ein Katzenbild nach dieser Überlegung aus lauter winzigen roten, gelben, blauen Einzelpunkten zusammen. Aber wer weit genug weg steht, kann die Pünktchen nicht mehr auseinanderhalten, für unser Auge verschmelzen sie zu einem stabilen Gesamtbild.

In Brukners Weltsicht existieren mithin keine zwei separaten Reiche, hier quantisch, da klassisch, keine Demarkationslinie trennt Groß von Klein. Die Welt ist eins.

Der Glaubensstreit um die Interpretation der Quantentheorie und um das, was wir als real bezeichnen dürfen, dieser Streit ist damit allerdings nicht beigelegt. Anders als Brukner und Gleichdenkende hält eine kleine Gruppe von Physikern und Physikerinnen tapfer an der Existenz einer Realität fest, die existiert, auch wenn niemand sie beobachtet.

Die Rebellen

Angelo Bassi gehört zu dieser Minderheit. Der Physiker von der Universität Triest empört sich: „Die Quantentheorie erzählt uns, dass wir nicht einmal darüber nachdenken dürfen, was bei einem Doppelspaltversuch mit einem Atom zwischen der Quelle und der Messung passiert“, weil es per Definition nur sinnvoll sei, über das Ergebnis einer Messung zu sprechen. Das will Bassi nicht akzeptieren. „Die Quantentheorie ist nicht exakt“, sagt er. Sie sei vielmehr eine sehr gute Annäherung an eine tiefer liegende Theorie.

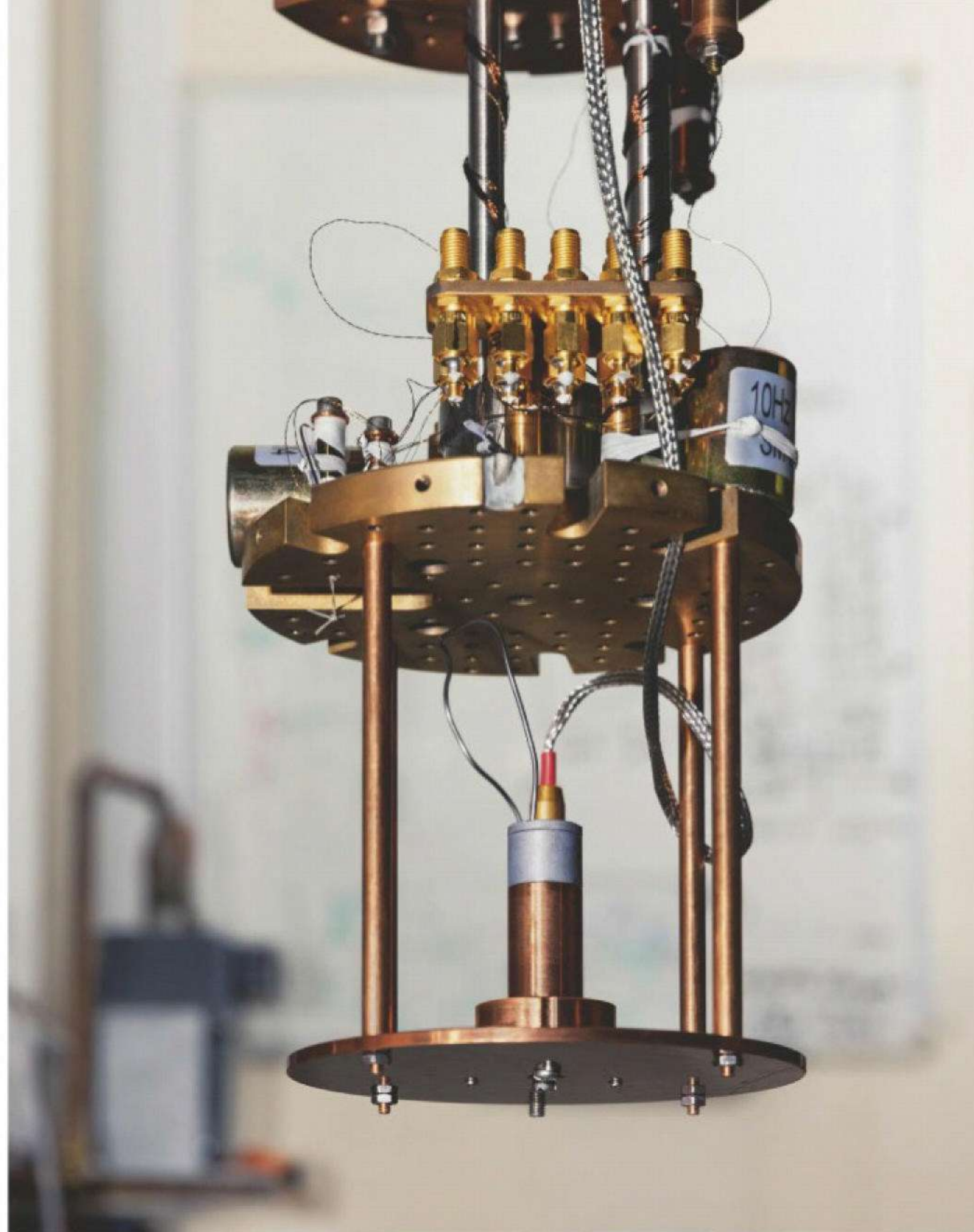
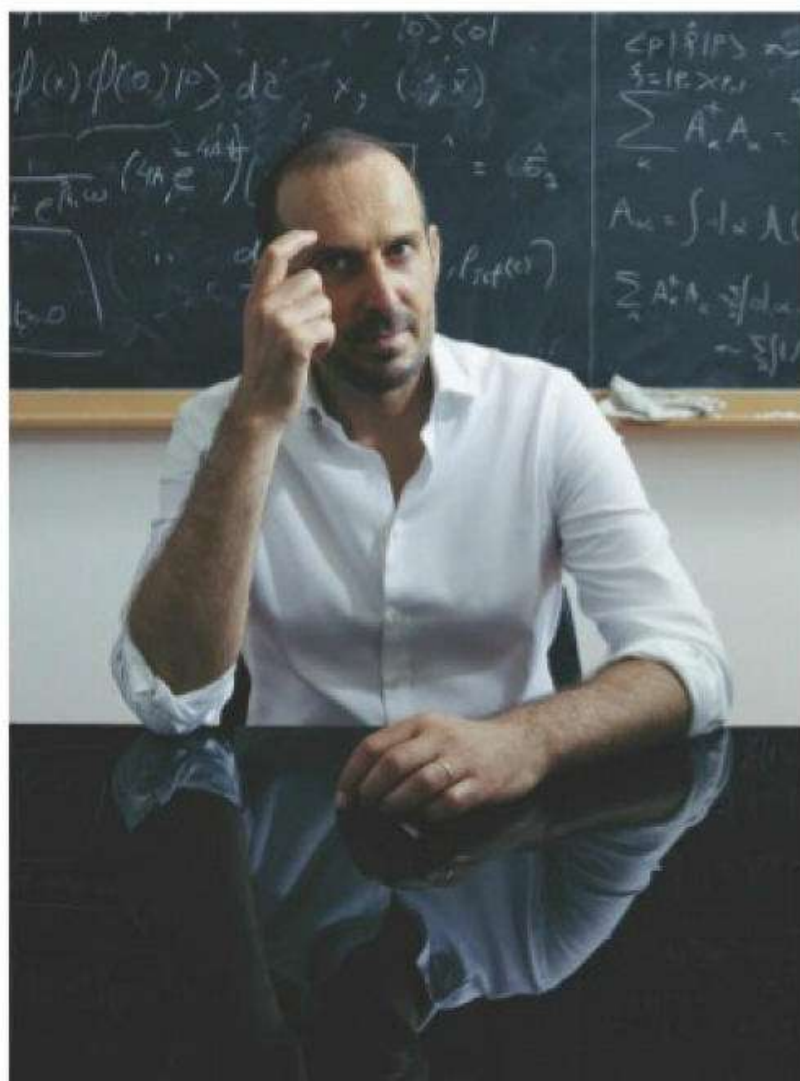
Der Triester Theoretiker favorisiert ein „Kollapsmodell“. Nach dieser Vorstellung sorgt nicht eine Messung oder ein Beobachter dafür, dass sich ein über den Raum „verschmiertes“ Partikel an einem Punkt materialisiert – oder in der Sprache der Physik: dass seine **Wellenfunktion** kollabiert (siehe **Kollaps**). Stattdessen steckt dahinter ein objektiver physikalischer Mechanismus, der allerdings nur mit einer sehr kleinen Wahrscheinlichkeit einsetzt. Weshalb zum Beispiel ein einzelnes Elektron im luftleeren Raum recht lange räumlich „verschmiert“ sein kann und im Doppelspaltversuch problemlos luftleere Interferometer durchfliegt.

W

Wenn sich dagegen viele Teilchen zusammenfinden, steigt die Wahrscheinlichkeit, dass der Kollaps eines von ihnen trifft. Dieser Treffer wirkt quasi als Initialzündung. Der eine Kollaps reißt alle anderen Wellenfunktionen in der Umgebung mit; wie Dominosteine, die sämtlich fallen, wenn der erste kippt. Größere Objekte haben daher keine Chance, ihre Quanteneigenschaften zu behalten.

Der Realitätsfan

Der Triester Physiker Angelo Bassi mag sich nicht damit abfinden, dass Teilchen erst durch die Beobachtung definierte Eigenschaften annehmen



Die Falle

Das von Angelo Bassi mitinitiierte Projekt TEQ sucht nach experimentellen Belegen für die von ihm favorisierte Kollaps-Theorie. Dazu werden winzige Glaskügelchen in einem Magnetkäfig (der Zylinder im unteren Bildbereich) gefangen und ihre Bewegungen analysiert

Trotzdem würde Bassi „nicht den Kopf darauf verwetten, dass Kollapsmodelle die Wahrheit sind“. Er sei aber ein großer Anhänger, da sie experimentell getestet werden könnten.

An einem solchen Test arbeitet derzeit ein internationales Team aus acht europaweit verteilten Universitätsinstituten und einem Privatunternehmen. TEQ (Testing the Large-Scale Limit of Quantum Mechanics) heißt das Projekt; Angelo Bassi hat es miterdacht, die Europäische Union finanziert die Forschung mit 4,4 Millionen Euro.

Die in verschiedenen Städten Europas speziell entwickelten Bauteile haben

Hendrik Ulbricht und sein Team im Physikgebäude der Universität von Southampton zusammengesetzt. Von außen sieht das Experiment aus wie ein Ölfass mit Röhren- und Kabelfrisur: In dem Fass stecken wie Matroschkas ineinander gepackt zwei Kryostaten, High-tech-Kühlgeräte, die das Innerste auf eine Temperatur knapp über dem absoluten Nullpunkt abkühlen. Das Innerste bildet eine Paul-Falle, ein Käfig, in dem ein winziges Glaskügelchen schwebt, gut 100 Millionstelmillimeter groß, gehalten von elektrischen Feldern.

Auf dieses Glaskügelchen richtet sich die Aufmerksamkeit. Gesucht werden

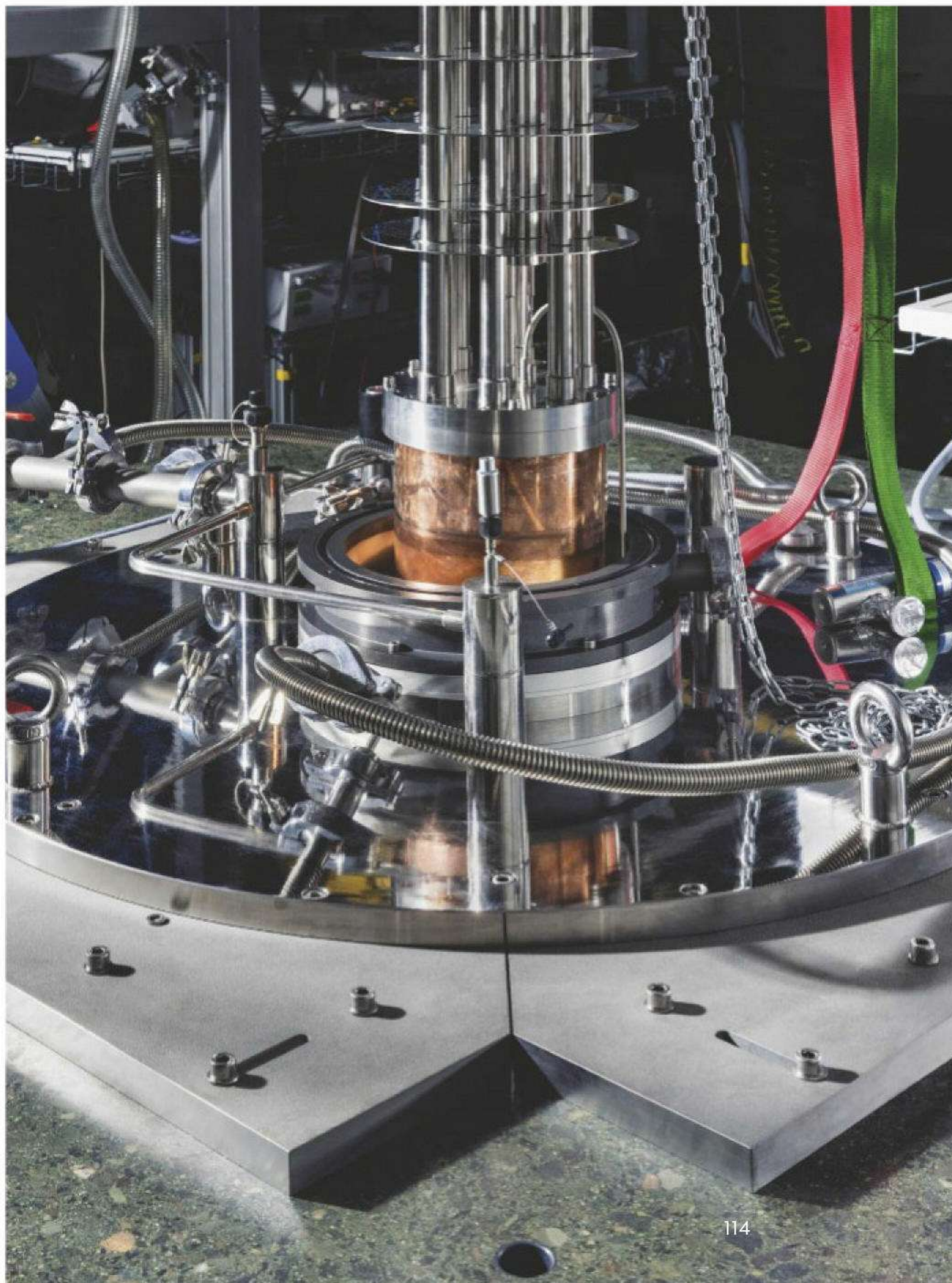
winzige Bewegungen der Nanoteilchen. „Die Kollapsmodelle sagen einen Nebeneffekt voraus, der solche Teilchen hin- und herwackeln lässt“, erklärt Hendrik Ulbricht. Der Physiker vergleicht das Phänomen mit der brownischen Bewegung: Pollenkörner bewegen sich in einer wässrigen Lösung unregelmäßig und ruckartig hin und her. Ursache sind Zusammenstöße mit den Flüssigkeitsmolekülen, die selbst nicht sichtbar sind. Was den spontanen Kol-

laps und damit auch das Hin- und Herwackeln verursacht, ist noch unbekannt. Vielleicht die Gravitation, wie der Physik-Nobelpreisträger Roger Penrose vermutet, vielleicht aber auch etwas ganz anderes. Noch ist der Spekulation Tür und Tor geöffnet.

Die an TEQ Beteiligten hoffen aber, dass die Macht im Hintergrund zumindest einen erkennbaren Fingerabdruck hinterlässt. Und wenn das passiert, könnten sie jedenfalls mit Fug und

Der Tiefkühler

Die TEQ-Falle, in der Nanoteilchen untersucht werden (sie befindet sich, im Bild nicht sichtbar, unterhalb des kupferfarbenen Trägers), muss penibel von der Umwelt abgekoppelt werden: Sie hängt im Ultravakuum, wird auf 300 Millikelvin gekühlt und von Licht abgeschirmt



Der Hoffnungsfrohe

Hendrik Ulbricht von der Universität Southampton ist elektrisiert von der Aussicht, dass das TEQ-Projekt etwas ganz Neues entdecken könnte

Recht behaupten: Teilchen verlieren ihre bizarren Quanteneigenschaften spontan, ohne Zutun von Umwelt und menschlichen Wesen, die auf sie schauen. Die Welt hätte an objektiver Realität gewonnen.

Im Sommer 2021 hat das TEQ-Team mit den Messungen begonnen und die ersten Daten erhoben. Die gilt es nun abzusichern.

Partner von Bassi und Ulbricht bei TEQ ist auch der Wiener Physiker Časlav Brukner. Er beteiligt sich, obwohl eine objektive mikroskopische Welt für ihn abgehakt ist. Für ihn entsteht Realität erst, wenn jemand ein Teilchen vermisst. Aber „ich finde es wichtig zu erforschen, ob die Quantenmechanik auf allen Ebenen gültig ist“, sagt er. Wenn wir technologisch zu solchen Experimenten in der Lage seien, müssten wir sie durchführen.

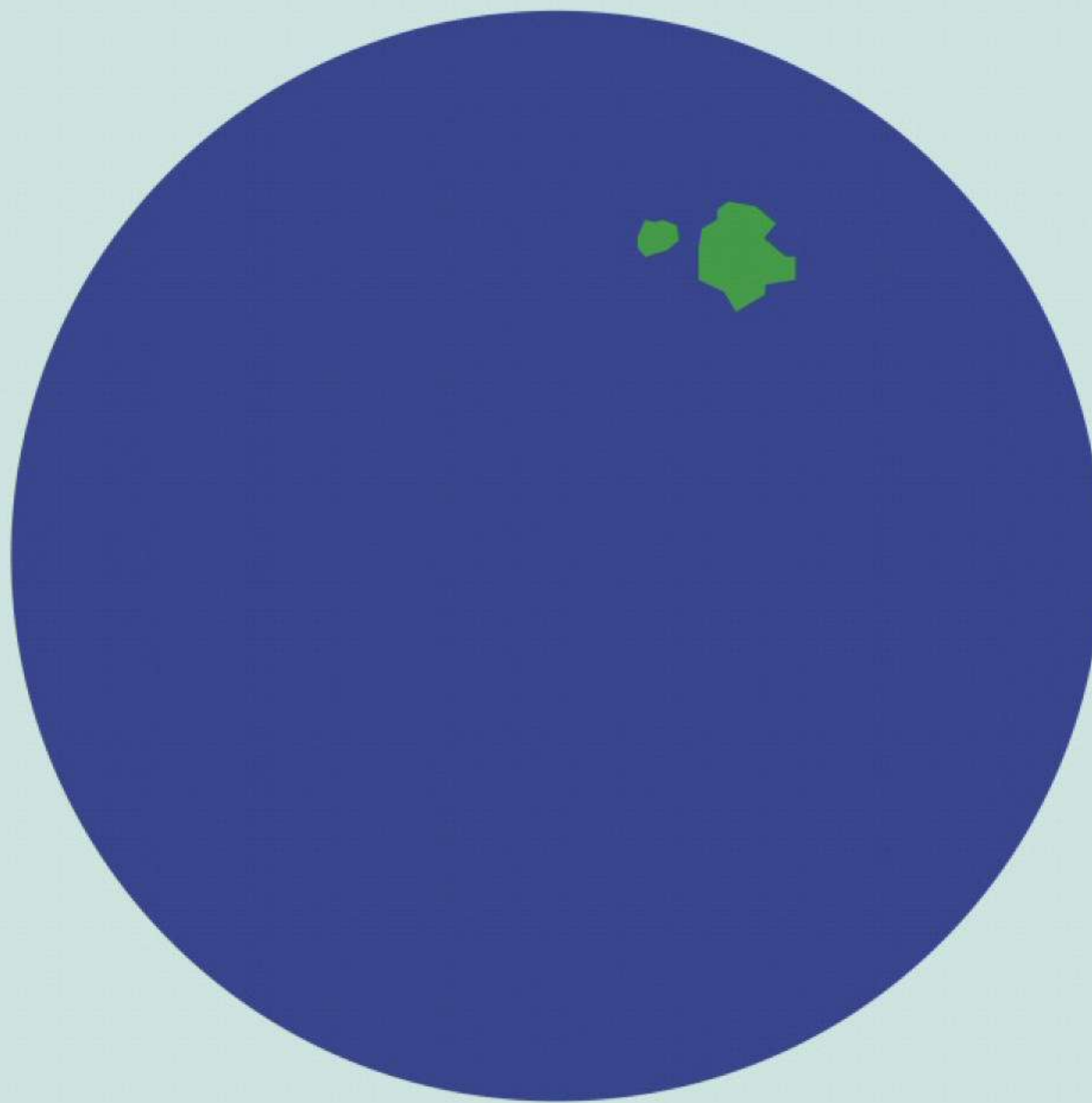
Allerdings glaubt er nicht, dass die Quantenmechanik die endgültige Version unseres physikalischen Weltverständnisses sein wird. „Die nächste Theorie wird aber noch weiter entfernt sein von unseren Alltagserfahrungen und klassischer Physik.“

Darin immerhin ist sich Brukner einig mit Bassi. Hinter dem Quantenhorizont geht es weiter, dort wartet ein neuer Kontinent (siehe Seite 128). „Die Quantentheorie ist eine junge Theorie“, sagt Bassi. „Wir müssen geduldig sein. Das zeigt die Wissenschaftsgeschichte. Hundert Jahre sind da gar nichts.“ •

SZPlus

Wie Sie den Klimawandel verstehen

- Wenn Sie in Ihre Wetterapp gucken
- Wenn Sie den SZ-Klimamonitor verfolgen



Erweitern Sie Ihre Perspektive
mit der Süddeutschen Zeitung.



Jetzt kostenlos testen:
sz.de/perspektiven 

Süddeutsche Zeitung

Von wegen LEER!

Text: Lara Hartung

Wer versucht, Räume zu schaffen,
die nichts als Nichts enthalten, erlebt

Überraschendes: Das Vakuum
brodelt vor kurzlebigen Teilchen, die
kommen und rasch wieder vergehen.

Trotz ihrer Flüchtigkeit haben
sie womöglich den Keim gelegt für die
großen Strukturen des Kosmos



Für ihre Experimente muss die Physik oft mit gewaltigem Aufwand ein extrem gutes Vakuum erzeugen. So wie in der haushohen Anlage KATRIN bei Karlsruhe, die das Gewicht von Neutrinos bestimmen soll



Eigentlich ist es ein einfaches Experiment: Zwei Metallplatten stehen sich parallel gegenüber, sonst: nichts. Keine Luft, kein Strom, keine Felder – die Platten umgibt allein leerer Raum. Dennoch geschieht Unerwartetes: Sind sie einander nah genug, bewegen sie sich wie von Geisterhand aufeinander zu.

Der erste, der auf die Kraft des Nichts stieß, war vor gut siebzig Jahren der niederländische Physiker Hendrik Casimir. Was er entdeckte, widerspricht unserer Intuition. Moderne Pumpen saugen Vakuumkammern bis auf ein paar Atome leer, und durch den Weltraum schwirrt noch viel weniger Materie – und doch herrschen dort Kräfte, die wir messen können.

Damit beantwortet Casimirs Experiment die alte Frage, über die Philosophie und Wissenschaft lange Zeit stritten: Gibt es die absolute Leere, den von allem freien Raum?

Kaum ein Philosoph lehnte das Vakuum so vehement ab wie Aristoteles. Von der Idee, dass Atome oder Himmelskörper sich durch leeren Raum bewegen, hielt er nichts. Er sah stattdessen den Äther, ein hypothetisches Element, am Werk: Der halte die Planeten auf ihren Bahnen. Damit begann ein Hin und Her, das mehr als zwei Jahrtausende dauern sollte. Mehrfach wurde der Äther wegerklärt und wieder eingeführt. Sollte er ursprünglich die Vorgänge am Himmel begründen, wurde er später zum Medium, in dem sich Licht ausbreitet.

Erst im 20. Jahrhundert schaffte Einsteins Relativitätstheorie den Äther endgültig ab. Für ein paar Jahre blieb der leere Raum leer. Dann aber füllte die Quantenphysik ihn mit unendlichen Möglichkeiten. Das Nichts, das wissen wir heute, kann für einen kurzen Augenblick jede Gestalt annehmen. Für Sekundenbruchteile wird es zu Elektronen, zu Licht, zu Quarks. Wie kann das sein? Bedeutet Nichts nicht gerade, dass da nichts ist – keine Teilchen und keine Energie? Was widersprüchlich klingt, ist eine direkte Folge aus Werner Heisenbergs *Unschärferelation* (siehe Seite 48): Sie besagt, dass bei bestimmten Paarungen physikalischer Größen nie für beide gleichzeitig exakte Werte existieren. Zeit und Energie sind solch ein Duo: Je genauer man einen Zeitpunkt bestimmt – je kürzer also die Zeitspanne –, desto ungenauer wird die Energie. Einen Augenblick lang kann sie gewaltig sein.

So brodeln das Nichts: Kurzzeitig blitzt Energie auf, quasi verliehen vom Vakuum. Aus ihr formen sich gemäß Einsteins Formel $E=mc^2$ Paare von Teilchen und Antiteilchen. Kaum entstanden, treffen die gegensätzlichen Partikel wieder aufeinander und löschen sich in einem Blitz aus – die geliehene Energie wird ans Vakuum zurückgezahlt. Weil die Teilchen unfassbar kurzlebig sind, werden sie als „virtuell“ bezeichnet.

Aber verstößt das nicht gegen eins der grundlegendsten Naturgesetze – die Energieerhaltung? Energie, so das Dogma, kann niemals entstehen oder vernichtet werden. Doch die Quantenphysik fügt eine Klausel hinzu: „In Zeitspannen, die uns im Alltag vertraut sind, existiert Energieerhaltung praktisch perfekt“, erklärt der Physiker Alfred Leitenstorfer. „Für kurze Momente können sich virtuelle Teilchen aber durchaus Energie aus dem Vakuum borgen.“ Je kürzer die Leihdauer, desto höher der Kreditrahmen.

Leitenstorfer will dieses ständige Entstehen und Vergehen der virtuellen Teilchen sichtbar machen. In seinem Konstanzer Labor sucht er nach dem Rauschen des Nichts.

Seine Experimente sehen nicht so aus, wie man es von einem Forscher erwarten würde, der sich mit dem Vakuum beschäftigt: keine luftdichten Kammern, keine Pumpen, keine Kühlung. Nur ein Laser, ein paar Spiegel und optische Elemente. Materie stört ihn nicht, denn er jagt virtuelle Photonen, also Lichtteilchen. Streng genommen ist das Nichts, das er erforscht, nicht Leere, sondern Dunkelheit.

Sein persönliches Nichts hält Leitenstorfer in einer hauchdünnen Scheibe aus Zinktellurid. Dieser Kristall aus Zink und Tellur hat eine Besonderheit: Liegt an ihm ein elektrisches Feld an, verändert der Kristall seine Eigenschaften und verlangsamt oder beschleunigt Licht ein wenig. Solch ein Feld erzeugen auch die aus dem Quantenvakuum geborenen Photonen. Dadurch beeinflussen sie Licht, das von außen durch den Kristall fällt – dies lässt sich messen, wenn man schnell genug hinsieht.

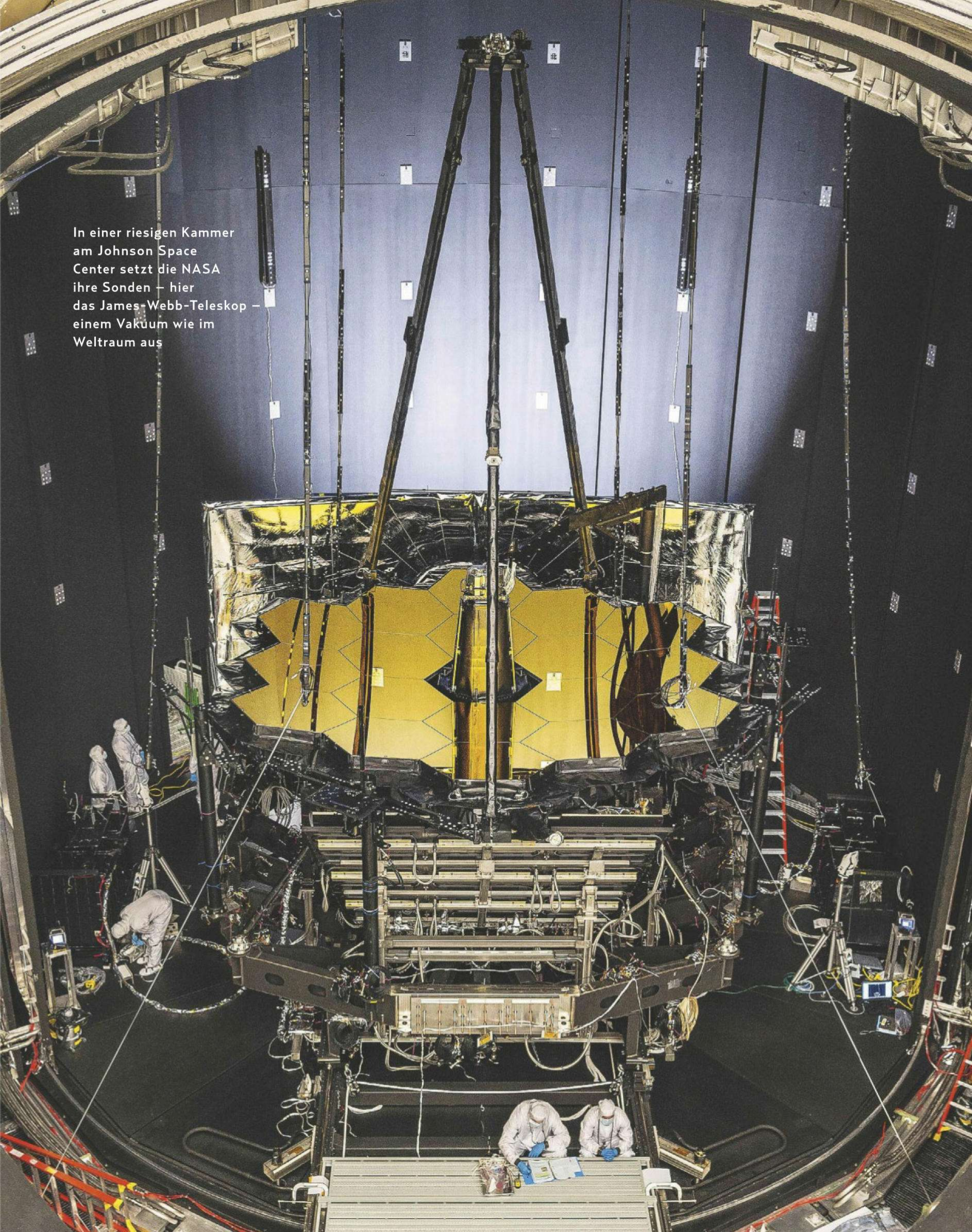
Leitenstorfer hat einen der schnellsten Laser der Welt. Wie mit einem Stroboskop schoss er Lichtblitz um Lichtblitz durch den Kristall und erhielt so Momentaufnahmen mit einer „Belichtungszeit“ vom Millionstel einer Milliardstelsekunde. Zehn Milliarden dieser Bilder fügte er zusammen. Darin entdeckten er und sein Team winzige Veränderungen des Laserlichts: das Abbild der Quantenfluktuationen.

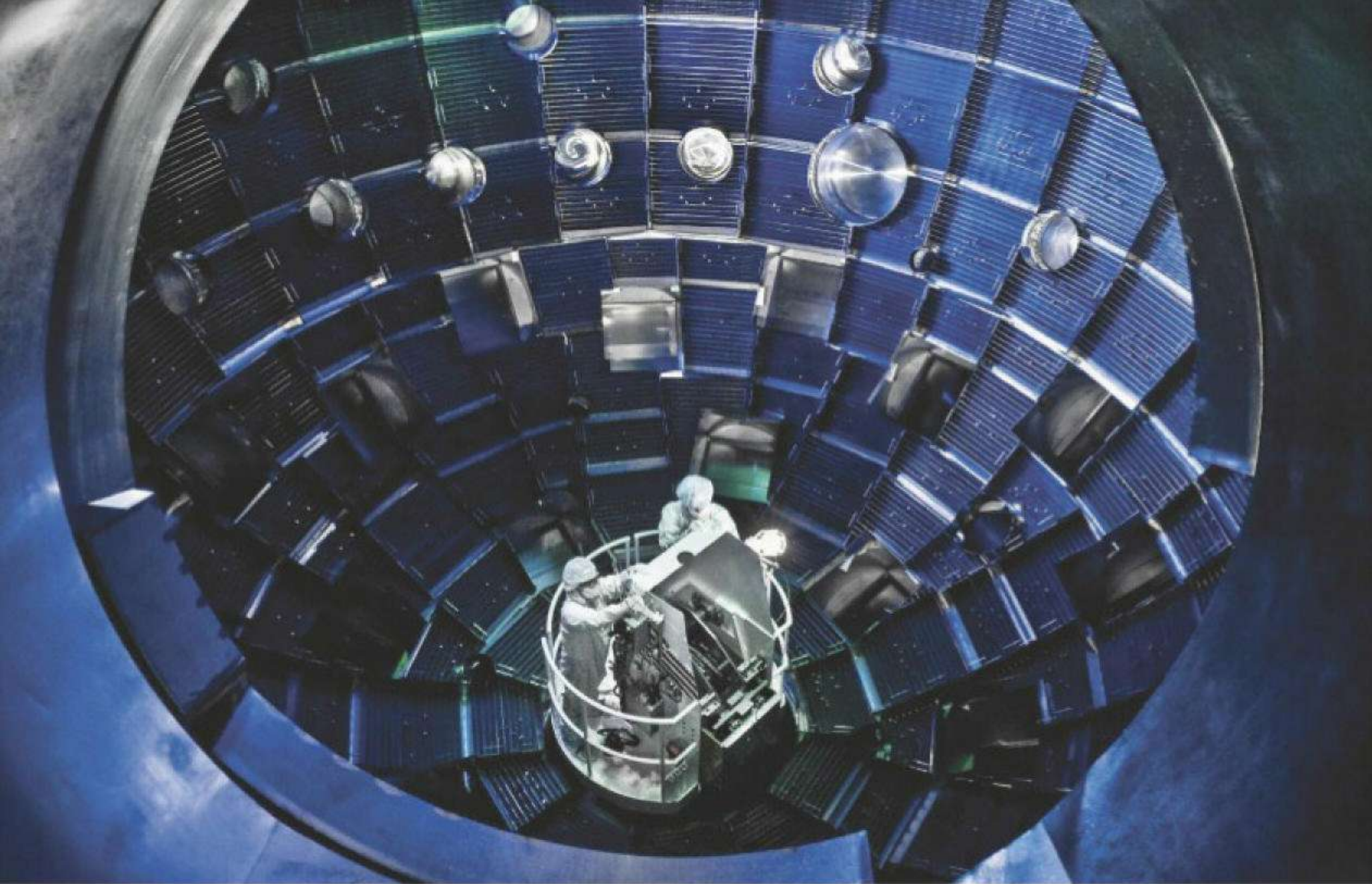
Energie gewinnt er dabei keine, dafür sind die Teilchen zu flüchtig. Als unerschöpfliche Energiequelle, wie Science-Fiction-Autorinnen und Esoteriker sie gern erträumen, ist das Nichts nicht geeignet. „Die Energie der Quantenfluktuationen kann man nicht abgreifen“, betont Leitenstorfer. Je mehr Zeit verstreicht, umso genauer bleibt die Energieerhaltung gewahrt.

Doch was ist mit Casimirs Platten? Sie werden doch von der Kraft des Vakuums bewegt. Lasse sich mit ihnen nicht Energie gewinnen? Nein, denn dafür ist der Effekt zu kurzlebig

**Virtuelle Teilchen borgen
Energie aus dem Vakuum.
Dabei gilt: Je kürzer die
Leihdauer,
desto höher der Kredit**

In einer riesigen Kammer
am Johnson Space
Center setzt die NASA
ihre Sonden – hier
das James-Webb-Teleskop –
einem Vakuum wie im
Weltraum aus





An der National Ignition Facility der USA, einem Institut, das die Kernfusion erforscht, inspiziert ein Team die zentrale Vakuumkammer. In deren Zentrum wird eine Kapsel mit Deuterium und Tritium platziert und mit Laserstrahlen beschossen, um das »Sonnenfeuer« zu zünden

und schwach. Schon das Aufstellen der Platten kostet mehr Energie, als sich aus ihrer Bewegung gewinnen ließe.

Dass der Effekt trotzdem einen Einfluss auf unseren Alltag haben kann, zeigt seine Geschichte. Denn eigentlich ging es Hendrik Casimir bei seiner Forschung gar nicht um ein fundamentales Rätsel der Natur. Für die Industrie untersuchte er in den 1940er Jahren die Eigenschaften von Flüssigkeitsmischungen. Wenn er dabei das Nichts berücksichtigte, konnte er das Verhalten der Flüssigkeitsteilchen besser beschreiben. So kam er auf die Idee für das Experiment mit den zwei Platten.

Was geschieht in ihrem Zwischenraum genau? Die Platten reflektieren virtuelle Teilchen hin und her. Laut Quantentheorie lassen sich diese Teilchen auch als Wellen deuten. Sie formen stehende Wellen wie die Saiten einer Geige, die mit dem Bogen angestrichen werden. Dabei können nur die Wellen schwingen, deren Länge zwischen die Platten passt. Jenseits der Spiegel gibt es keine solchen Einschränkungen. Und so entstehen außen mehr virtuelle Paare als innen und drücken auf die Platten. Die Spiegel rücken aufeinander zu.

Zwar ist die Kraft auf die Platten kaum stärker, als wenn einige Staubteilchen darauf lägen. Doch in der Nanotechnik, wo Objekte und ihre Abstände selbst noch kleiner als Staub sein können, werden solche Kräfte wichtig – etwa, weil sie Bauteile aneinanderheften.

Die Quantenfluktuation

formte die Vergangenheit,
sie **bestimmt** unsere
Gegenwart – und
womöglich auch die Zukunft

Betrachtet man indes das Vakuum im ganzen Universum, kann dessen Kraft sich gewaltig auswirken. Wir könnten dem Brodeln des Nichts sogar die großen Strukturen des Kosmos verdanken – und damit auch unsere eigene Existenz.

Als erster vermutete dies Viatcheslav Mukhanov. Heute ist er Professor für theoretische Physik in München; 1981 war er Doktorand in Moskau und suchte nach einer Antwort auf die Frage, warum in unserem Universum überhaupt Sterne und Galaxien existieren. Denn ganz am Anfang war die Materie gleichmäßig verteilt. Damit sie sich zu größeren Strukturen zusammenklumpen konnte, brauchte es Unterschiede in der Dichte. „Wir wollten die Keime finden, aus denen Galaxien hervorgegangen sind“, erzählt Mukhanov. „Und Vakuumfluktuationen sind das Einzige, was immer da ist.“

Die Lösung des Physikers: Winzige Dichteunterschiede bei den virtuellen Teilchen wurden aufgebläht. Denn kurz nach dem Urknall, so die derzeit gängigste Vorstellung, dehnte sich das Universum für kurze Zeit rasend schnell aus. Bei dieser Inflation könnten Paare aus virtuellen Teilchen und Antiteilchen so schnell so weit auseinandergerissen worden sein, dass sie nicht miteinander verstrahlen konnten – und real wurden.

Wo mehr Partikel zusammengekommen waren, sammelten sich fortan noch mehr. Mit der Zeit wurden die Unterschiede immer stärker, irgendwann kollabierten die dichtesten Teilchenwolken unter ihrer eigenen Schwerkraft – die ersten Galaxien entstanden. Die größten Strukturen im Kosmos sind demnach ein Abbild des winzigen Zitterns des Vakuums.

Dass Experimente seine Ideen eines Tages stützen würden, hätte Mukhanov nicht erwartet. Doch dann gelang dem Satelliten „Planck“ ein hochaufgelöster Schnappschuss der ersten Strukturen des Universums: des kosmischen Mikrowellenhintergrunds. Zu der Zeit, als dieses Licht seine Reise zu uns startete, fanden sich Protonen und Elektronen zu den ersten Atomen zusammen. Die Strahlung weist Fluktuationen auf, deren Eigenschaften genau zu Mukhanovs Vorhersagen passen.

Die Quantenfluktuation formte die Vergangenheit, sie bestimmt unsere Gegenwart – und womöglich auch die Zukunft. Denn derzeit dehnt sich unser Universum erneut exponentiell aus. Forschende bezeichnen die dahinter liegende, bislang unbekannte, aber immer stärker werdende Kraft als Dunkle Energie. Zu Beginn hielt diese Kraft die Gravitation davon ab, das Universum wieder zusammenzuziehen; später wurde sie zur dominanten Energieform und treibt es nun immer schneller auseinander. Auch bei dieser Expansion könnte das Nichts seine Finger im Spiel haben.

Um zu verstehen, wieso, braucht es die Quantenfeldtheorie, jene Weiterentwicklung der Quantenmechanik, die aktuell am besten die Welt des Allerkleinsten erklärt. Sie erweitert die Idee, dass jedes Teilchen auch eine Welle ist. Klassische Wellen wie Licht werden durch Felder beschrieben. In einem Feld ist jedem Ort ein bestimmter Wert zugeordnet – Meereswellen etwa werden durch die Höhe des Meeres an jedem Ort beschrieben. Was also, wenn sich so auch Materie darstellen ließe? Der Grundgedanke der Quantenfeldtheorie ist, dass das gesamte Universum durchzogen ist von Quantenfeldern. Diese Felder beschreiben alles: Teilchen, Strahlung, Wechselwirkung.

Die Teilchen selbst sind Schwingungen in diesen Feldern: winzige Vibrationen, die sich durch das Feld bewegen und miteinander wechselwirken können. Wie im Quantenreich üblich, sind bei den Schwingungen nur bestimmte Frequenzen erlaubt, die jeweils einem bestimmten Zustand eines Teilchens entsprechen. Aus den vielen Quantenfeldern ergeben sich die verschiedenen Elementarteilchen – ob Elektron oder Photon, ob Quarks oder Higgs-Partikel.

Statt einer Kiste voll Murmeln ähnelt das Universum der Quantenfeldtheorie eher einem Musikinstrument mit Saiten – die Elementarteilchen sind die Töne in der Musik des Universums.

Dort, wo das Feld schwingt, hat es besonders viel Energie. Der Zustand, in dem das Feld so wenig Energie wie möglich hat, nennt die Quantenphysik Vakuum: keine Teilchen, kein Licht, keine Wechselwirkungen. Doch die niedrigste mögliche Energiestufe ist nicht null. Im Quantenfeld bleibt immer eine Restenergie. Die virtuellen Teilchenpaare entstehen also nicht völlig aus dem Nichts, sondern sind Schwingungen der Quantenfelder, entstanden aus ihrer Unschärfe.

Die Frage, die sich die Physik stellt, lautet: Ist diese Vakuumenergie womöglich identisch mit der Dunklen Energie? Die beiden haben einige Gemeinsamkeiten: Sie sind überall vorhanden, und beide wachsen mit dem Universum – je mehr Raum, desto mehr Vakuum.

Aus dem Licht von Supernovae, explodierenden Sternen, in fernen Galaxien lässt sich die Ausdehnung unseres Universums experimentell bestimmen – und

damit auch der Wert der Dunklen Energie. Mittels Quanten- und Relativitätstheorie wiederum lässt sich der theoretische Wert der Vakuumenergie berechnen.

Ein Vergleich zeigt aber: Die Diskrepanz ist schwindelerregend. Der theoretische Wert liegt 120 Zehnerpotenzen über dem experimentell ermittelten – das ist eine Eins mit 120 Nullen! Die Größen eines Atomkerns und unserer Milchstraße trennen nur etwa 36 Zehnerpotenzen. „Wenn die Vakuumenergie tatsächlich so groß wäre wie der berechnete Wert, gäbe es uns gar nicht – keine Sterne, keine Galaxien. Das Universum hätte sich seit frühester Zeit immer schneller ausgedehnt“, sagt Fabian Schmidt, Kosmologe am Max-Planck-Institut für Astrophysik in Garching. „Das ist also auf jeden Fall falsch.“

Manche sprechen von der „schlechtesten theoretischen Vorhersage in der Geschichte der Physik“. Es ist eines der großen Rätsel der Kosmologie: Wie kann die Theorie einen Wert ergeben, der so gewaltig ist – und so gewaltig daneben liegt?

Schmidt sieht die Frage gelassen: „Relativitätstheorie und Quantentheorie sind inkompatibel. Dass etwas komplett Falsches herauskommt, wenn man sie naiv kombiniert, ist nicht völlig überraschend.“ Mit einer funktionierenden Theorie der Quantengravitation könnte das Problem sich von allein lösen – das ist aber noch Zukunftsmusik (siehe Seite 128).

In der Zwischenzeit suchen Forschungsteams experimentell nach Hinweisen zur Lösung des Rätsels: Mehrere Teleskope, die die Expansion des Universums genauer als je zuvor kartografieren sollen, stehen bereit. Der ESA-Satellit Euclid soll 2022 starten; das Vera C. Rubin Observatory in Chile öffnet etwa ein Jahr später die Augen. Sollten sie herausfinden, dass Dunkle Energie nicht gleichmäßig im All verteilt ist, wäre die

Vakuumenergie als Erklärung aus dem Rennen: Vom Nichts gibt es – im Großen und Ganzen – überall gleich viel.

Sollte jedoch die Vakuumenergie tatsächlich für die Expansion verantwortlich sein, würde diese niemals enden: Das Vakuum würde das Universum immer schneller auseinandertreiben, bis alle Materie zur Unkenntlichkeit ausgedünnt ist.

Am längsten blieben Schwarze Löcher bestehen. Doch nicht einmal die gewaltigsten Massemonster halten dem Nichts auf lange Sicht stand. Auch an ihrem Rand, dem Ereignishorizont, entstehen virtuelle Teilchenpaare. Zuweilen stürzt ein Partner hinein, der andere entkommt als Hawking-Strahlung ins All (siehe Seite 122). Das Schwarze Loch muss die Energierechnung dafür bezahlen: Es verliert Masse, wird immer kleiner und zerstrahlt letztendlich komplett.

So würden die letzten Zeugen des erfrierenden Universums in einem Blitz aus Hawking-Strahlung verschwinden. Zurück bliebe das Nichts – und darin, unmessbar kurz, ein nie verbbendes Aufflackern von allem.

Fein, feiner, am feinsten

Staubteilchen können auf Metallplättchen ähnlich viel Kraft ausüben wie der auf Quantenphänomenen beruhende Casimir-Effekt. Als **Bettina Süsse** vom **G+J Quality Board**

das las, wollte sie genauer wissen:

Wie klein kann Staub sein, um im Nanobereich eine Rolle zu spielen?

Eine wichtige Kategorie ist Feinstaub, dessen Partikel einen Durchmesser bis zu 10 Mikrometer, einem

Hundertstelmillimeter, haben können.

Er entsteht bei Verbrennungen und durch Reifenabrieb und kann tief in die menschlichen Bronchien eindringen.

Noch kleiner ist Ultrafeinstaub:

Der umfasst Partikel zwischen einem und 100 Nanometer. Zu dieser

Größenkategorie zählen auch

Coronaviren – so winzig, dass sie für unser Auge unsichtbar sind.

Hinterm

Schwarze Löcher sind Orte ohne Wiederkehr, heißt es. Aber das stimmt nicht. Die Massemonster geben Informationen über das, was sie geschluckt haben, wieder preis. Nur wie geschieht das? Darüber ist heftiger Streit entbrannt

Text: Klaus Bachmann

gibt's ein

Horizont

KOSMISCHER BAGEL

Das erste Bild eines Schwarzen Lochs zeigt einen roten Ring aus heißer Materie, die um das Zentrum der Galaxie M87 kreist. Im dunklen Kern sitzt ein Moloch mit 6,5 Milliarden Sonnenmassen

Zurück

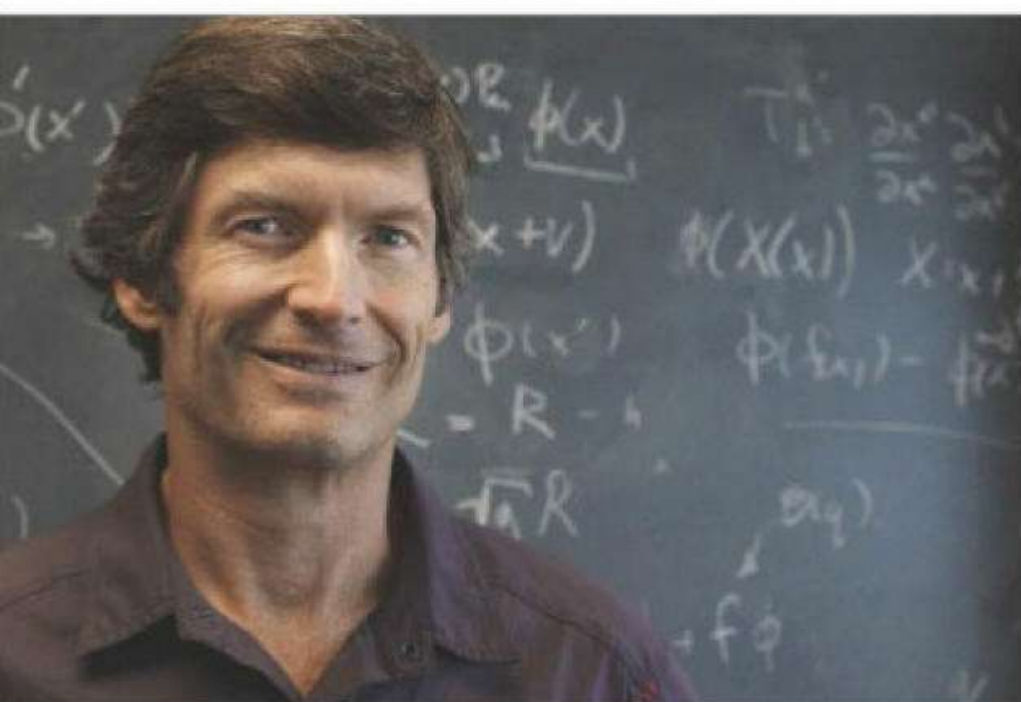


Spaghetti oder Grillsteak? Wie würden Sie lieber enden, wenn Sie, mal rein hypothetisch, in die Verlegenheit kämen, in ein Schwarzes Loch zu fliegen? Die Frage mag wie Spielerei anmuten, aber sie führt auf ein heißes Feld der Physik.

Aber sehen Sie erst, was hinter den Alternativen steckt. Die erste läuft wie folgt: Der Anflug auf das kosmische Schweremonster bliebe lange ereignislos. Keine besonderen Vorkommnisse – nicht einmal beim Überqueren des Ereignishorizonts, jener Grenze, jenseits derer es kein Zurück mehr gibt, hinter der die Anziehungskraft so mächtig wirkt, dass selbst mit Lichtgeschwindigkeit kein Entrinnen mehr möglich ist. Je

DER REFORMER

Der Theoretiker Steve Giddings von der University of California fordert ein neues Konzept von Raum und Zeit, um die Massemonster zu verstehen



tiefer Sie in das Schwarze Loch fielen, desto heftiger zerrte die Gravitation an Ihnen, an den vorausfallenden Füßen stärker als am Kopf. Und dann wäre es so weit: Sie würden in die Länge gezogen wie ein Spaghetti, länger und länger, bis zum Zerreißen.

Die zweite Alternative ist schnell erzählt: Nix da mit freiem Fall bis ins vernichtende Zentrum der Finsternis. Auf Höhe des Ereignishorizonts prallten Sie auf eine undurchdringliche Feuerwand, hinter der Raum und Zeit endeten. Und Sie würden augenblicklich gegrillt.

Pasta oder Barbecue: Glücklicherweise brauchen Sie die Wahl nicht zu treffen. Denn das nächste Schwarze Loch ist Hunderte Lichtjahre entfernt, weit außerhalb der menschlichen Reichweite. Wer sich aber durchaus entscheiden muss, sind die Physikerinnen und Physiker. Und die debattieren heftig über die Alternativen, reden sich die Köpfe heiß, was denn nun der Wahrheit näher kommt. Neben Feuerwand und Spaghettifizierung sind weitere Ideen im Rennen. Regelmäßig kommen neue hinzu.

Es geht bei dieser Debatte um viel, um sehr viel. Steve Giddings, Theoretiker an der University of California in Santa Barbara, spricht gar von „einer Krise der Physik“, die an den tiefsten Fundamenten rüttelt.

Die tiefsten Fundamente sind: Albert Einsteins Allgemeine Relativitätstheorie, zuständig dafür, das ganz große Getriebe des Universums zu erklären, die Bahnen der Planeten, den Zusammenhalt der Ga-



SPITZENGESPRÄCH

Auf einer Tagung diskutieren der 2018 verstorbene Stephen Hawking und Juan Maldacena über den Informationsgehalt Schwarzer Löcher

laxien; und auf der anderen Seite die Quantenmechanik, deren Einflusssphäre der Mikrokosmos ist, die Welt der Elementarteilchen, der Elektronen und Photonen. Beides sind in ihren jeweiligen Herrschaftsbereichen äußerst erfolgreiche Theorien, mit denen sich die Natur verblüffend präzise beschreiben lässt. In der extremen Umgebung eines Schwarzen Lochs aber, in dem sich Masse unendlich dicht ballt und am Raum-Zeit-Gefüge zerrt, geraten die Konzepte an ihre Grenzen, und es treten eklatante Widersprüche zutage.

Die Wurzeln des Konflikts liegen in den 1970er Jahren. Ausgelöst hat ihn Stephen Hawking, seinerzeit ein noch weitgehend unbekannter Physiker in dem englischen Universitätsstädtchen Cambridge. Er wandte Konzepte der Quantenmechanik auf Schwarze Löcher an und kam zu dem überraschenden Fazit: Die kosmischen Monster sind keineswegs rabenschwarz, sie senden eine schwache Strahlung aus, glühen kaum messbar, was dazu führt, dass sie peu à peu Masse verlieren und am Ende einfach verdampfen (siehe Grafik Seite 125). Bis sich eines völlig aufgelöst hat, vergehen allerdings

Äonen: Ein Schwarzes Loch mit der Masse unserer Sonne würde erst nach einer Zeit verschwinden, für die es keine Worte mehr gibt, nur Zahlen: 10^{67} Jahre, also eine 1 mit 67 Nullen. Unser Universum existiert zum Vergleich erst seit knapp 14 Milliarden Jahren – eine 14 mit 9 Nullen.

Aber wo ist jetzt das Problem? Wo steckt der Konflikt? Hawkings Konzept lässt die Relativitätstheorie unangetastet. So, wie sie es fordert, sieht der Raum in der Nähe des Ereignishorizontes, jener imaginären Grenze in der Leere des Alls, genauso aus wie anderswo, zeichnet sich durch nichts aus. Es gilt die Pasta-Variante: Wer im All unterwegs ist, passiert den Punkt ohne Wiederkehr, ohne etwas zu bemerken, und wird am Ende spaghetti-fiziert.

Zugleich aber wird in Hawkings Modell ein Grundgesetz der Quantenmecha-

nik verletzt. Sie beruht darauf, dass Information in jedem Fall erhalten bleibt. Aus dem kompletten Wissen, wie ein Prozess endet, lässt sich der Ausgangszustand rekonstruieren, zumindest im Prinzip. Dies ist ein Dogma, genauso sakrosankt wie das von der Erhaltung der Energie in der klassischen Physik.



Mit dem Verdampfen des Schwarzen Lochs aber, so Hawking, geht die gesamte Information über all die Objekte verloren, die das Schwerkraftmonster geschluckt hat. Es bliebe verborgen, ob der Moloch einen Stern oder todesmutige Weltraum-

reisende verzehrt hat. Nichts mehr wäre darüber zu erfahren, da die nach Hawking benannte Strahlung von ihrer Natur her ungeeignet ist, Auskunft über das Innere des bizarren Gebildes zu geben.

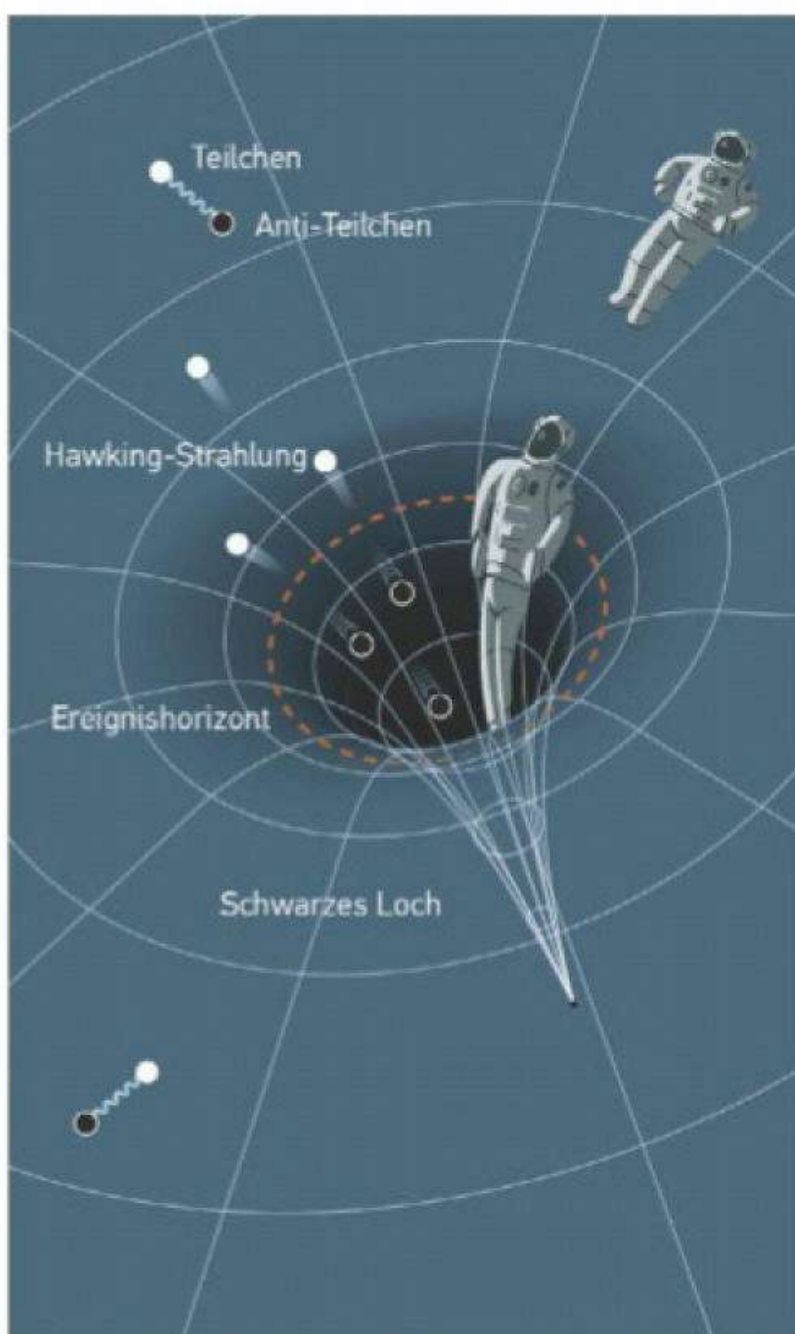
Das Informationsparadox war in der Welt. Stephen Hawking war sich seiner Sache so sicher, dass er mit seinem US-amerikanischen Kollegen John Preskill wettete, dass nichts, absolut nichts aus dem Schwarzen Loch nach außen dringe. Der Gewinner sollte eine Enzyklopädie erhalten.

Die Quantenmechanik-Gemeinde war in Not. Doch sie kämpfte sich zurück. Vor allem die Ideen eines Mannes brachten sie erheblich voran: die des Physikers Juan Maldacena vom Institute for Advanced Studies in Princeton, Albert Einsteins letztem Wirkungsort.

Der gebürtige Argentinier Maldacena arbeitet an der Stringtheorie, einem Gedankengebäude, nach dem Elementar-

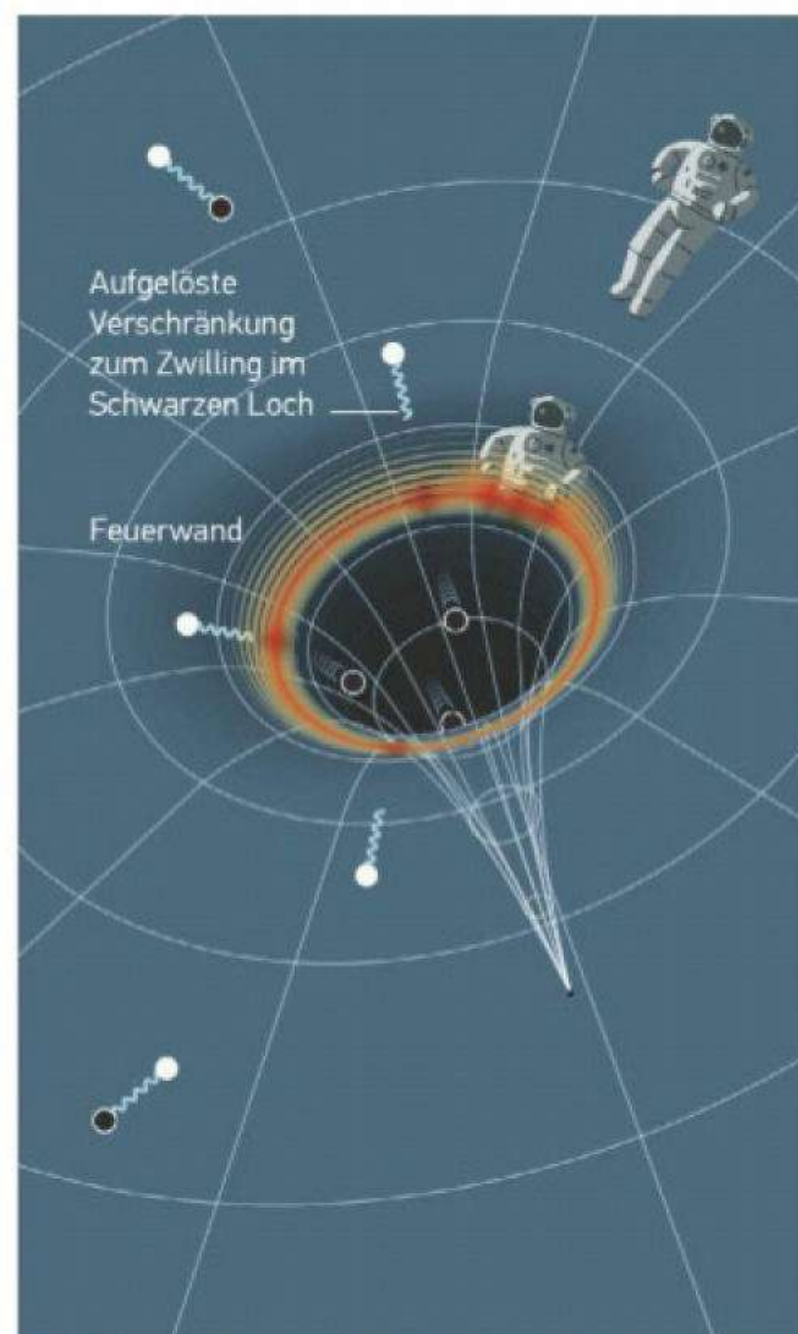
DIE KLASSISCHE HYPOTHESE

Im All bilden sich stetig verschränkte Paare. Am Ereignishorizont werden solche Paare getrennt: Das Teilchen entkommt als Hawking-Strahlung, sein Antipartner stürzt hinein. Dessen Information geht verloren, wenn sich das Schwarze Loch auflöst



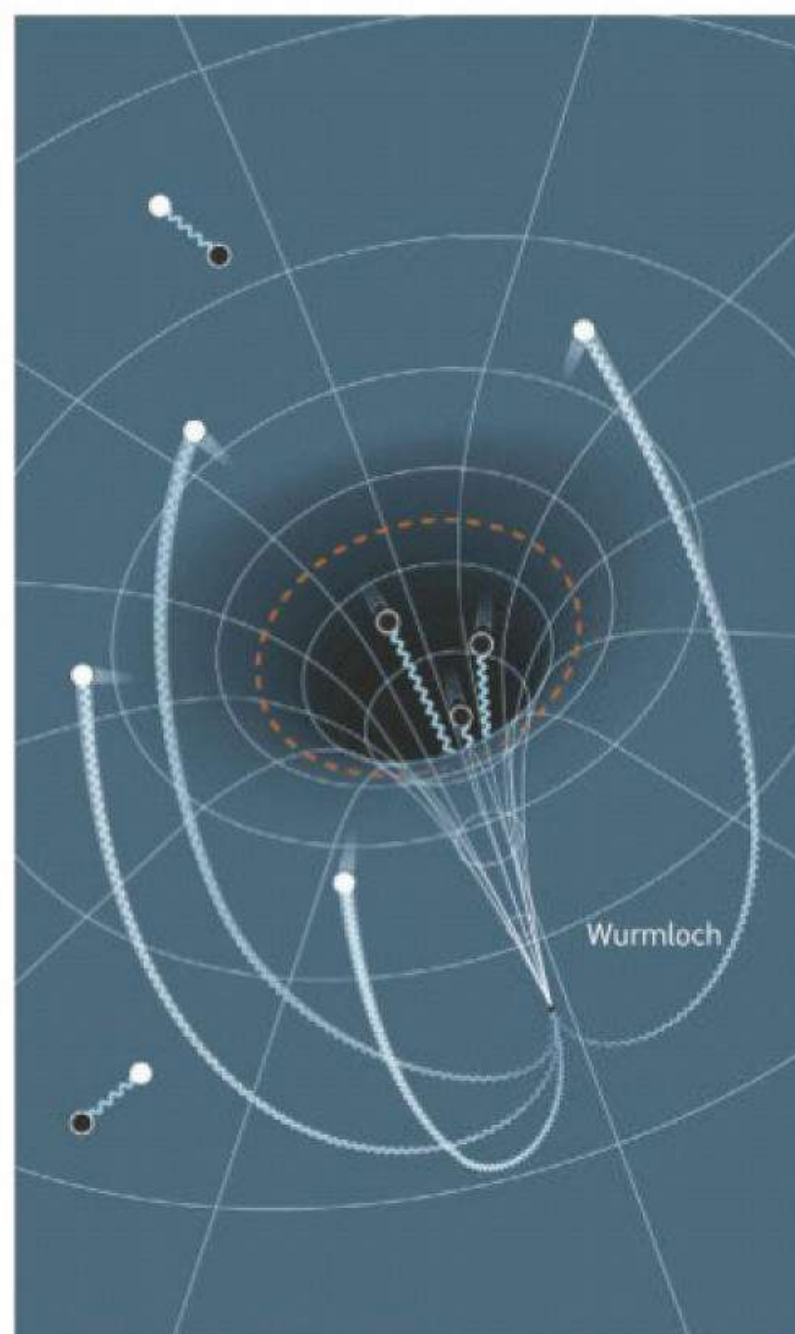
DIE FEUERWAND-HYPOTHESE

Zwischen Teilchen und Antiteilchen besteht eine unsichtbare Verbindung. Reißt diese am Ereignishorizont, werden enorme Energien frei: die „Feuerwand“. Immerhin: Die Information des Antiteilchens bleibt mit dem Flucht-Teilchen erhalten



WURMLÖCHER – DIE LÖSUNG?

Als eine Lösung des Konflikts um Schwarze Löcher haben Wissenschaftler „Wurmlöcher“ ins Spiel gebracht. Das sind kleinste Tunnel in der Raumzeit, über die Teilchen innerhalb des Massemonsters mit jenen außerhalb verbunden bleiben



DIE DATENJONGLEURIN

Die Informatikerin Katie Bouman war wesentlich daran beteiligt, aus Unmengen auf Festspeichern gelagerter Daten das Bild eines Schwarzen Lochs zu errechnen



teilchen aus unvorstellbar winzigen, schwingenden Fäden, den Strings, bestehen. Auf dieser Basis griff er auf ein völlig verrücktes Modell zurück: Die zweidimensionale Oberfläche unseres dreidimensionalen Universums enthält alle Informationen über den eingeschlossenen Raum inklusive Galaxien, Sternen, Schwarzen Löchern und der sie regierenden Schwerkraft. Ähnlich einem Hologramm, bei dem ein 3-D-Bild aus einer zweidimensionalen Aufnahme hervorgeht.

Das Geschehen in dem zweidimensionalen Weltenabbild lässt sich nun mit Gleichungen beschreiben, die ausschließlich den Regeln der Quantenmechanik folgen. Und diese Regeln umfassen eben auch den Erhalt der Information.

Dieser Zusammenhang zwischen Oberfläche und Raumvolumen gilt auch für ein Schwarzes Loch, wobei die Oberfläche in diesem Fall die „Fläche“ des virtuellen Ereignishorizontes ist. Auf ihr befindet das Wissen über den Inhalt des Massemonsters.

Maldacenas Beweisführung beeindruckte die meisten Fachleute derart, dass die Veröffentlichung zu einer der meistzitierten Arbeiten der Physik avancierte.

Quantenmechanik und Relativitätstheorie schienen sich zu vertragen. Der Konflikt schien gelöst, sehr zur Erleichterung der Physikgemeinde. Ein Kollege

dichtete gar das Lied „Macarena“, einen weltweiten Hit der 1990er Jahre, auf Maldacena und seinen Erfolg um.

2004 gab auch Hawking klein bei, die Entwicklungen der vorangegangenen Jahre hatten ihn überzeugt, dass aus einem Schwarzen Loch doch Information tröpfelt. Anlässlich einer Tagung in Dublin gestand er seine Niederlage ein und überreichte seinem Wettpartner John Preskill „Die endgültige Baseball-Enzyklopädie“, 2688 Seiten schwer.

Nur: Noch immer wusste niemand, wie Informationen aus dem Inneren von Schwarzen Löchern heraussickern. „Wir alle nahmen halt an, es werde schon eine einfache Antwort geben“, sagte der 2018 verstorbene Joseph Polchinski, der bis zu seinem Tod am Kavli Institute im kalifornischen Santa Barbara tätig war. Mit seinem Team hatte er sich auf die Suche nach einer Lösung begeben. Aber statt eine einfache Antwort zu finden, deckte er bei genauerer Analyse einen neuen Widerspruch auf. Der Konflikt war wieder da. Heftiger denn je.

Bei den Berechnungen stellte sich nämlich heraus: Wenn die Information erhalten bleibt, umhüllt nahe dem Ereignishorizont eine Feuerwand das Schwarze Loch, eine Schicht energiereicher Partikel, in der ein Astronaut augenblicklich gegrillt würde. Die Barbecue-Variante.



EIN PAUKENSCHLAG

Im April 2019 präsentierte ein internationales Team die erste Aufnahme eines Massemonsters im Kern einer Galaxie (siehe Seite 122/123). Zwei Jahre hatte die Gruppe Informationen ausgewertet, die von Radioteleskopen weltweit stammten

Der Horizont ist in dem Modell eine reale physikalische Wand. Sie ist das Ende des Raums, dahinter geht es nicht mehr weiter. Aber eine Feuerwand unvermittelt im leeren Raum – das widerspricht der Relativitätstheorie.

Und nun? Vielen in der Astrophysik ging es wie Joseph Polchinski: „Mein Kopf glaubt an die Feuerwand.“ Aber sein Bauchgefühl spreche dagegen, sagte er. Intuitiv würde er es bevorzugen, wenn „der Ereignishorizont ein sanfter Ort ist“, wenn jemand, der sich nähert, ganz un-dramatisch die Linie ohne Wiederkehr überquerte.

Seit Jahren dreht sich nun ein Karussell wilder Ideen um das Paradox. Ständig präsentieren Physiker und Physikerinnen neue Ansätze, wie der Konflikt zu lösen sei. Selbst jenen, die in der Astronomie arbeiten und real existierende Schwarze Löcher erforschen, etwa das 4,3 Millionen Sonnenmassen schwere Biest im Zentrum unserer Milchstraße, wird schwindlig angesichts der Vorschläge aus der Theorieabteilung – und oft können auch sie den abstrakten Ausführungen nicht mehr folgen. Von Wollmäusen, Wurmlöchern, scheinbaren Horizonten ist da die Rede.

Samir Mathur von der Ohio State University im US-amerikanischen Columbus betrachtet Schwarze Löcher als Knäuel in die Länge gezogener Strings, jener Fäden, aus denen laut Stringtheorie alle Elementarteilchen bestehen. Das Gebilde mit einer komplizierten höher-

dimensionalen Geometrie ähnelt einer Wollmaus – Mathur spricht von „fuzzball“. Es hat keinen Ereignishorizont im hergebrachten Sinne, sondern eine fusselige Oberfläche. Da alle Materie in dem Modell letztlich aus Strings besteht, werden ins Schwarze Loch stürzende Objekte von der Oberfläche absorbiert, und die enthaltenen Informationen bleiben dort verschlüsselt erhalten.

Juan Maldacena, der Erfinder der holographischen Welt, und Leonard Susskind von der Stanford University wagen sich weit vor, dorthin, wo es streng nach Science-Fiction riecht: Lichtteilchen, die paarweise am Ereignishorizont entstanden und getrennte Wege gegangen seien – das eine ins Schwarze Loch, das andere in die Tiefe des Alls –, könnten, so der Vorschlag, durch Wurmlöcher, kleinste Tunnel in der Raumzeit, miteinander ver-

knüpft oder, wie es in der Physik auch heißt, verschränkt bleiben. So ließe sich das Informationsparadox lösen und gleichzeitig die Entstehung einer Feuerwand umgehen.

Kurz vor seinem Tod 2018 mischte sich Stephen Hawking gemeinsam mit zwei Kollegen noch einmal in das wilde Treiben ein. Schwarze Löcher hätten „weiche Haare“, postulierte das Trio. Sie seien umgeben von einem Flaum aus Photonen, und in dieser Frisur steckten Informationen darüber, was einst in das Massemonster hineingefallen sei. Fachleute nahmen die Veröffentlichungen zurückhaltend auf, die Autoren selbst erklärten, ihre Idee sei auch noch nicht die Lösung für das Informationsparadox.

Steve Giddings plädiert für einen radikaleren Schnitt: „Unsere Vorstellungen von Raum und Zeit brauchen eine gründ-

liche Revision.“ Der Physiker von der University of California hat ein eigenes Konzept für Schwarze Löcher formuliert. Demnach tragen sie einen „Quantenhalo“, wie er es nennt. In der Umgebung der kosmischen Schwergewichte fluktuieren die Raumzeitgeometrie. In Wechselwirkung mit dem Schwarzen Loch biege und kräusle sie sich und gebe so Informationen preis.



Wie andere Forschende in der Astrophysik setzt Giddings auf die neuen Möglichkeiten, Schwarze Löcher zu beobachten. Mit Gravitationswellendetektoren gelang es 2015, die Erschütterungen der Raumzeit zu registrieren, die sich nach der Kollision zweier Massemonster durch das Universum ausbreiten. Mit dem Event Horizon Telescope (EHT), bei dem mehrere Radioteleskope weltweit zusammengeschaltet werden, konnte 2017 erstmals ein Schwarzes Loch – im Zentrum der Galaxie M87 – „fotografiert“ werden. Wenn die Methoden noch feiner werden, lassen sich, so die Hoffnung, einige Szenarien zur Lösung des Informationsparadoxes ausschließen.

Aber so weit ist noch nicht. Derzeit kursieren viele Vorschläge, aber ein Konsens ist nicht in Sicht. In einem ist sich die Physikgemeinde indes einig: Um Widersprüche zu lösen, muss sie ans Eingemachte gehen. Steve Giddings vergleicht die Situation heute mit der vor gut 100 Jahren, als die Grenzen der klassischen Physik immer deutlicher zutage traten und schließlich die Quantenmechanik eine neue, umfassendere Beschreibung der Natur hervorbrachte.

Der hin und her wogende Konflikt ums Schwarze Loch könnte am Ende in die Erfüllung eines alten Traums münden: die beiden widerstreitenden Konzepte – Quantenmechanik und Relativitätstheorie – in einer Theorie, der Quantengravitation (siehe Seite 128), zu vereinen. Das wäre dann fast schon so etwas wie eine Weltformel: Spaghetti mit Grillgut.

Computersimulation

Die Macht der Masse

Die NASA-Grafik zeigt, was wir von einem Schwarzen Loch sehen können: einen Ring des ihn umgebenden heißen Gases. Weil die Schwerkraft des Massemonsters das Licht beugt, erscheint der Ring dreidimensional verzerrt

Akkretionsscheibe

Um das Schwarze Loch kreist eine Scheibe aus heißer, leuchtender Materie. Sie fließt zum Schwarzen Loch hin. Weil dieses somit wächst, heißt der Ring Akkretionsscheibe, von lateinisch *accretio* für Zunahme

Lichtbeugung 1

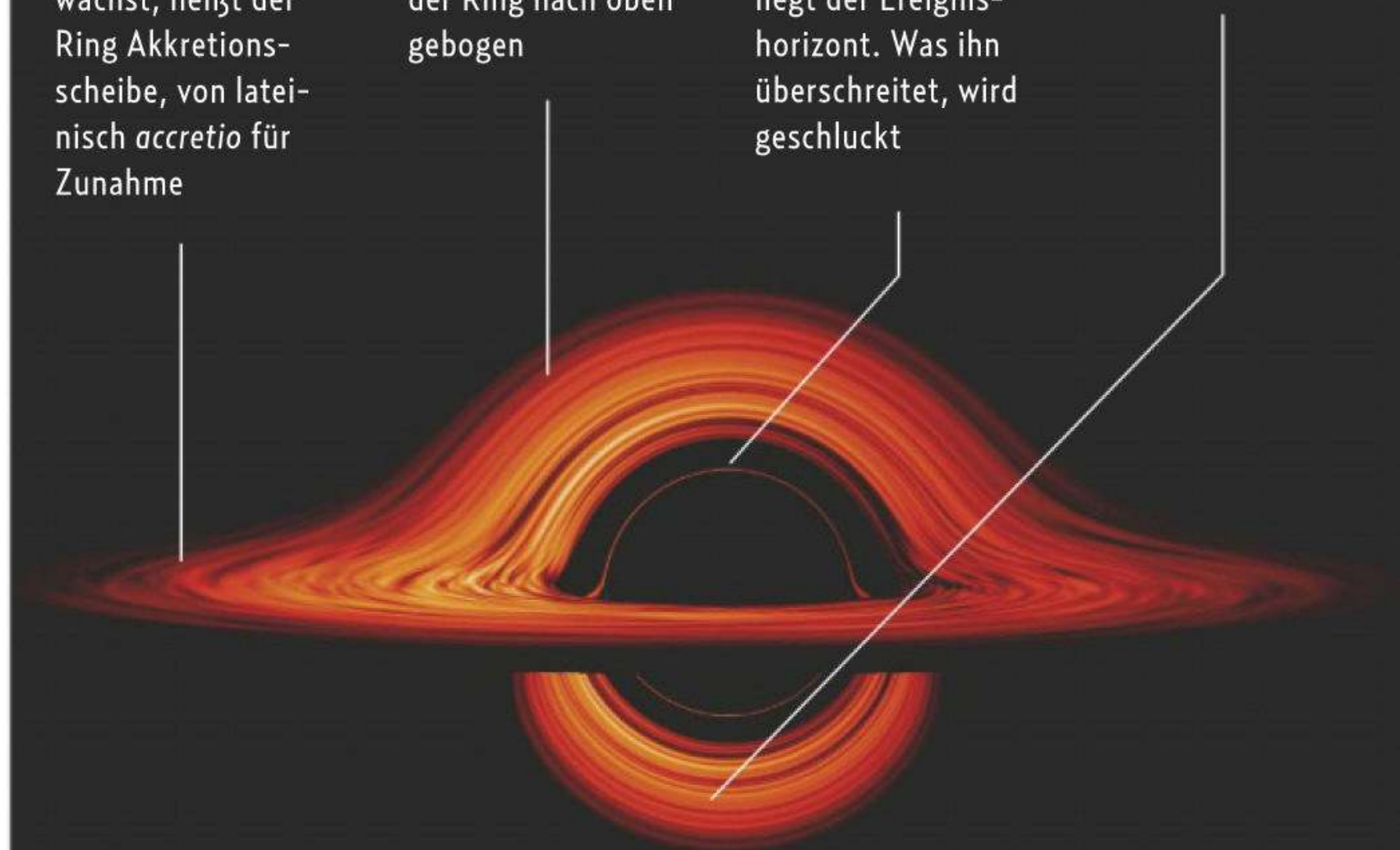
Die Lichtstrahlen, die vom hinteren, oberen Teil der Akkretionsscheibe ausgehen, werden so umgelenkt, dass es aussieht, als sei der Ring nach oben gebogen

Photonenring

Der feine Ring entsteht aus Photonen, die das Schwarze Loch umkreist haben, bevor sie entkommen konnten. Innerhalb des Rings liegt der Ereignishorizont. Was ihn überschreitet, wird geschluckt

Lichtbeugung 2

Das Gravitationsfeld verbiegt das Licht vom hinteren Teil der Scheibenunterseite so stark, dass sie nach unten geklappt erscheint



Ringen

nächste

Es sind zwei, die sich nicht vertragen – Quantenphysik und Relativitätstheorie. bleibt nur eines: die beiden zu fusionieren. Am Ende könnte ein radikal anderes



um die *Revolution*

Text: **Alexander Stirn**

RÄTSELHAFTE SCHÖNHEIT

Am Anfang waren nur einzelne Teilchen, heute ist der Kosmos erfüllt von riesigen Strukturen wie unserer Milchstraße (hier ein Blick in deren Zentrum). Welche Rolle Schwerkraft und Quanteneffekte bei dieser Evolution jeweils übernommen haben, liegt im Dunkeln

Wo sie aufeinandertreffen, knirscht es. Um die Welt umfassend zu erklären, Verständnis von **Raum und Zeit** stehen



Am Anfang war der Apfel, und die Welt war noch in Ordnung – jedenfalls die physikalische: Der Apfel, das folgerte der englische Mathematiker Isaac Newton, fällt vom Baum, weil er von der Erde mit ihrer deutlich größeren Masse angezogen wird.

Doch je weiter sich die Physik in den nachfolgenden Jahrhunderten in diese Frage einarbeitete, je mehr Theorien sie auf- und je mehr Berechnungen sie anstellte, desto vertrackter wurde die Sache mit dem Apfel. Oder, genauer genommen, mit der Schwerkraft.

Verantwortlich ist dafür nicht zuletzt Albert Einstein. In seiner Allgemeinen Relativitätstheorie führte der geniale Physiker einen neuen Begriff ein, um die Schwerkraft zu erklären: die Raumzeit. Sie allein sprengt die Grenzen der Vorstellungskraft, handelt es sich bei der Raumzeit doch um ein vierdimensionales Gewebe aus Raum und Zeit, das durch Masse verbeult wird und so Schwerkraft auf andere Massen ausübt.

Vergleichen lässt sich die Raumzeit mit einem Trampolin: Liegt darauf eine Kugel, delt sie den Stoff ein. Alles, was ringsherum auf dem Sprungtuch liegt, bei-

spielsweise ein Apfel, rollt dann die Schräge hinab auf die Kugel zu. So funktioniert Schwerkraft in Einsteins Raumzeit – nur eben vierdimensional.

Verglichen mit Newtons simpler Mechanik ist die Relativitätstheorie weit weniger intuitiv. Doch sie erklärt das Geschehen im Universum enorm präzise.

Dann allerdings kam die Quantenmechanik und brachte alles durcheinander – bis heute. Im Quantenuniversum hat eine Kugel, solange niemand hinschaut, gar keinen festen Ort. Sie liegt zugleich hier und da und auch dort drüben. Nur: Wo verbeult sie dann das

Sprungtuch? An allen Orten? An keinem? Oder lediglich dort, wo später ein Beobachter sie entdecken wird?

Wann immer Physiker und Physikerinnen in Gedanken Quantenobjekte in Einsteins Raumzeit platzieren, stoßen sie auf solch verwirrende Fragen. Es scheint, als würden die Quantenphysik und die Relativitätstheorie ganz verschiedene Welten beschreiben – dabei sollen sie doch gemeinsam unsere Welt erklären.

Der Ausweg? Die Forschenden müssen Quantenphysik und Relativitätstheorie fusionieren, müssen also

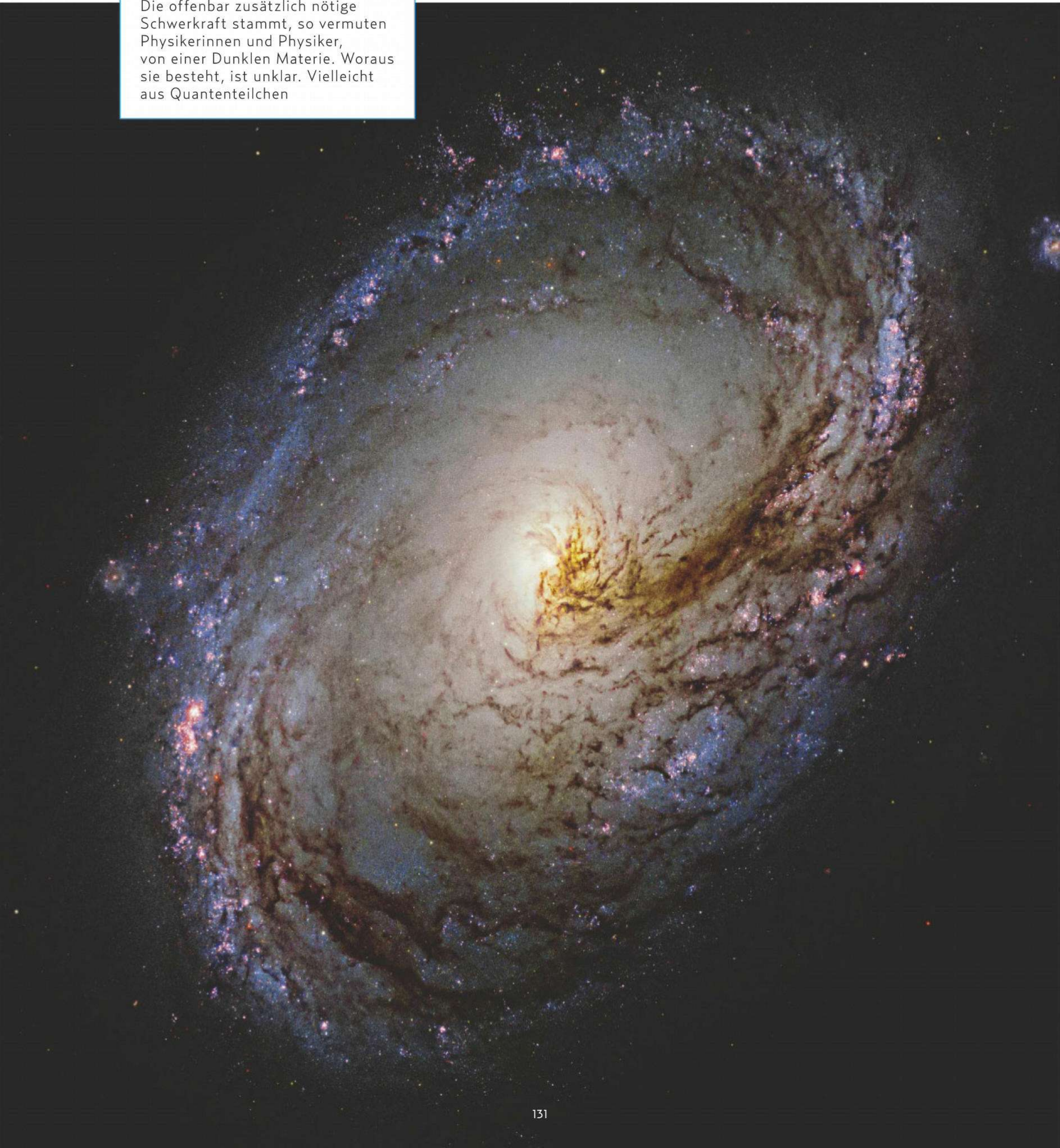
Quantenphysik und Relativitätstheorie

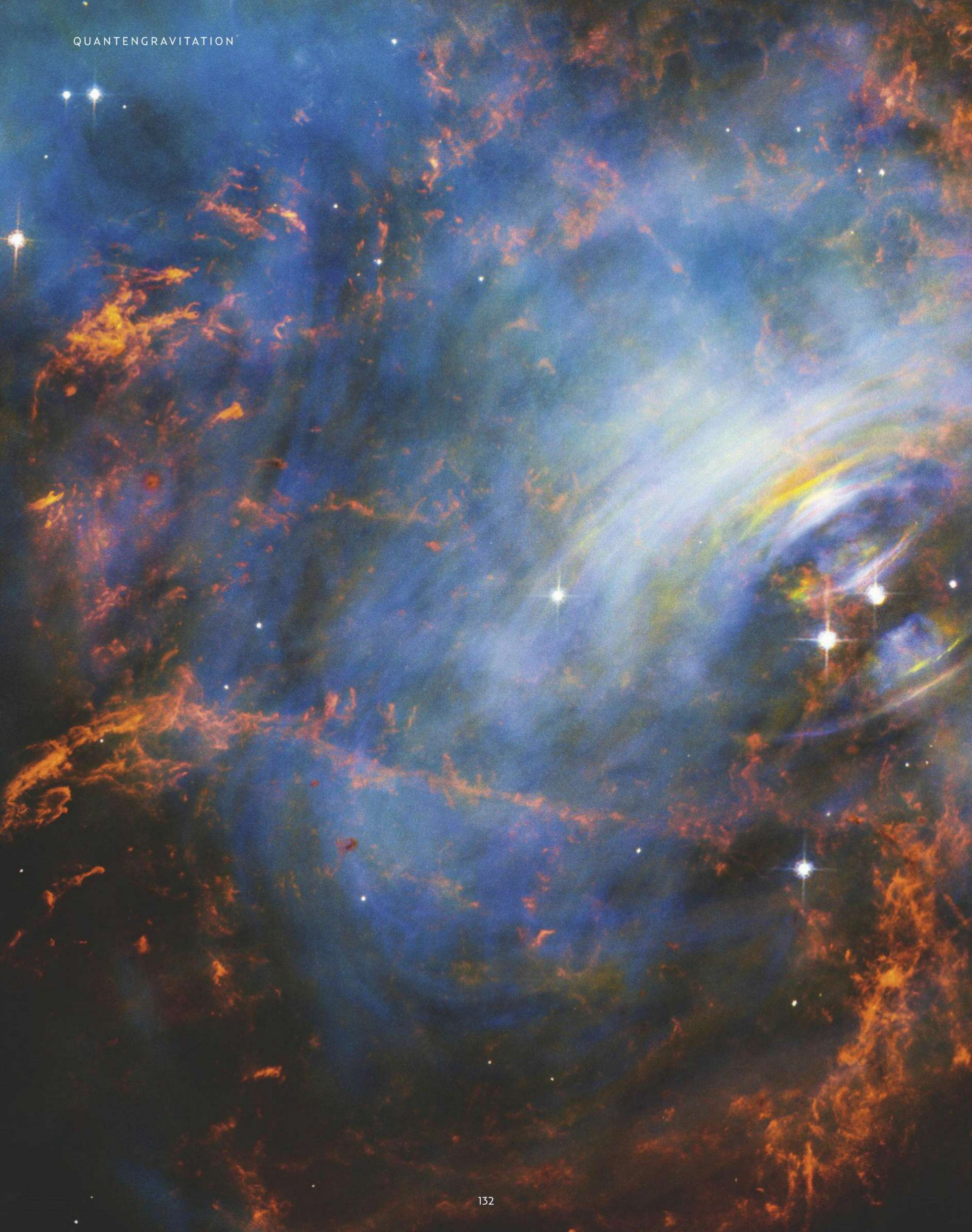
sind so andersartig, sie scheinen verschiedene Welten zu beschreiben – dabei sollen sie eigentlich

gemeinsam unsere Welt erklären

MYSTERIÖSE ANZIEHUNG

Die sichtbare Materie von Galaxien wie Messier 96 reicht wohl nicht aus, um den Zusammenhalt der Sternensinseln zu erklären. Die offenbar zusätzlich nötige Schwerkraft stammt, so vermuten Physikerinnen und Physiker, von einer Dunklen Materie. Woraus sie besteht, ist unklar. Vielleicht aus Quantenteilchen







WIDERSTREITENDE KRÄFTE

Mitten im Krebsnebel implodierte ein Stern. Doch statt eines Schwarzen Lochs entstand ein Neutronenstern (der rechte der beiden hellen Sterne im Zentrum des Bildes). Die Quanten hatten sich gegen den Kollaps der Raumzeit gestemmt

die Schwerkraft quantenphysikalisch beschreiben: als Quantengravitation. Gelänge dies, wäre es mehr als nur die Lösung eines physikalischen Problems. Es wäre nicht weniger als eine Revolution.

Die Quantengravitation würde erklären, wie die Welt beschaffen sein muss, damit die quantenförmige Materie den Raum beeinflussen kann. Womöglich müssten Raum und Zeit dazu selbst aus Quanten bestehen, aus kleinen Elementen. Aber dann wäre die Raumzeit nicht mehr so lückenlos-kontinuierlich, wie wir sie uns vorstellen, sondern womöglich körnig.

Eine Fusion beider Theorien könnte unsere Vorstellung von der Welt, von ihrer inneren Zusammensetzung, daher einmal mehr radikal verändern. Und sie könnte, so die Hoffnung in der Wissenschaft, endlich den Weg ebnen für eine umfassende Beschreibung der Natur. Für eine Weltformel, wie es in der Physik durchaus selbstbewusst heißt.

Allerdings: Alle bisherigen Versuche, die Gravitation in Quantenform zu pressen, haben mehr Fragen aufgeworfen als Antworten geliefert.



Immerhin, im Alltag macht sich die Rivalität der zwei Theorien nicht bemerkbar. Der Apfel fällt auch ohne deren Vereinheitlichung vom Baum, wie wir es seit eh und je gewohnt sind. Dass sich die beiden Weltbeschreibungen geschickt aus dem Weg gehen, liegt in ihrer unterschiedlichen Natur.

Die Quantenphysik dominiert den Mikrokosmos, das Zusammenspiel der kleinsten Objekte, in der Regel auf kleinsten Distanzen. Die Partikel gönnen sich Unschärfen: Sie befinden sich an mehreren Orten zugleich; erst beim Nachschauen entscheiden sie sich per Zufall für einen.

Die Allgemeine Relativitätstheorie hingegen ist für das Große verantwortlich: für Planeten, für Sterne und Galaxien. Zufälle und Unschärfen sind in ihr nicht vorgesehen. Stattdessen sind Objekte zu jeder Zeit auf präzise zu berechnenden Bahnen unterwegs, alternativlos, als kämen sie auf Gleisen daher.

Wann immer Forschende hinschauen, sehen sie nur je eine Theorie dominant am Werk – die andere verschwindet dahinter.

Allerdings gibt es, fernab des Alltags, auch Momente, an denen sich die beiden Theorien in die Quere kommen. Etwa gleich zu Beginn unseres Universums:

Damals war – so der aktuelle Wissensstand – alle Masse des Kosmos auf einen Punkt konzentriert, bevor sie im Urknall zum heutigen Universum expandierte. Singularität heißt in der Relativitätstheorie jener unendlich zusammengepresste Startpunkt.

d

Der Begriff »Singularität« ist in Wirklichkeit aber Ausdruck des Scheiterns der Physik: Hier werden Dinge unendlich klein oder unendlich groß, Formeln liefern plötzlich Unsinn, Theorien laufen ins Leere.

Singularitäten vermuten Forscher und Forscherinnen auch im heutigen Universum, in Schwarzen Löchern. Die Massemonster entstehen, wenn immense Mengen an Materie auf winzigem Volumen zusammengeballt sind. Raum und Zeit werden dabei über alle Maßen verzerrt. So stark, dass die Gravitation immer stärker wird, bis sie irgendwann ins Unendliche schießt, bis sie eine Singularität in die Raumzeit reißt – zumindest besagt das die Relativitätstheorie.

Allerdings dringt hier die Relativitätstheorie in das Hoheitsgebiet der Quantenphysik vor: Weil sich alles auf extrem kleinem Raum abspielt, könnten die Quanten verhindern, dass die Gravitation eine Singularität erschafft. Sie könnten sich dem Kollaps der Raumzeit entgegenstemmen. Nur wie?

Um aus den bislang zwei Theorien ein umfassendes Modell zu formen, würden Forscher und Forscherinnen die Gravitation gern durch die Quantenphysik beschreiben. Das lässt die aber in ihrer bislang bekannten Form nicht zu. Begründet ist dies in Einsteins Gleichungen, die nicht nur den Raum, sondern auch die Zeit als dynamisch beschreiben. In der Raumzeit ist alles miteinander verbunden. „Das ist keine feste Bühne mehr“, sagt Claus Kiefer, Quantenphysiker an der Universität zu Köln. „Sobald ich mich bewege, verändere ich allein durch meine Masse das Gefüge von Raum und Zeit.“

Anders in der Quantenphysik: Dort ist die Zeit ein absoluter Parameter – egal was passiert, sie läuft uneindringlich, wie eine stoisch tickende Uhr. Sämtliche Versuche, Einsteins Gravitation quantentheoretisch zu behandeln, also die dynamische Raumzeit mit der starren Zeit der Quantenphysik zu vereinen, misslingen daher. Es braucht neue Ansätze.

Vielleicht hilft eine Anleihe beim Licht. Einsteins Erkenntnis, dass sämtliche Strahlung in Form kleinster, nicht weiter teilbarer Pakete unterwegs ist, eben als Lichtquanten, hat vor mehr als 100 Jahren die Physik revolutioniert. Sie hat geholfen, die Welt und viele ihrer zuvor unerklärlichen Phänomene besser zu verstehen. Und das, obwohl sie wenig intuitiv erscheint: Der Sonnenstrahl, der durchs Fenster auf die Haut fällt, fühlt sich an wie eine kontinuierliche Wärmequelle und nicht wie ein Hagel ungezählter kleiner Kanonenkugeln.

Könnte Ähnliches auch auf Gravitation, Raum und Zeit zutreffen? Könnten sie, auch wenn sie sich kontinuierlich anfühlen, auf der fundamentalen Ebene eine granulare Struktur besitzen, die sich erst offenbart, wenn Forschende genau genug hinschauen?

Das behauptet die Theorie der „Schleifenquantengravitation“. Der Raum besteht demnach aus eindimensionalen Fäden, die Schleifen bilden. Die Fäden können sich überschneiden, sie können zusammenkleben. Sie lassen sich sogar verweben, sodass ein dreidimensionales Objekt entsteht, eine Art Tuch.

„Wenn man nicht genau hinschaut, dann scheint dieses Objekt kontinuierlich zu sein“, sagt Martin Bojowald, Schleifenquantengravitationsforscher an der Pennsylvania State University. „Hätten wir allerdings ein äußerst genaues Mikroskop, dann könnten wir theoretisch die einzelnen Schleifen sehen.“

Das Besondere der Idee: Der Raum ist an sich nicht mehr das Grundlegendste, sondern er entsteht erst aus den Schleifen. Sie spannen ihn auf, er wird aus ihnen gewebt.

Bislang ist die Schleifenquantengravitation allerdings noch eine unvollständige Theorie: Um sich das physikalische Leben zu vereinfachen, haben die Köpfe hinter der Idee lediglich den Raum quantisiert und die Zeit vernachlässigt. Die darf allerdings nicht vergessen werden. „Das ist noch immer eines der großen Probleme“, sagt Bojowald. „Bislang ist jedenfalls nicht absehbar, wie das zu schaffen sein könnte.“

In der Schleifen-
quantengravitation ist
der **Raum an sich nicht
mehr das Grundlegendste** –
sondern er wird
aufgespannt, wird
**gewebt
aus Schleifen**



VERBOGENE STRAHLEN

Ein riesiger Galaxienhaufen namens Abell 2218 wirkt wie eine kosmische Linse: Seine Schwerkraft lenkt das Licht von hinter ihm liegenden Galaxien ab. Die ansonsten verborgenen Sternensinseln erscheinen vergrößert und als feine Bögen

Aber die Theorie hat auch ihre Stärken, zum Beispiel bei der Erklärung des Urknalls. Dort ist die Dichte so groß, dort sind die Abstände zwischen der Materie so gering, dass akute Singularitätsgefahr besteht. Es braucht einen Puffer – womöglich sind dies die Schleifen: Ähnlich den Poren eines Schwammes, die nur eine bestimmte Menge Wasser aufsaugen können, speichert auch der aus Schleifen bestehende Raum nur begrenzt viel Masse (beziehungsweise Energie – die Physik macht da keinen Unterschied). Demnach existiert eine maximal mögliche Dichte im Universum: Auf dem Volumen etwa eines Protons könnten dann höchstens etwas mehr als eine Billion Sonnenmassen zusammenkommen. „Diese Energie ist zwar unvorstellbar groß, aber noch immer endlich“, sagt Bojowald.

Am Anfang eines Schleifenquantenuniversums

stünde somit kein einzelner Punkt, in der alle Materie vereint war, sondern ein winziges, schwammartiges Gebilde. Wie in der Physik üblich, führt die Lösung zu neuen Überlegungen. Etwa: Wo kam der Urknall-Schwamm her? Aus dem Nichts? Oder ist womöglich ein anderes Universum kollabiert bis zu diesem unheimlich dichten Knäuel aus Schleifen, das sich anschließend wieder ausdehnte?

Allerdings verschwindet in dem Schleifenknäuel die Zeit, jedenfalls in den mathematischen Formeln. „Das Netzwerk an Fäden wird gewissermaßen zu

dicht, um sie hindurchzulassen“, sagt Martin Bojowald. Aber wann beginnt dann die Zeit, wann fängt das Universum an? Erst mit dem expandierenden Kosmos? Oder doch schon im Vorgängeruniversum, zu dem es zwar keine zeitliche, aber eine räumliche Brücke gibt?

Angesichts so vieler ungeklärter Fragen präferieren manche Physikerinnen und Physiker einen anderen Ansatz. Sie wollen nicht nur Raum und Zeit quantisieren: Sie wollen sämtliche Naturkräfte und die Materie in einem neuen, fundamentalen Konzept vereinen. In einer Art Weltformel.

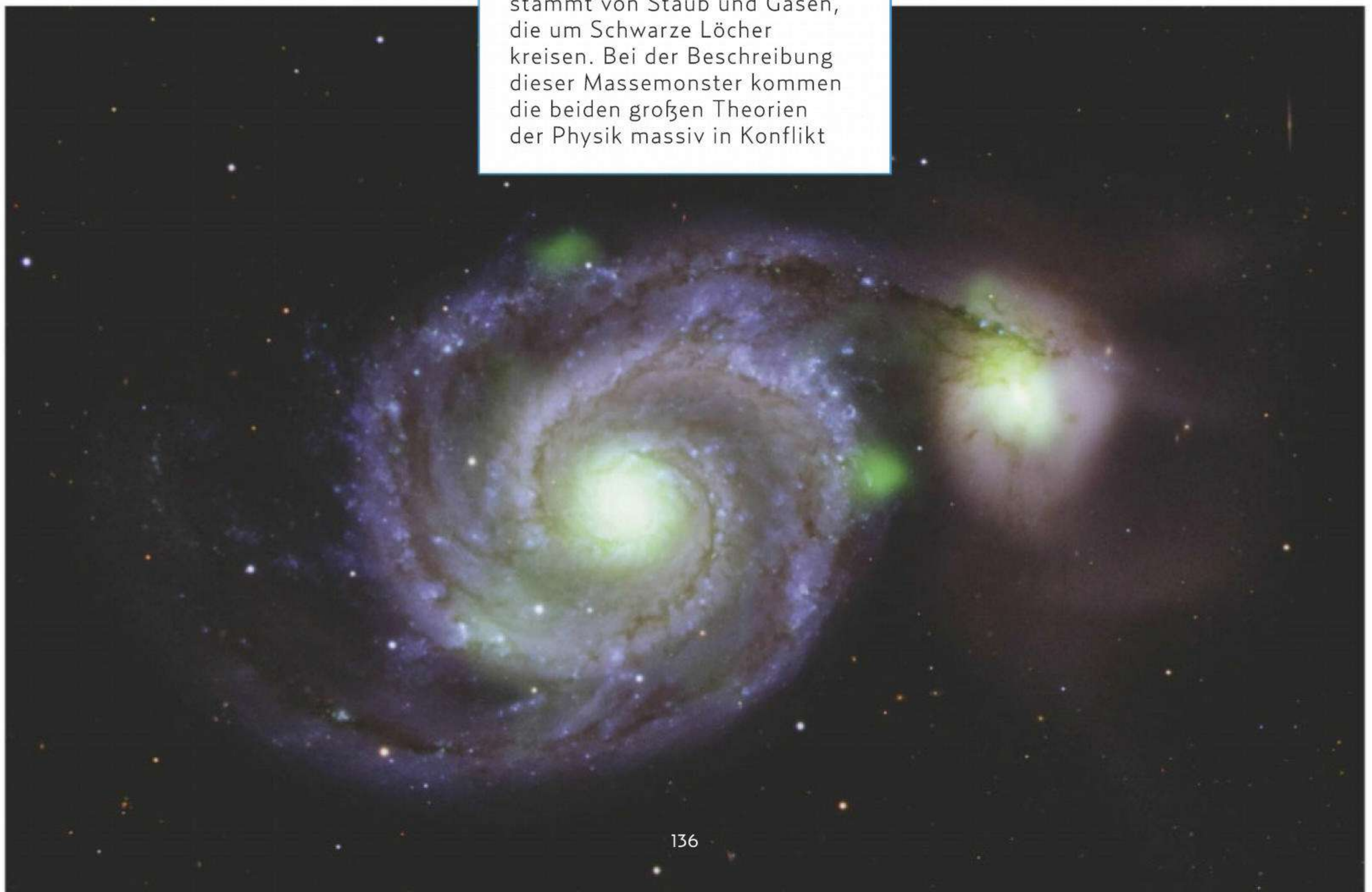
Die Stringtheorie fasst die Elementarteilchen als grundlegende Bausteine der Welt nicht punktförmig, sondern als eindimensionale Saiten (englisch: Strings) auf. In dem Modell entstehen Materie sowie die altbekannten Kräfte der Gravitation oder des Elektromagnetismus, indem diese Saiten angeregt werden und zu schwingen beginnen.

Der große Vorteil des Konzepts: Die Strings haben eine Mindestlänge. Etwas Winzigeres kann es nicht geben – und somit auch keine Singularitäten. Der große Nachteil: Um die Theorie mathematisch konsistent zu formulieren, sind zehn oder elf Dimensionen nötig, in manchen Versionen sogar 26 – und nicht nur vier, wie bei der ohnehin schon unvorstellbaren Raumzeit Einsteins.

Doch so hoffnungslos komplex die Stringtheorie erscheint – sie könnte manch Wundersames der Quantenphysik

EXTREME ORTE

Das hellgrün dargestellte Leuchten in den Zentren der Whirlpool-Galaxie M51a und ihrer kleinen Begleiterin stammt von Staub und Gasen, die um Schwarze Löcher kreisen. Bei der Beschreibung dieser Massemonster kommen die beiden großen Theorien der Physik massiv in Konflikt



sik verständlicher machen. Etwa die **Verschränkung**: Objekte, so will es die Quantentheorie, können über große Entfernungen hinweg physikalisch verknüpft sein, und das, obwohl keine erkennbare Verbindung zwischen ihnen besteht. Oder vielleicht doch?

Auf den ersten Blick hat diese Verschränkung nichts mit der Gravitation zu tun. Der argentinische Stringtheoretiker Juan Maldacena argumentiert jedoch, dass die Verschränkung kleinster Elemente des Universums womöglich die Raumzeit erst entstehen lässt – und damit indirekt auch die Schwerkraft. Es könnte der lange gesuchte Zusammenhang zwischen Quantenphysik und Gravitation sein.

U

Und es hätte weitere, fantastische Auswirkungen. Theoretisch kann die Raumzeit derart stark verbogen werden, dass sich Verbindungen zwischen zwei verschiedenen Orten im Universum ergeben. Beobachtet wurden solche vermeintlichen Tunnel durch Raum und Zeit noch nicht, aber die Formeln der Relativitätstheorie lassen ihre Existenz zu. Die Physik spricht von Wurmlöchern. Erzeugen nun verschränkte Objekte die Raumzeit – und damit letztlich die Wurmlöcher –, könnten diese Tunnel verschränkte Teilchen miteinander verbinden. Was bislang als ausgeschlossen galt, eine direkte physikalische Verbindung zwischen weit entfernten Zuständen, könnte somit doch möglich sein.

Mehr noch: Mit diesem Zusammenhang ließe sich womöglich sogar ein Formelwerk erschaffen, das zeigt, wie Quantenmaterie generell Raum und Zeit verändert. Dann wäre womöglich auch das Geheimnis anderer quantenphysikalischer Kuriositäten gelöst – etwa die verzwickte Frage, wo ein Quantenobjekt die Raumzeit beult, wenn man nicht hinschaut.

Oder geht alles doch viel einfacher? Sind eventuell keine Schleifen, Strings oder Extradimensionen nötig, müssen Raum und Zeit vielleicht doch nicht in kleinste Bestandteile zerdacht werden? Das zumindest glaubt

Laut Stringtheorie
entsteht alle Materie
aus winzigen
schwingenden Saiten.
Doch wenn die Theorie
stimmt, besitzt unser
**Universum bis zu
26 Dimensionen**

Astrid Eichhorn, theoretische Physikerin an der Syddansk Universität im dänischen Odense: „Auf dem Weg zu einer Quantentheorie der Gravitation brauchen wir womöglich gar keine radikal neuen Konzepte. Wir brauchen vielmehr einen anderen Blickwinkel auf bereits bekannte Ideen.“

Die Physik stand schon einmal vor der Aufgabe, ihre Urkräfte mit der Quantenphysik zu versöhnen. Elektromagnetismus, starke und schwache Kernkraft – alle drei wurden auf ähnliche Weise in die Sprache der

Quantenphysik übersetzt. Der Versuch, die gleiche Methode auf die Gravitation anzuwenden, scheiterte aber.

Doch der schon aufgegebenen Ansatz erlebt inzwischen eine Renaissance, unter anderem durch die Forschung von Astrid Eichhorn und Christof Wetterich, Professor an der Universität Heidelberg. Die beiden setzen auf verbesserte mathematische Konzepte – genauer gesagt: auf eine Art Symmetrie zwischen den grundlegenden Kräften der Natur, die bei besonders kleinen Distanzen einsetzen.

Die Theorie heißt asymptotisch sichere Quantengravitation – asymptotisch, weil die Gravitationskräfte nicht mehr ins Unendliche schießen, wenn Materie extrem stark komprimiert wird, sondern sich asymptotisch einem maximalen Wert annähern. Die Gravitation stagniert – die Singularität ist abgewendet.

So weit die Theorie. Inwiefern sie all die Unterschiede und Widersprüche zwischen Quantenphysik und Relativitätstheorie auflösen kann, wird sich zeigen, wenn die Forschenden den Ansatz weiterverfolgen. Immerhin müssen sie dazu nicht erst Raum und Zeit zerschlagen, um ein neues Weltbild zusammenzusetzen.

Eichhorn sagt aber auch: „Es reicht nicht, lediglich ein mathematisch konsistentes Konzept zu entwickeln. Wir müssen auch wissen, ob die Natur sich die gleiche Theorie ausgesucht hat.“ Hier beginnen die Probleme für alle Überlegungen zur Quantengravitation. Denn verglichen mit den anderen Kräften der Natur, etwa dem Elektromagnetismus, ist die Gravitation die mit Abstand schwächste. Es braucht einen ganzen Planeten, um einen Kühlschrank am Boden zu halten, aber es reicht ein kleiner Quader voller Elektronen, damit ein Magnet an dem Kühlschrank haften bleibt.

Entsprechend schwer tun sich Physikerinnen und Physiker, wenn sie Phänomene einer möglichen Quantengravitation untersuchen wollen. Natürlich versuchen sie es trotzdem.

Am Bremer Zentrum für angewandte Raumfahrttechnologie und Mikrogravitation werden Satelliten mitentwickelt, die prüfen sollen, ob das Fallgesetz im Universum wirklich immer gilt. Es besagt, dass alle Objekte gleich schnell fallen. Sollte unsere Raumzeit jedoch körnig sein, müssten Objekte auf winziger Skala holpern, wie ein Fahrrad auf Kopfsteinpflaster. In der Ruhe des Alls könnten Satelliten dies womöglich detektieren.

Forscherinnen und Forscher überlegen auch, isolierte Quantenzustände mit hochpräzisen Gravitationswaagen zu vermessen, um das Wirken der Schwerkraft im Quantenreich zu erkennen. Doch selbst im Erfolgsfall würden solche Experimente nur Indizien für eine quantisierte Gravitation liefern. Welcher der verschiedenen Ansätze recht hat, ließe sich so wohl nicht unterscheiden.

Auskunft darüber könnten im Prinzip Experimente an Teilchenbeschleunigern geben. Forschende gehen jedoch davon aus, dass sich die Wirkung der Quantengravitation – und damit der möglichen Körnigkeit der Raumzeit – erst jenseits einer winzigen Distanz bemerkbar macht, die sie Planck-Länge nennen. Wobei: Diese Entfernung als winzig zu bezeichnen, ist untertrieben. Die Planck-Länge ist, verglichen mit dem Punkt am Ende eines Satzes, etwa so klein wie der Punkt verglichen mit der Größe des gesamten beobachtbaren Universums, sagt Astrid Eichhorn.

U

Um derart tief in Raum und Materie blicken zu können, bräuchte es immense Teilchenbeschleuniger – eine Billiarde Mal so leistungsfähig wie der aktuell energiereichste, der Large Hadron Collider am Genfer CERN. Mit der bisherigen Technologie lässt sich dies wohl nicht erreichen. „Solch ein Beschleuniger müsste die Größe unserer Milchstraße haben“, sagt Quantenphysiker Kiefer. „Ich kenne daher niemanden, der daran glaubt, dass wir die diskrete Natur der Gravitation in unserer Lebzeit direkt sehen werden.“

Die Schwerkraft der Leichtgewichte

Bei der Verifikation dieses Textes faszinierte Dokumentar **Götz Froeschke** aus dem **G+J Quality Board**, dass auch winzige Objekte auf der Erde Schwerkraft erzeugen. Forschungsteams aus Österreich gelang es 2021, die Gravitationskraft zwischen zwei nur millimetergroßen und je rund 90 Milligramm schweren Goldkugeln zu messen. Um diese kleinste jemals gemessene Schwerkraft von nur dem Bruchteil eines Milliardenstel-millineutons zu ermitteln, musste der Versuchsaufbau weitreichend abgeschirmt werden – möglichst sogar von seismografischen Schwingungen durch Fußgänger rund um das Labor. Erst-Autor Tobias Westphal: »Was wir hier eigentlich messen, ist, wie ein Marienkäfer die Raumzeit krümmt.«

Aber ja vielleicht indirekt: Sollten die Momente nach dem Urknall von einer wie auch immer gearteten Quantengravitation dominiert gewesen sein, dann müssten sich deren Effekte ins schnell expandierende Universum eingebrannt haben. Zum Glück gibt es eine Art Babyfoto des Kosmos: Es entstand 380 000 Jahre nach dem Urknall, als das noch heiße Universum langsam durchsichtig wurde. Dieses Babyfoto können wir heute am Rande des Universums erspähen.

In dem Kosmischen Mikrowellenhintergrund, wie das Babyfoto heißt, ist die Materieverteilung des frühen Universums zu erkennen – aber vielleicht auch mehr. Ein Teleskop namens BICEP2, das am Südpol steht, sollte 2014 Spuren der Quantengravitation im Mikrowellenhintergrund ausgemacht haben. Es wäre eine Sensation gewesen, erwies sich bei genauerem Hinschauen aber als Staub in unserer eigenen Galaxis. Ob das Babyfoto jemals etwas über die Quantengravitation verraten kann, bleibt daher unklar. Kiefers Berechnungen zufolge müssten sich darin zwar charakteristische Effekte verber-

gen, diese seien aber „noch immer tausendmal zu klein, um sie zu sehen“.

Die größte Hoffnung, eine Quantengravitation experimentell überprüfen zu können, liegt daher ausgerechnet bei den Schwarzen Löchern. Trotz des Namens sind solche Löcher nicht schwarz, sie geben vielmehr Strahlung ab, wie der britische Physiker Stephen Hawking bereits 1974 postulierte. Dadurch verlieren sie Masse, schrumpfen extrem zusammen und enden irgendwann – so die Hoffnung – in einer gewaltigen Explosion. Der dabei ausgesandte Blitz könnte viel über die Effekte der Quantengravitation verraten. Denn im Moment ihrer Auflösung heben die Schwarzen Löcher gleichsam ihren Schleier und ermöglichen einen Blick auf jenen Ort, an dem Quantenphysik und Relativitätstheorie konkurrieren.

Das Problem: Bislang hat niemand solche aufblitzenden Löcher gesehen. Es könnte sie aber geben: Schwarze Löcher mit der Anfangsmasse eines kleinen Asteroiden, die aus kosmischer Urzeit stammen, hätten genau die richtige Lebensdauer, um jederzeit zu explodieren. Astronominnen und Physiker müssten solche Löcher mit ihren Teleskopen nur finden, und sie müssten im richtigen Moment auf den Auslöser drücken.

Keine kleine Aufgabe, aber es geht schließlich auch um etwas Großes. Es geht um nicht weniger als einen neuen Blick auf Raum und Zeit – und ein tieferes, ein ausgewogeneres Verständnis unserer Welt.

DIE BESTEN SEITEN DER NATUR.



Mehr von Peter Wohlleben im
GEO-Podcast

Peter
und der **Wald**

Quanten kurz

Da unsere Alltagssprache das erstaunliche Treiben im Mikrokosmos nicht fassen kann, hat die Quantenphysik ihre eigene Terminologie entwickelt. Ein Überblick über die wichtigsten Begriffe, von Bohm'sche Mechanik bis Zufall



Bohm'sche Mechanik

Die vom US-Physiker David Bohm in den 1950er Jahren entwickelte Theorie begreift Quantenobjekte als real – sie haben anders als bei der Kopenhagener Deutung auch ohne Beobachtung eindeutige Eigenschaften. Ein Elektron ist demnach stets ein Teilchen, von dem sich der Aufenthaltsort angeben lässt. Was wir als Wellen wahrnehmen, mathematisch beschrieben als **Wellenfunktion**, sei eine Führungswelle, die die Bewegung der Teilchen choreografiert, so postulierte Bohm. Es ist, als surfe etwa ein Elektron auf einer Woge.

Dekohärenz

Mit dem Phänomen der Dekohärenz erklären Physikerinnen und Physiker, dass wir im Alltag keine Quantenphänomene wie etwa Überlagerungen von Zuständen erleben.

In Überlagerungen existiert ein Quantenobjekt vor allem dann, wenn es von seiner Umgebung isoliert ist. Doch das ist meist nur kurz der Fall: Sobald es etwa auf andere Photonen oder Elektronen trifft, verschränken sich die Zustände des Quantenobjekts mit der Umgebung zu einem größeren System. Dabei spalten sich die Zustände auf: Indem sie mit der Umgebung eine Verbindung eingehen, geht die Verbindung zwischen ihnen verloren. Ein Beobachter – selbst Teil der Umgebung – nimmt die Mehrdeutigkeit des Quantenobjekts nicht mehr wahr: Es erscheint ihm nur noch in einem Zustand. Offen bleibt, was mit den anderen Zuständen passiert: Verschwinden sie ins Nichts? Oder existieren sie weiter, so wie es die **Viele-Welten-Theorie** behauptet?



EPR-Paradoxon

Das Paradoxon – eigentlich ein Gedankenexperiment – ist benannt nach den drei Physikern, die es 1935 veröffentlichten: Albert Einstein, Boris Podolsky und Nathan Rosen. Sie wollten damit zeigen, dass die Quantenmechanik – im Gegensatz zur Auffassung von Niels Bohr und Werner Heisenberg – unvollständig sei. Dies sei der Grund, warum die Quantenmechanik Messergebnisse nicht eindeutig vorhersagen könne.

Die Autoren betrachteten zwei miteinander verschränkte Teilchen, die in entgegengesetzte Richtungen fliegen. Ihre Eigenschaften, etwa ihr Spin, sind gemäß der Quantenmechanik zu diesem Zeitpunkt noch nicht

und knapp

Texte: Klaus Bachmann & Martin Scheufens

Illustrationen: Rainer Harf

eindeutig festgelegt. Doch wird am Teilchen A der Spin gemessen, ist automatisch und gleichzeitig – instantan – auch der Spin des weit entfernten Teilchens B festgelegt. Woher weiß Teilchen B, wie sich Teilchen A „entscheidet“? Da Einstein „spukhafte Fernwirkungen“ ablehnte und unbedingt am Prinzip der Lokalität festhalten wollte, hieß das für ihn: Der Quantenmechanik entgingen entscheidende Elemente zur Erklärung der Wirklichkeit. Er irrte in diesem Punkt. Inzwischen ist experimentell bewiesen, dass Quantenobjekte „Fernbeziehungen“ unterhalten, dass die Quantenphysik also nicht-lokal ist.

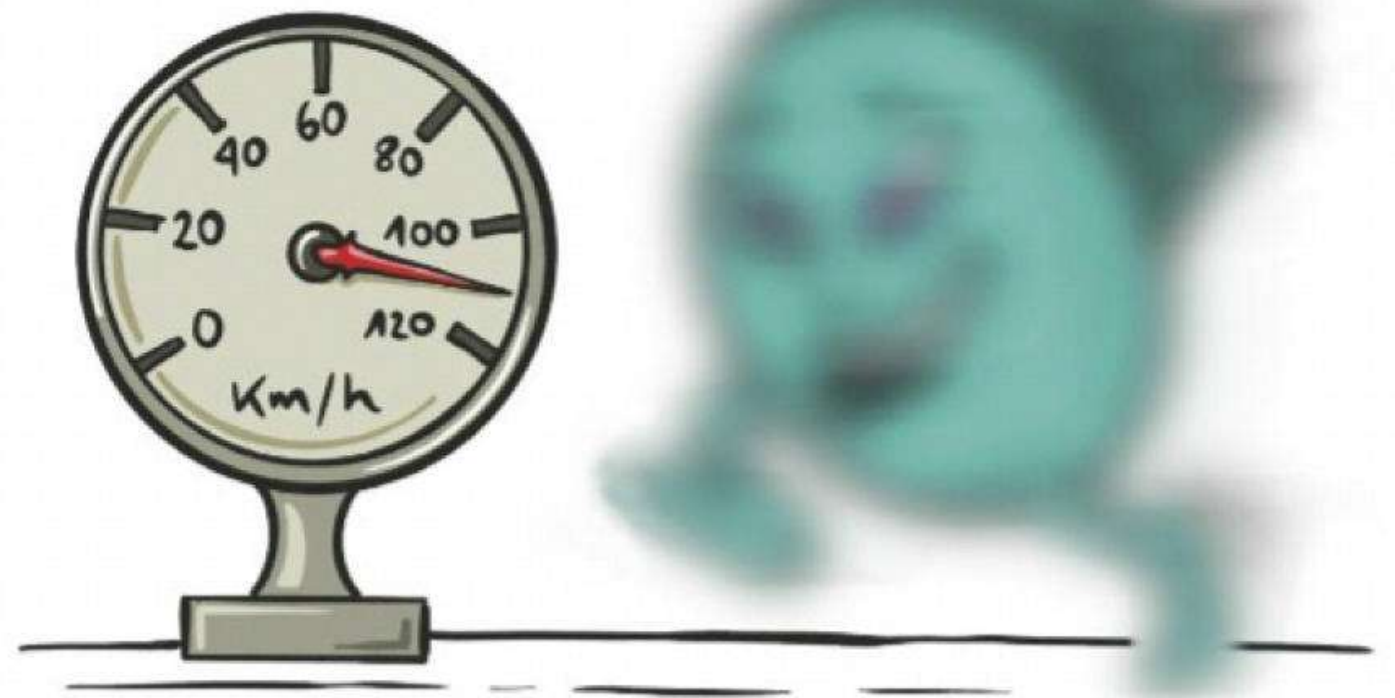
EPR-Paradoxon



Heisenberg'sche Unschärferelation

Werner Heisenberg entdeckte 1927 das Prinzip, dass sich bei bestimmten Paaren physikalischer Größen – etwa Ort und Impuls, Energie und Zeit – nie beide Teile gleichzeitig präzise messen lassen. Je genauer der Ort festgelegt wird, desto unschärfer wird der Impuls eines Quantenobjekts – und umgekehrt. Das Produkt der beiden Messungenauigkeiten kann nicht kleiner werden als das Planck'sche Wirkungsquantum h dividiert durch 4π . Die Unschärfe ergibt sich nicht aus einem technischen Unvermögen, genauer zu messen, sondern ist ein Naturgesetz.

*Heisenberg'sche
Unschärferelation*



Kollaps

Nach der Kopenhagener Deutung hat ein Quantenobjekt keine festgelegten Eigenschaften, solange es nicht vermessen wird. Die Vielzahl seiner möglichen Zustände wird beschrieben durch die Wellenfunktion. Bei einer Beobachtung wird dann von den verschiedenen Möglichkeiten nur eine Realität, alle anderen verschwinden spurlos. In den Worten der Quantenmechanik kollabiert die Wellenfunktion.

In einer Reihe von später entstandenen Theorien, den Kollaps-Modellen, bricht die Wellenfunktion spontan zusammen, ohne Beobachtung oder Messung. Zwar ist die Wahrscheinlichkeit, als einzelnes Teilchen zu kollabieren, extrem gering, finden sich aber viele Teilchen zusammen, so steigt die Wahrscheinlichkeit, dass der Kollaps eines von ihnen trifft – alle anderen Wellenfunktionen in der Umgebung werden dann mitgerissen. So hätten makroskopische Objekte wie Katzen keine Chance, in einer Überlagerung von mehreren Zuständen – zum Beispiel tot und lebendig – zu existieren. Die Kollaps-Theorien liefern daher ein objektiv realistisches Bild der Welt, anders als die Kopenhagener Deutung. Doch was den Kollaps auslöst, dafür können sie bislang keinen Grund liefern.

Kopenhagener Deutung

Die Kopenhagener Interpretation der Quantenmechanik ist benannt nach der Wirkungsstätte von Niels Bohr, einem der Hauptvertreter dieser Deutung. Sie ist kein einheitliches, geschlossenes Gedankengebäude – unter ihrem

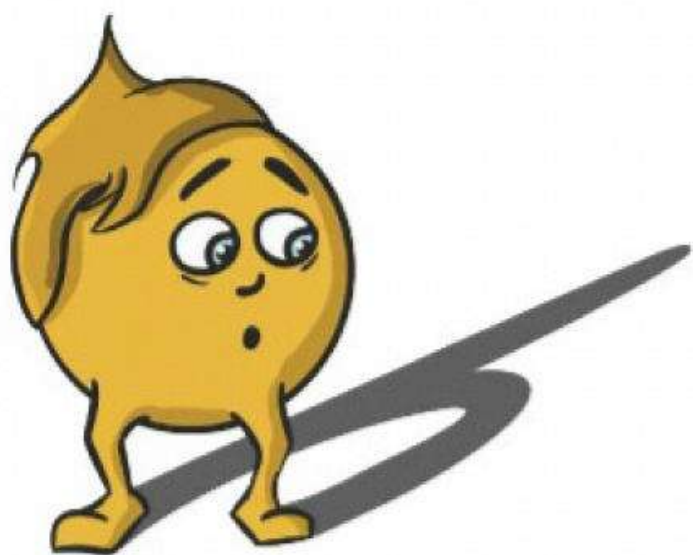
Quanten kurz und knapp

Namen werden mehrere Konzepte zusammengefasst: die Unschärferelation Werner Heisenbergs, Max Borns Wahrscheinlichkeitsinterpretation der Wellenfunktion und das Komplementaritätsprinzip von Niels Bohr (Welle- und Teilchencharakter eines Quantenobjekts sind wie die zwei Seiten einer Medaille). Die Vertreter dieser Denkrichtung stimmten dabei nicht in allen Aspekten überein, gerade Heisenberg und Bohr stritten sich jahrzehntelang über die Rolle des Beobachters und den Kollaps der Wellenfunktion. Dennoch prägten ihre Ideen jahrzehntelang die Diskussionen über die Quantenphysik.

Lokalität

Lokalität ist in der Physik ein Begriff dafür, dass Ereignisse nur Auswirkungen auf die unmittelbare Umgebung haben können, dass also etwas, das hier geschieht, nicht direkt beeinflusst, was dort geschieht. Ausgenommen, es gibt einen Weg, Informationen zu übermitteln, wobei das kosmische Tempolimit, die Lichtgeschwindigkeit, unbedingt eingehalten werden muss. So kann ein Knopfdruck auf der Erde zwar einen Rover auf dem Mars losrollen lassen – aber nicht augenblicklich, sondern per Funksignal mit mehrminütiger Verzögerung.

Ein verstörendes Merkmal der Quantenmechanik ist, dass hier das Lokalitätsprinzip nicht gilt. Quantenobjekte können durch gemeinsame Entstehung oder eine Wechselwirkung so miteinander verbunden – verschränkt – sein, dass sich die Messung oder Manipulation des einen Teilchens gleichzeitig auf das andere auswirkt, selbst wenn es weit entfernt ist.



Planck'sches Wirkungsquantum

Das Planck'sche Wirkungsquantum h ist eine Naturkonstante und taucht in allen Grundgleichungen der Quantenmechanik auf. Der deutsche Physiker Max Planck entdeckte die Konstante, als er 1899/1900 versuchte, die von einem bestimmten glühenden Objekt ausgehende Strahlung zu erklären. Dabei erkannte er, dass Energie immer in

Portionen abgegeben und aufgenommen wird. Diese Vorstellung war ein radikaler Bruch mit der vorherigen Physik. Zuvor galt als selbstverständlich, dass alle Prozesse in der Natur stetig ablaufen. Nun offenbarten sich Stufen in der Natur – und die „Stufenhöhe“ ergibt sich aus dem Wirkungsquantum.

Quant

In der Geschichte der Physik hat sich herausgestellt, dass bestimmte Eigenschaften wie Energie, Spin oder elektrische Ladung nur diskrete Werte annehmen können, die Vielfache einer fundamentalen Größe sind. Diese Grundeinheit ist das Quant. Häufig wird die Bezeichnung Quanten aber auch im weiteren Sinn für Elementarteilchen benutzt, vor allem wenn deren Partikelcharakter im Vordergrund steht.



Quantensprung

Der Begriff stammt aus der Frühzeit der Quantenmechanik. Man dachte, dass Elektronen sprunghaft und instantan von einem Energieniveau auf ein anderes wechseln, ohne jedes Vorzeichen. Inzwischen ist aber klar, dass der „Sprung“ sich sehr wohl ankündigt, graduell verläuft und eine gewisse Zeit dauert. Das konnten Forschende 2019 mit einer Art Hochgeschwindigkeitsdetektor zeigen.

Nach wie vor aber gilt, dass ein Elektron in einem Atom nur bestimmte Energieniveaus einnehmen kann

und dass es beim „Sprung“ auf ein höheres Level zum Beispiel ein Photon absorbiert, dessen Energie genau der Lücke zwischen den beiden Niveaus entspricht. Fällt das Elektron wieder in den Ausgangszustand zurück, wird das Photon wieder ausgesandt. Entsprechend der Größe der Lücke hat das Lichtteilchen eine bestimmte Frequenz und damit eine charakteristische Farbe. Das erklärt, warum Natriumlampen gelb und kupferhaltige Feuerwerksraketen grün leuchten.

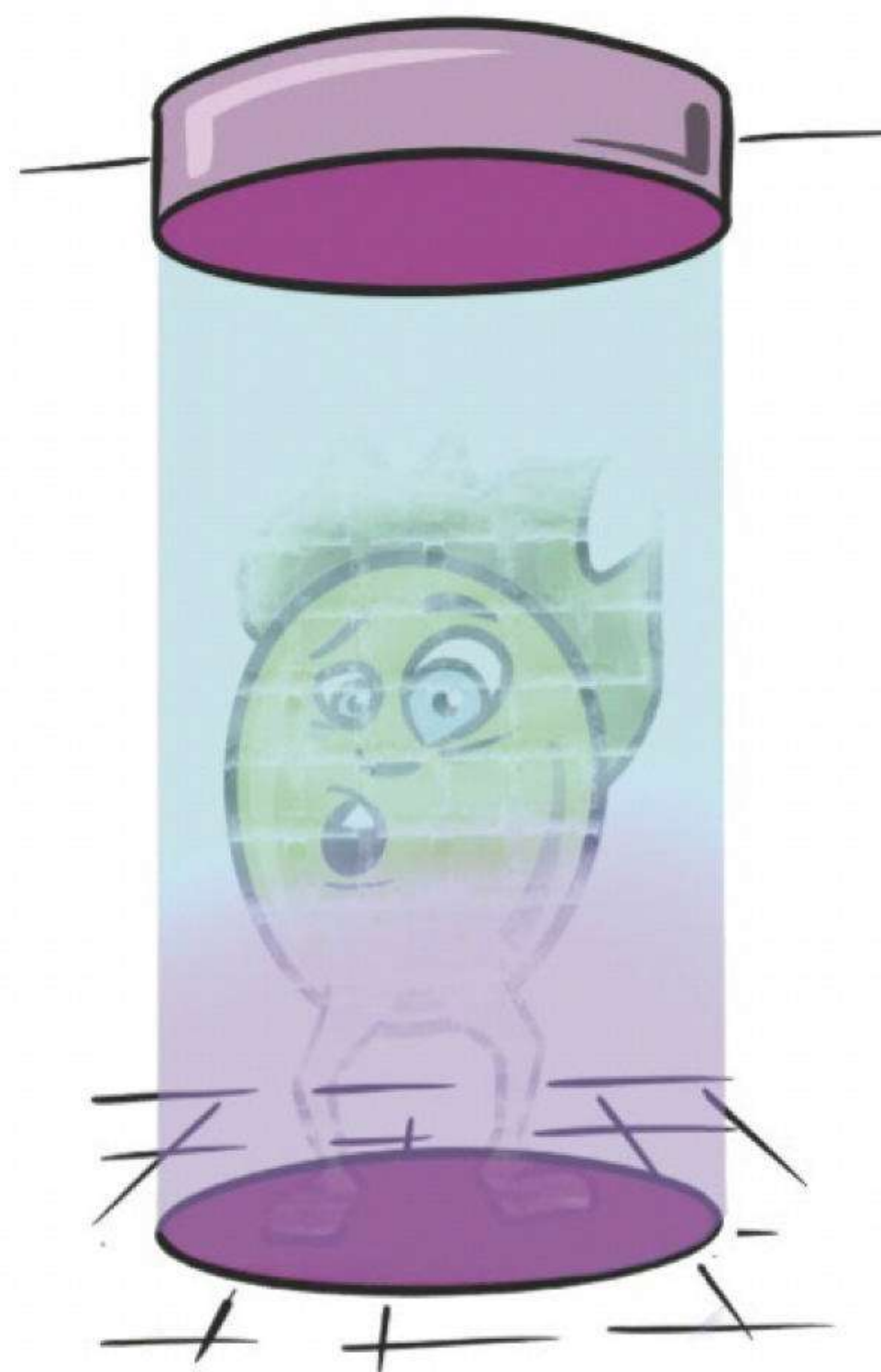
Qubit

Das Quantenbit (Qubit) ist das Analogon zum Bit des klassischen Computers – die Grundlage für die Rechenarbeit und die kleinste Speichereinheit. Herkömmliche Computer und Quantencomputer arbeiten beide mit dem Binärsystem, also Nullen und Einsen. Im klassischen Computer bedeutet zum Beispiel »Strom an« eine 1, »Strom aus« eine 0.

Beim Qubit können sich die beiden Zustände überlagern. Das Qubit ist dann eine Mischung aus 0 und 1. Erst wenn Forschende fragen »Welchen Wert hast du?«, antwortet es eindeutig mit 0 oder 1. Als Qubit eignen sich Atome oder Ionen, die zwei Energiezustände einnehmen können, oder supraleitende Ringe, in denen Strom in einer Überlagerung zugleich rechts- und linksherum fließen kann.

Teleportation

»Beam me up, Scotty!« Einen Menschen von einem Planeten zum Raumschiff zu transferieren klappt leider nur in Science-Fiction-Filmen wie Star Trek. Allerdings existiert in der Quantenwelt ein ähnliches Verfahren. Dabei wird nicht das individuelle Elektron oder Photon selbst über weite Strecken übertragen, sondern sein quantenphysikalischer Zustand.



Um ein Photon zu teleportieren, sind zwei weitere Photonen A und B nötig, die miteinander verschränkt sind – eines am Startort, das andere am Zielort. Photon A wird dann zusätzlich mit dem zu teleportierenden Photon verschränkt. Letzteres wird dabei zerstört, es verliert seinen Zustand – aber seine Informationen gehen augenblicklich auf A und B über. Um den Prozess abzuschließen, muss noch eine fehlende Information auf klassischem Wege (das bedeutet, nicht schneller als mit Lichtgeschwindigkeit) von Ort A zu Ort B übertragen werden. Dann kann Photon B gegebenenfalls noch so verändert werden, dass es sich in eine perfekte Version des initialen Photons wandelt.

Eine Quantenteleportation gelang erstmals 1997. Gut 20 Jahre später ist die Technik so weit, dass sich sogar Zustände von der Erdoberfläche zu einem Satelliten



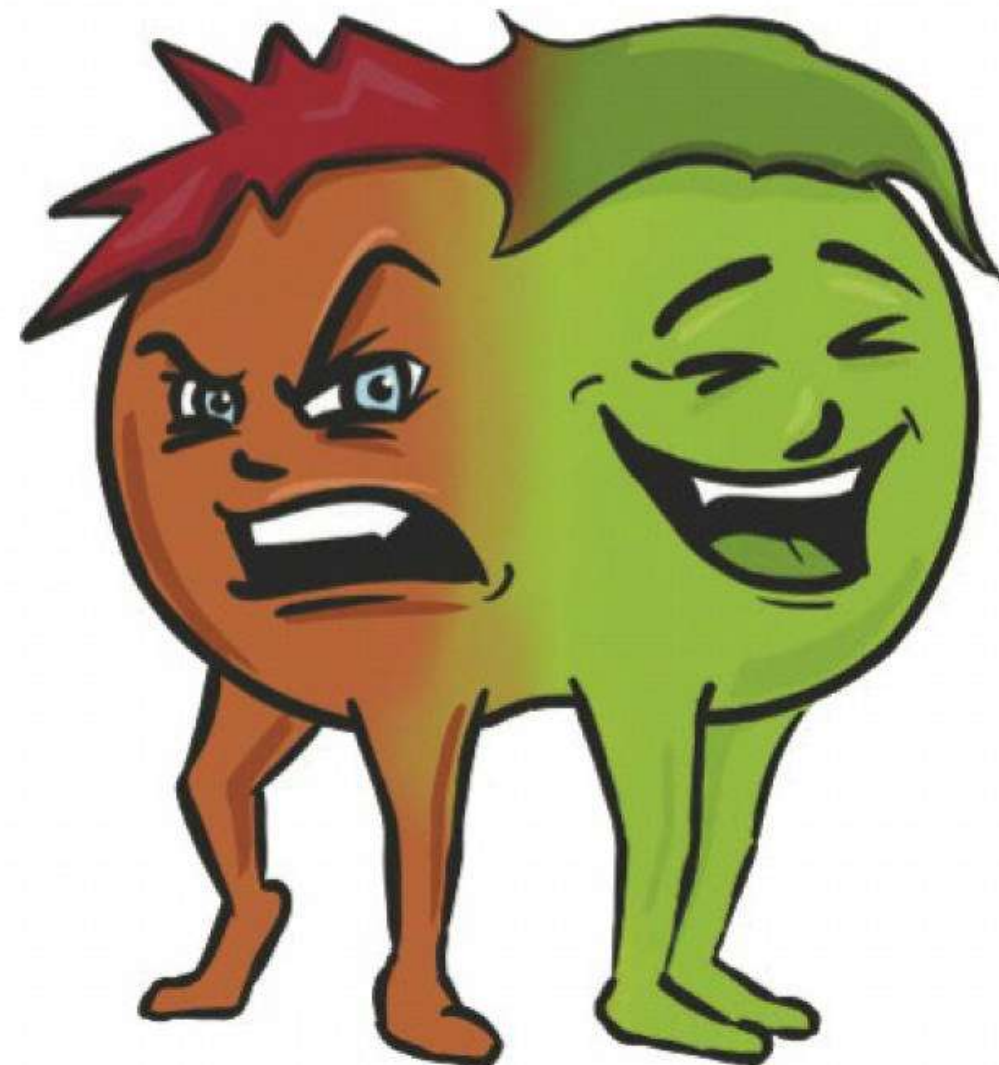
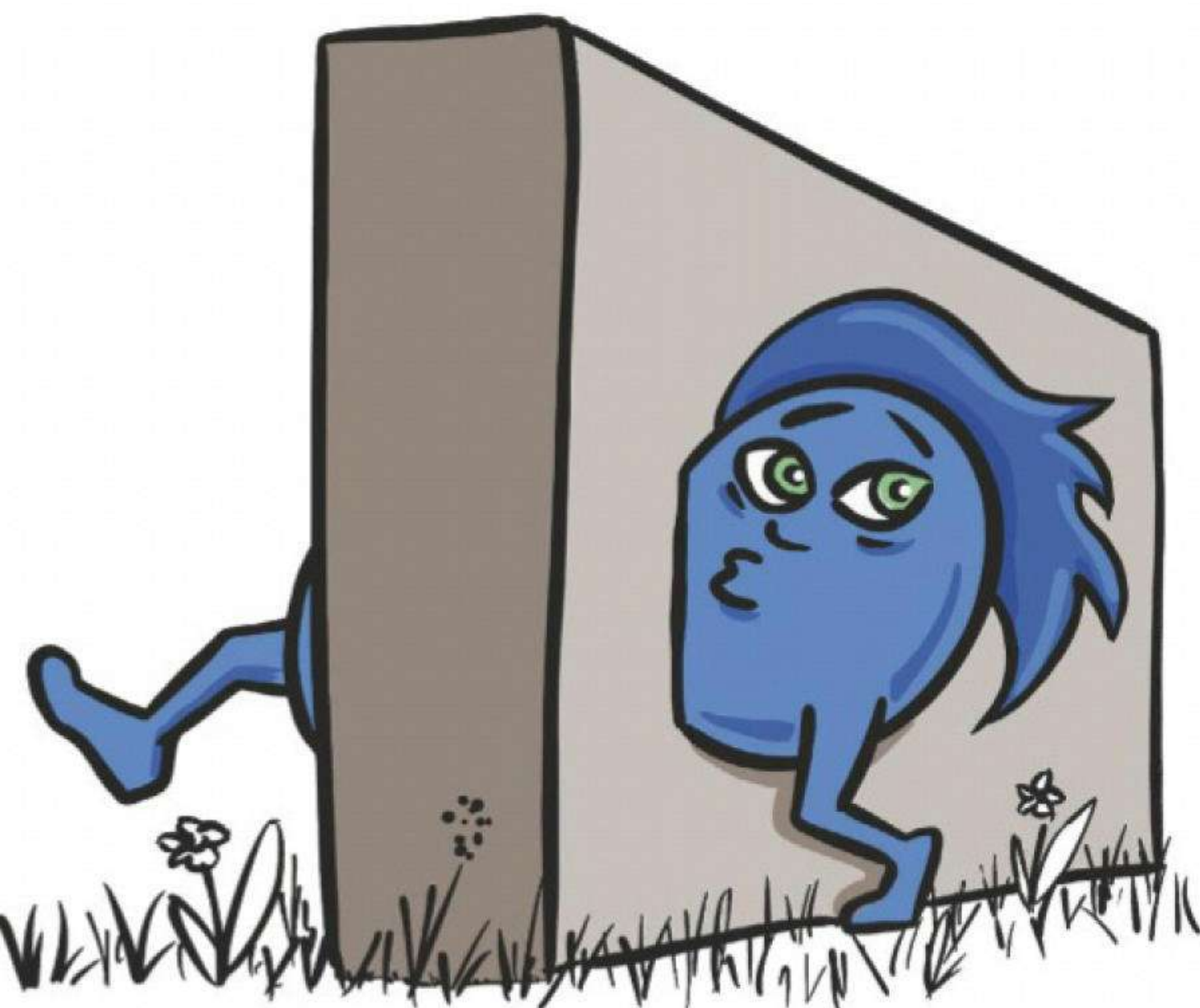
Quanten kurz und knapp

schicken lassen. Dass jemals größere Objekte, gar Menschen gebeamt werden, gilt aktuell als ausgeschlossen. Dennoch könnte die Quantenteleportation eine wichtige Technologie werden: Sie ermöglicht eine abhörsichere Kommunikation, etwa für Finanztransaktionen. Und Quantencomputer könnten dank ihr untereinander kommunizieren.

Tunneleffekt

In der Alltagswelt ist es unvorstellbar, dass eine Kugel, die nicht genug Schwung hat, um über einen Hügel zu rollen, trotzdem auf der anderen Seite des Hindernisses anlangt. Quantenobjekte aber können durch eine eigentlich unüberwindliche Barriere hindurchtunneln. Das Phänomen lässt sich mithilfe des Wellencharakters verstehen, den auch Materieteilchen zeigen. Demnach kann der Aufenthaltsort eines Objektes nicht präzise bestimmt werden. Es lassen sich nur Wahrscheinlichkeiten für eine Position angeben. So kann sich für ein Elektron eine sehr geringe Wahrscheinlichkeit ergeben, hinter dem Hindernis zu existieren. In seltenen Fällen taucht das Partikel dann tatsächlich dort auf.

Der Tunneleffekt hat in der Astronomie weitreichende Bedeutung: In Sternen kommen sich auf diese Weise Atomkerne, die sich wegen ihrer gleichen Ladung normalerweise abstoßen, so nahe, dass sie verschmelzen können. Ohne das Phänomen gäbe es kein Sonnenlicht – und kein Leben auf der Erde.



Überlagerung

In der klassischen Welt kann eine Eigenschaft eines Objekts nur einen eindeutigen Wert annehmen. Eine Fußgängerampel kann nur jeweils Rot oder Grün anzeigen. Bei Quantenobjekten können sich hingegen scheinbar widersprechende Zustände überlagern. Bei einem Elektron zum Beispiel können sich die Zustände „Rechtsdrall“ und „Linksdrall“ mischen, und zwar gleichzeitig in unterschiedlichen Verhältnissen, etwa 50 zu 50 oder auch 70 zu 30. Bei einer Messung „entscheidet sich“ das Quantensystem dann für einen eindeutigen Wert. Wie das genau passiert, ist nach wie vor umstritten.

Verborgene Variablen

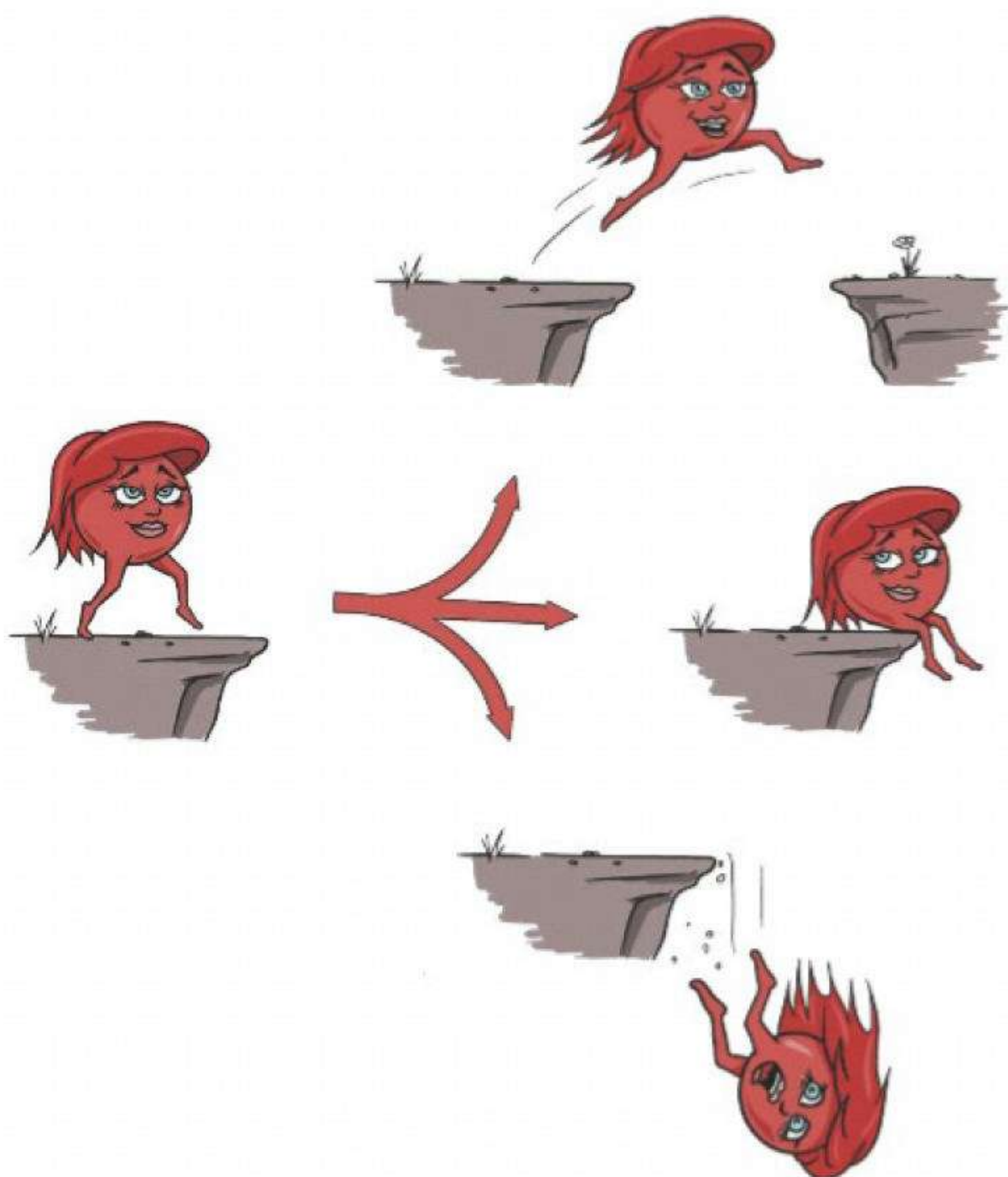
Einige Deutungen der Quantentheorie gehen davon aus, dass die orthodoxen Interpretationen unvollständig sind und dass eine Art tiefer liegende Realität existiert. Diese enthalten, so die Theorie, zusätzliche Informationen über die Eigenschaften von Quantenobjekten – eben Variablen, die uns bislang verborgen blieben. Doch jeder Versuch, diese aufzustoßern, stärkte bislang die gegenteilige Annahme, dass die Quantenphysik doch vollständig ist.

Verschränkung

Wenn Teilchen gemeinsam entstehen oder miteinander wechselwirken, werden sie miteinander verbunden – verschränkt. Sie lassen sich jetzt nicht mehr als voneinander unabhängige Objekte betrachten, sondern nur noch als Ganzes beschreiben.

Viele-Welten-Theorie

Die Interpretation geht zurück auf den US-amerikanischen Physiker Hugh Everett III. Er war unzufrieden mit der Kopenhagener Deutung, der zufolge Eigenschaften eines Quantenobjekts bei einer Messung spurlos verschwinden. Er propagierte daher in den 1950er Jahren, dass diese weiterexistieren. Daraus entwickelte sich die Viele-Welten-Theorie.

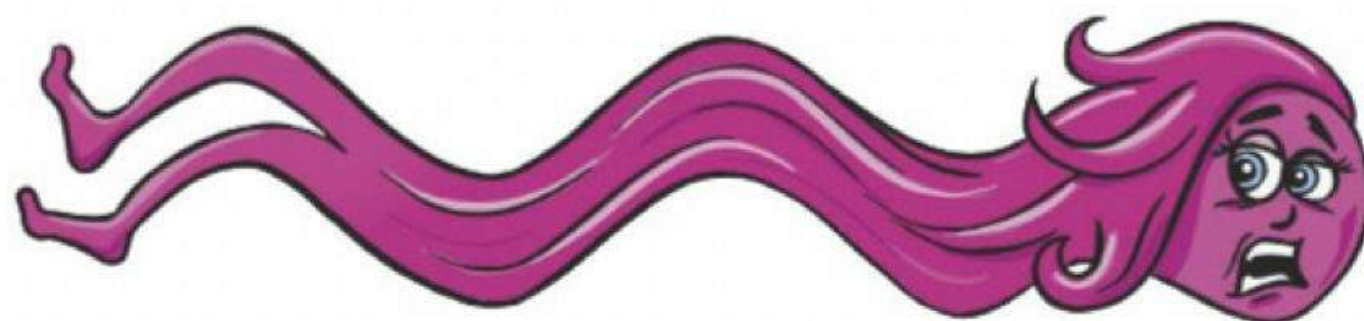


Ihr zufolge spaltet sich das Sein bei jedem Ereignis auf. Jede mögliche Begebenheit wird in je einer eigenen Welt realisiert. Auch alle beteiligten Personen vervielfältigen sich dabei. Zwischen den Welten besteht keine Verbindung, sodass wir keinen Kontakt haben zu den unzähligen Kopien, die von uns existieren.

Wellenfunktion

Die mathematische Funktion, mit der sich die Welleneigenschaften eines Teilchens beschreiben lassen, nennt sich Wellenfunktion. In ihr stecken alle – auch die widersprüchlichen – Eigenschaften, die einem Quantenobjekt vor einer Messung zugeschrieben werden. Aus der Wellenfunktion lässt sich berechnen, mit welcher Wahrscheinlichkeit die verschiedenen möglichen Werte einer Eigenschaft bei einer Messung auftreten.

Die Wellenfunktion ist eine abstrakte Formel, die keine anschauliche physikalische Bedeutung hat. Direkt beobachten lässt sie sich nicht: Sie kollabiert zuvor. Statt vieler verschiedener Zustände eines Teilchens offenbart sich stets nur einer.



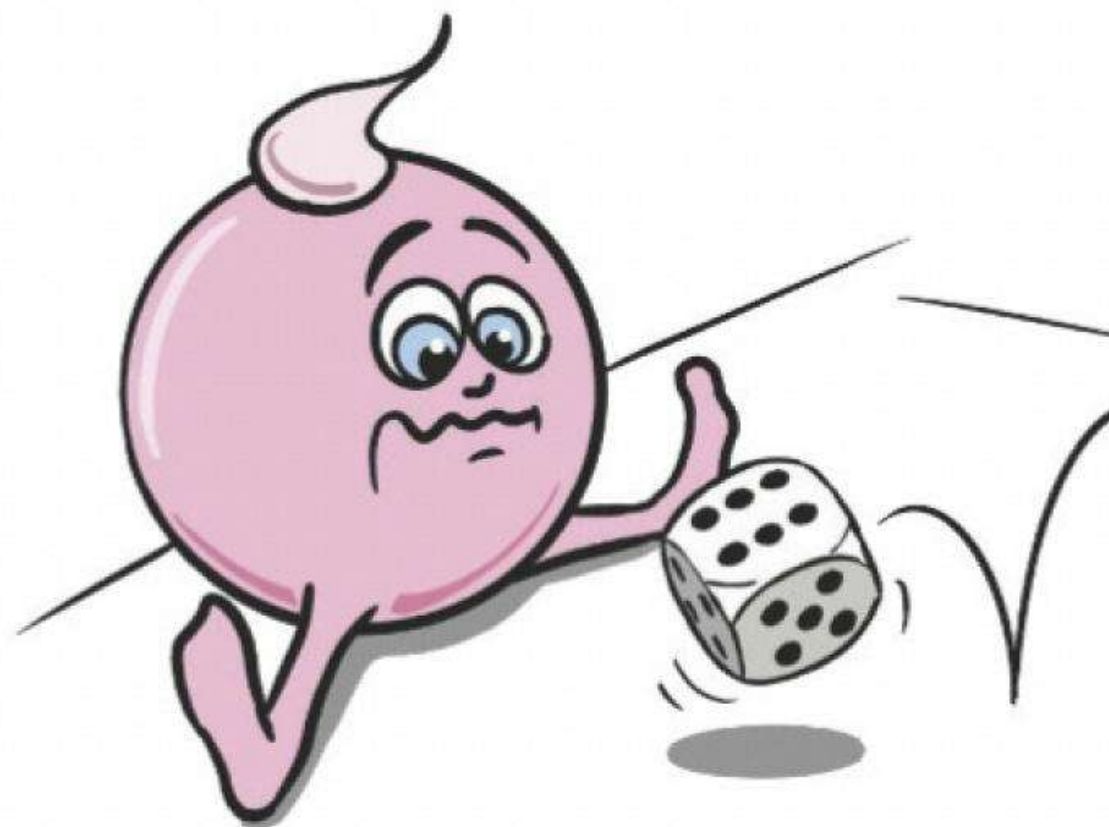
Welle-Teilchen-Dualismus

Quantenobjekte wie Elektronen und Photonen können sich mal wie eine Welle, mal wie ein Teilchen verhalten – je nach Experiment, das wir mit ihnen anstellen. Das heißt nicht, dass sie Teilchen oder Wellen sind, sondern sie zeigen nur solche Eigenschaften.

Zufall

In der klassischen Physik galt als sicher: Es gibt keinen echten Zufall. Die Welt sei deterministisch, sie folge unausweichlichen, unerbittlichen Gesetzmäßigkeiten. Was uns zufällig erscheint – etwa das Ergebnis eines Würfelwurfs – ist bloß zu komplex, um es zu berechnen. Doch besäßen wir alles Wissen der Welt, könnten wir theoretisch die Zukunft bis ins letzte Detail vorhersagen.

Umso größer war der Schock, als sich in der Quantenwelt ein echter Zufall zeigte. Wo im Doppelspalt-Experiment ein Elektron auf der Blende landet, lässt sich nur mit Wahrscheinlichkeiten angeben. Laut der Kopenhagener Deutung könnte selbst ein allwissendes Wesen das Ergebnis nicht vorhersagen. Doch das ist – wie vieles im Verständnis der Quantenphysik – umstritten.



P.M. THEMA

Der Code des Lebens

Wie er uns prägt, wie wir ihn steuern

Kaum ein Forschungsfeld wird unsere Zukunft so sehr prägen wie die Genetik. Sie erlaubt uns, den Bauplan des Lebens immer besser zu verstehen und ihn immer präziser umzuschreiben. Das ermöglicht zum Beispiel neue Therapien für ehemals unheilbare Krankheiten, neue Impfstoffe, neue Vorsorgemaßnahmen. Doch die wachsenden Möglichkeiten rufen auch Besorgnis hervor. P.M. THEMA erklärt, welche Chancen und Risiken bestehen – und welche vielfältigen Anwendungen existieren, von der Archäologie bis zur Raumfahrt.



P.M. THEMA »Die Macht der Gene« hat 100 Seiten und kostet 6,50 Euro. Einige Themen: Selbstversuch – Was private Gentests aussagen • Wilderei: Wie DNA getöteter Tiere Kartelle überführt • Archäogenetik: Die Erbgut-Spuren unserer Ahnen

WOHLLEBENS WELT

Was den Winter magisch macht

Eine Jahreszeit voller Geheimnisse



Die Winter-Ausgabe von **WOHLLEBENS WELT** hat 116 Seiten und kostet 7 Euro. Weitere Themen: Bernstein: Das Gold der Meere • Wie sieht der Wald der Zukunft aus? • Wandern mit Schneeschuhen • Weshalb Eulen lautlose Jäger sind

Keine Frage: Im Winter ist die Natur karger, rauer, weniger bunt als während des restlichen Jahres. Doch manche erstaunlichen Phänomene lassen sich gerade in der kalten Saison besonders gut beobachten. Zum Beispiel die Fähigkeit von Bäumen, gespeichertes Wissen zu nutzen. Ja, auch Pflanzen sind imstande, zu lernen! Was genau es damit auf sich hat, davon erzählt die neue Ausgabe von WOHLLEBENS WELT. Außerdem im Heft: Frostig schöne Naturerlebnisse vor der Haustür und viele grüne Tipps für einen naturnäheren Alltag.

GEO WISSEN

Zeit für mich!

Die Kunst der Selbstfürsorge

Sich Zeit nehmen, nur für sich allein. Darf man das? Ist das nicht egoistisch? Nein, sagen Expertinnen und Experten. Im Alltag vergessen wir viel zu oft, für uns selbst gut zu sorgen. Diese Ausgabe von GEO WISSEN erklärt ausführlich, wie Selbstfürsorge gelingen kann, und vermittelt Erkenntnisse aus Wissenschaft und Therapie, Coaching und Training. Außerdem bietet das Magazin Selbsttests sowie ein Dossier mit acht Grundregeln für ein Leben, das gut tut – weil die eigenen Wünsche und Bedürfnisse nicht zu kurz kommen.



GEO WISSEN »Zeit für mich!« hat 148 Seiten und kostet 11 Euro, mit DVD (»Expedition Happiness«) 19,50 Euro. Einige Themen: Übungen für eine wohltuende Atmung • Wie wir die Heilkraft unseres Körpers wecken • Die Psychologie des Neinsagens

Die Welt neu hören.

Wie es Ureinwohnern gelingt, ihren Regenwald mit Geisterglauben und High-Tech-Drohnen vor Eindringlingen zu schützen. Warum junge Menschen in Afghanistan plötzlich das Skifahren entdecken. Wo die kubanische Revolution ein Paradies für Zackenbarsche und Riffhaie schuf. Was wir tun können, um die Überbevölkerung der Erde in den Griff zu bekommen. Weshalb der Schutz der Artenvielfalt mindestens so wichtig ist wie der Klimaschutz.

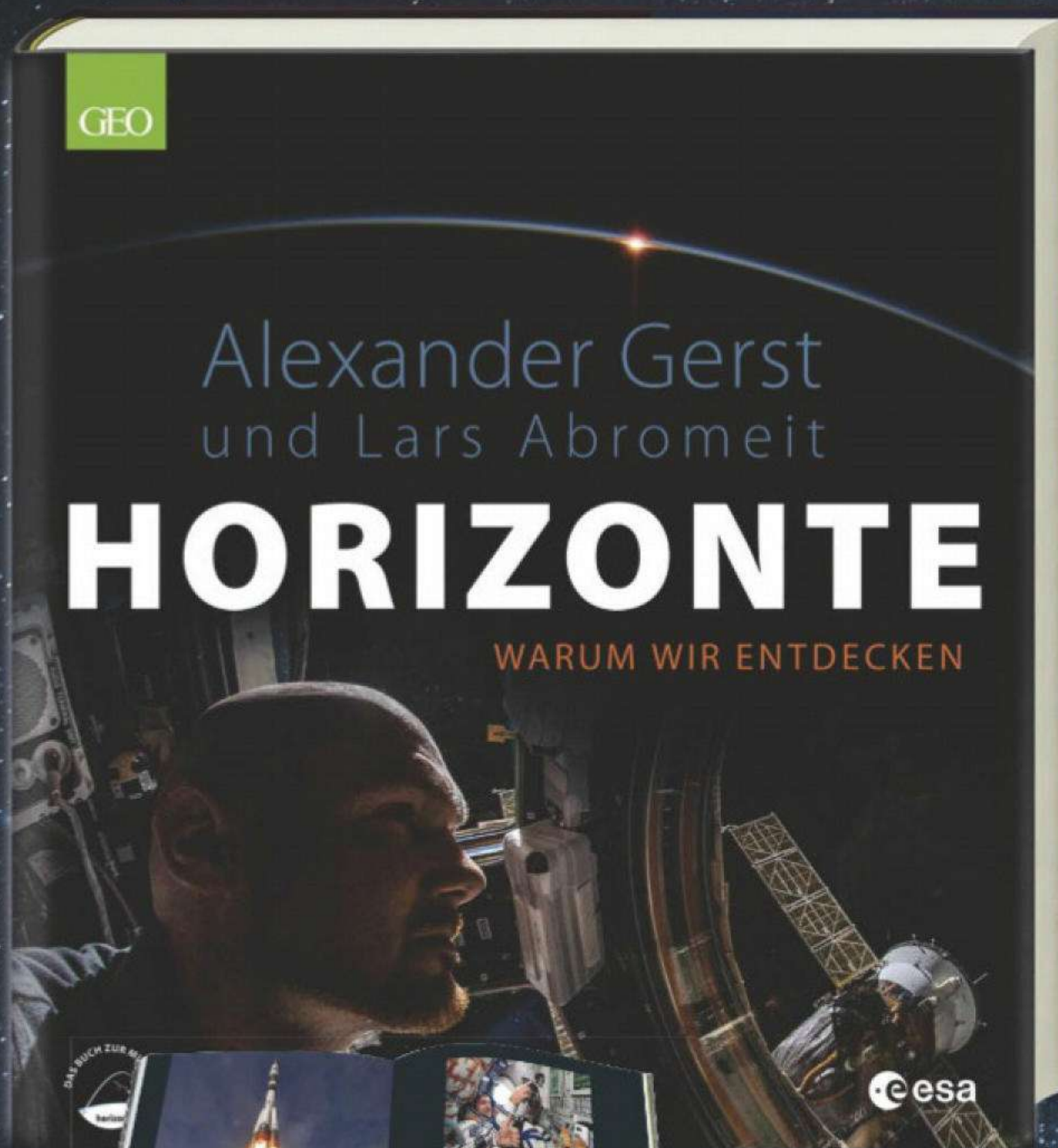


Zu hören bei



In packenden Reportagen verknüpfen die GEO-Reporter Abenteuer, Wissen und gesellschaftliche Themen miteinander. Sie berichten von gewagten Recherchen, dramatischen Situationen und berührenden Begegnungen.

Wöchentlich die Welt mit anderen Ohren hören. GEO – der Podcast.

NEU!

GEO Bildband „HORIZONTE – WARUM WIR ENTDECKEN“

Was bedeutet es, sich ins Unbekannte hinauszuwagen? Welche Gefahren sind dabei zu bedenken? Wie hält man als Team zusammen, und was können wir daraus für den eigenen Alltag lernen?

In diesem einzigartigen GEO-Bildband fasst Alexander Gerst seine Erfahrungen als ESA-Astronaut zusammen und präsentiert gemeinsam mit GEO-Expeditionsreporter Lars Abromeit neue atemberaubende Fotografien von seiner zweiten Mission. In ihren Gesprächen tauschen die beiden Autoren sich über spannende Forschungsreisen im Weltall und auf der Erde aus, verbinden ihre Erlebnisse mit Beispielen aus der Welt der großen Entdecker der letzten Jahrhunderte und geben einen Ausblick auf die nächsten großen Schritte der Raumfahrt: zum Mond und zum Mars.

Maße: 29 x 27 cm, ca. 216 Seiten
 Best.-Nr.: G729296
 Preise: 40,00 € (D)/41,10 € (A)/
 43.90 Fr. (CH)



GEO Bildband „166 TAGE IM ALL“

Best.-Nr.: G729137
 Preise: 40,00 € (D)/41,10 € (A)/
 43.90 Fr. (CH)

Bestseller mit über
 45 000 verkauften Exemplaren



**Jetzt bestellen unter geoshop.de/horizonte
 oder +49 40 42236427**

(Bitte geben Sie immer den Aktionscode an: G00192)