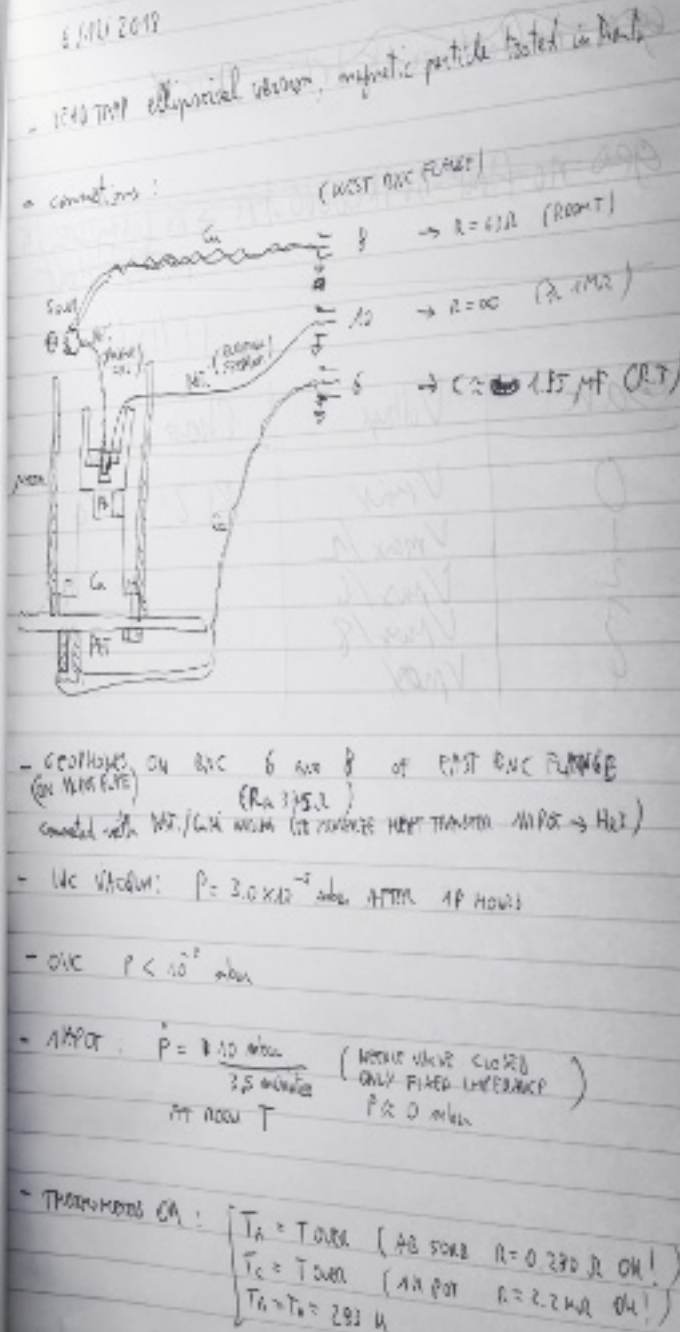
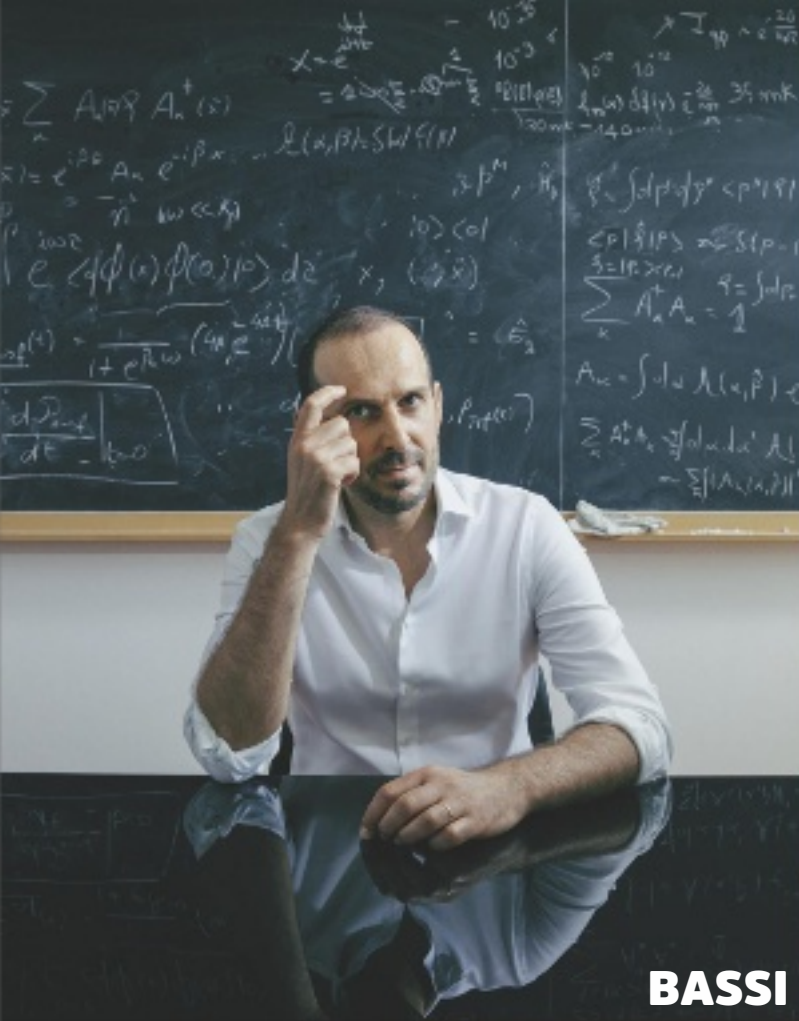


WAS IST NOCH REAL?

Das Reich der Quanten stellt unsere Idee von Wirklichkeit auf die Probe. Objekte verhalten sich mal wie Teilchen, mal wie Wellen, sie können an mehreren Orten gleichzeitig sein. Wieso merken wir im Alltag nichts davon? Ein Besuch bei vier Physikern – und ihren neuen Theorien





BASSI ARNDT



BRUKNER ULBRICHT



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 Haustürschlüssel 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, Haustürschlüssel, 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 auf ein niedrigeres Energieniveau springt, lässt sich nicht vorher-sagen, geschieht ohne Vorwarnung. Teilchen können geisterhaft verbunden, „verschränkt“ sein – selbst wenn sie Lichtjahre voneinander entfernt sind.



DIE RÖHRE

Wie groß können Objekte sein und trotzdem noch Quantenverhalten zeigen? Um das herauszufinden, schickt ein Team der Universität Wien Moleküle aus bis zu 2000 Atomen aus der Teilchenquelle (vorn) durch eine fast fünf Meter lange Vakuumröhre

Wird die Eigenschaft eines Teilchens gemessen, ist augenblicklich die des Zwillings festgelegt. Als ob zwei Würfel in verschiedenen Galaxien beim Wurf stets die gleiche Augenzahl zeigten.

Wie kann auf dieser skurrilen, spukhaften Mikrowelt unsere solide Erfahrungswelt gründen? Wieso merken wir vom flatterhaften Quantenverhalten nichts in unserem verlässlichen Alltag?

DAS GITTER

Im Interferometer werden die Moleküle an einem optischen Gitter gebeugt, der modernen Variante einer mit Schlitzen versehenen Blende. Das Gitter entsteht, indem ein Laserstrahl auf den violett erscheinenden Spiegel fällt und reflektiert wird

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?

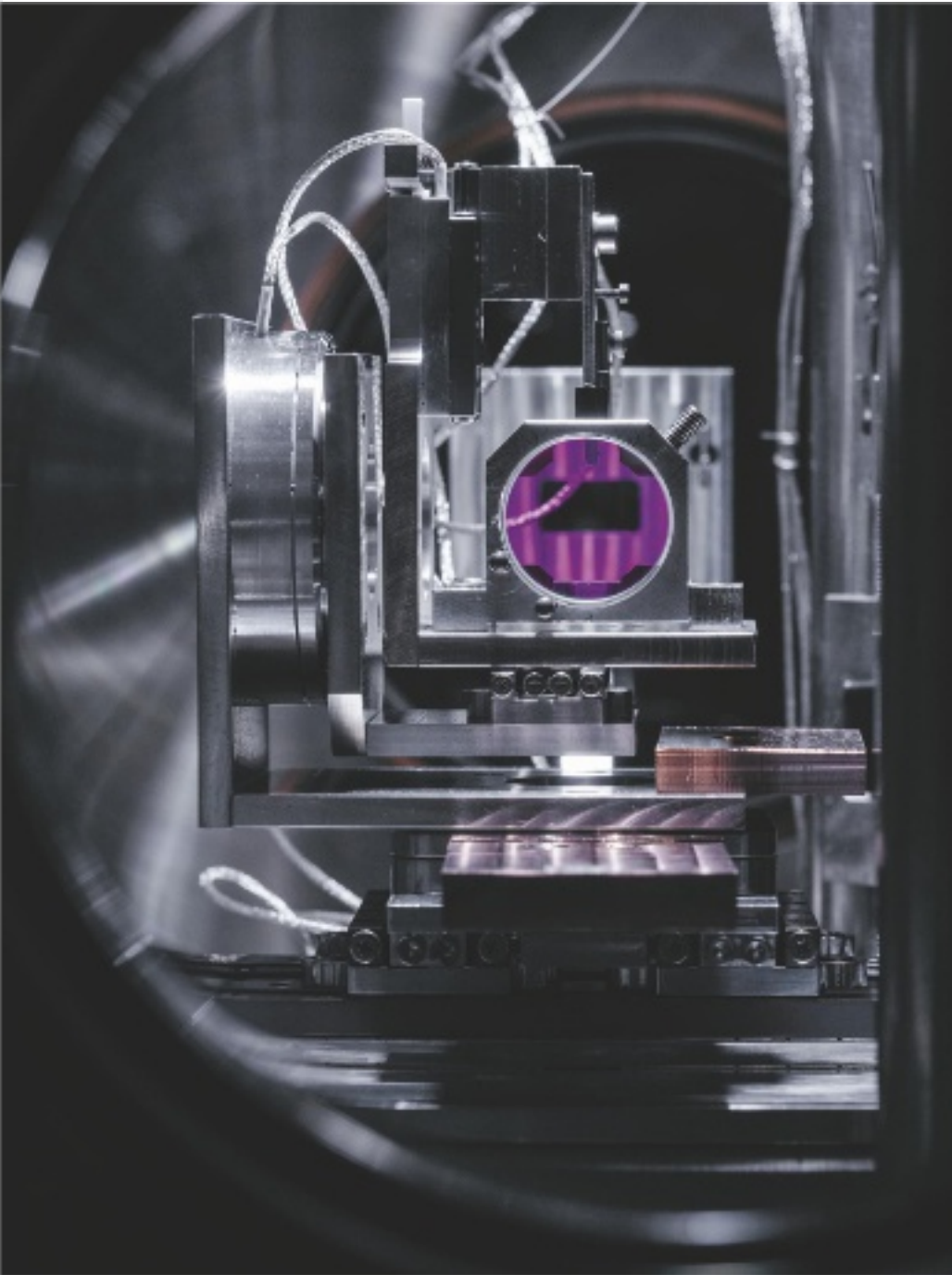
Eines ist unbestritten: Die Quantentheorie ist eine der erfolgreichsten Errungenschaften der Wissenschaft. Dank eines eleganten mathematischen Formalismus beschreibt sie Quantensysteme unglaublich präzise. Auch wenn ihre Erkenntnisse unserer Intuition komplett zuwiderlaufen – Technologien, die wir auf Basis der Quantentheorie entwickelt haben, funktionieren nachweislich: Sie liefert die Grundlage für die moderne Hightech-Welt, für Laser und GPS, für Computertomografie und Quantencomputer.

Aber was sich hinter der Wand aus Formeln und mathematischen Funktionen verbirgt, wie wir die Gleichungen zu verstehen, zu interpretieren haben, 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. Diese Geschichte dreht sich darum, wie die Folgegenerationen mit dem Erbe verfahren sind, welche unterschiedlichen 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, welche Theorie korrekt ist und welche 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 die beiden Reiche aufeinander? Gibt es eine scharfe, von Naturkonstanten gezogene Grenze? Oder einen sanften Übergang?

Wer diese Frage klären will, fährt am besten nach Wien, in die Boltzmannsgasse 5. Im zweiten Stock des traditionsreichen Physikalischen Instituts der Universität Wien hat Markus Arndt sein Büro, unweit des Raums, in dem einst Erwin Schrödinger residierte, dem



die Physik eine grundlegende Gleichung der Quantenmechanik verdankt.

Arndt kartiert das Niemandsland zwischen dem quantischen und dem klassischen Territorium. Wie groß können Objekte sein und trotzdem noch dieses scheinbar verrückte Quantenverhalten zeigen? Wann bricht die Delokalisation von Teilchen zusammen? Wann verlieren sie also die Quanteneigenschaft, gleichzeitig hier und da zu sein – und sind dann als Teil eines größeren Objekts verlässlich da, wo die klassischen Gesetze der Physik sie eindeutig verorten?

Dabei ist für den Physiker noch offen, ob es überhaupt eine Grenze gibt zwischen der mikroskopischen und der makroskopischen Welt. Oder ob wir das Quantenverhalten in den für uns wahrnehmbaren Objekten schlicht nicht erkennen können. „Wenn Bakterien und Viren im Alltag in delokalisierten Zuständen existierten, würden wir das überhaupt merken?“, fragt sich Arndt. „Wäre unser Gehirn in der Lage, die Verschränkung von Photonen zu erkennen? Dafür ist unser Denkorgan ja gar nicht ausgelegt.“

ARNDTS ERKUNDUNGEN beruhen auf einem zentralen quantentheoretischen Experiment: dem Doppelspaltversuch. Für den 1988 verstorbenen Physik-Nobelpreisträger Richard Feynman steckte in dem Experiment „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: 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 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 in diesem Fall nicht).

Die Elektronen liefern aber ein verstörendes Ergebnis: In der Mitte des Bildschirms 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.

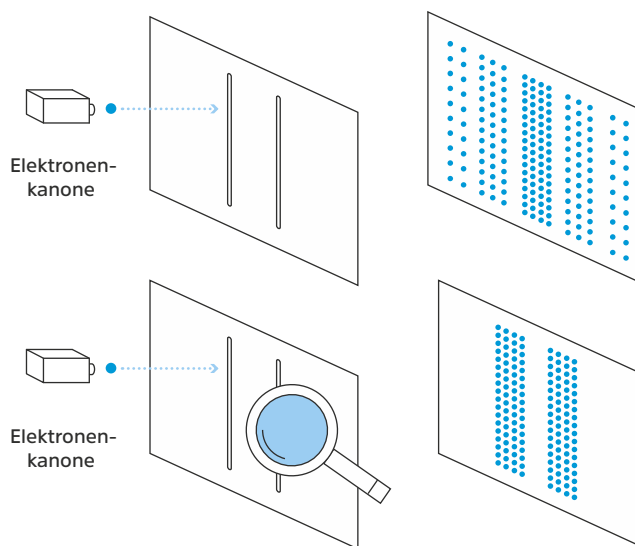
Das Resultat wird noch irritierender, wenn die Elektronenkanone so langsam feuert, dass jeweils ein einzelnes Partikel den Doppelspalt passiert. Auf dem Detektor lässt sich der Ort genau erkennen, an dem das Teilchen aufschlägt. Doch wie von Geisterhand formieren sich die vielen Elektronen über die Zeit 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, täuscht sich: Sobald jemand 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.

Die Apparate, mit denen Markus Arndt den Übergangsbereich erkundet, sind raffinierter als die simple Elektronenkanone. Verlassen wir sein Büro und steigen in den Keller: Dort steht hinter einer Sicherheitstür LUMI, das *Long-baseline Universal Matter-Wave Interferometer* (zu deutsch etwa: langgestrecktes universelles Materiewellen-Interferometer). Die Maschine ist so kompliziert wie ihr Name: ein silbrig glänzendes Monstrum von einer Metallröhre, fast fünf Meter lang, mit Stützen,

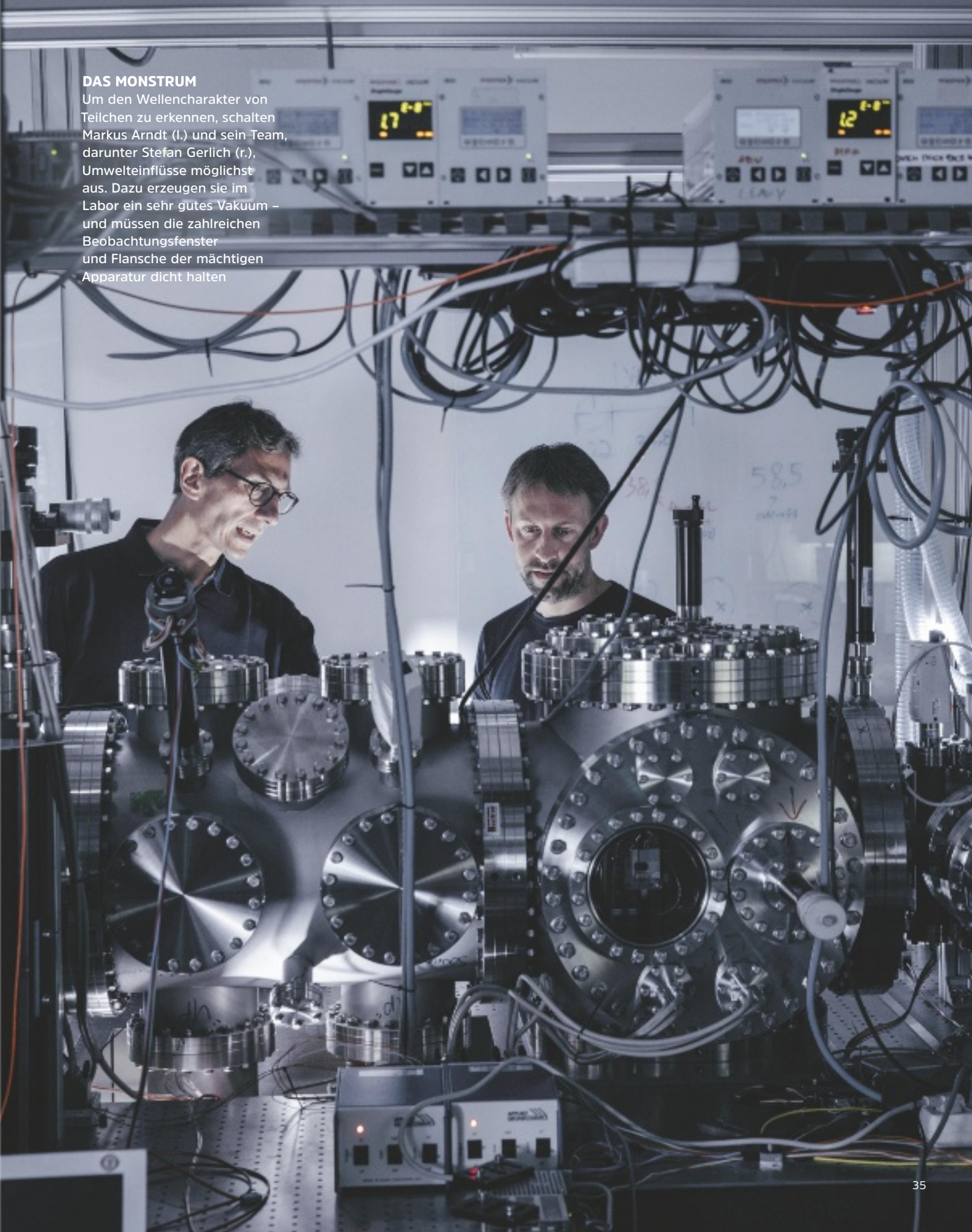
DOPPELSPALT-EXPERIMENT



Es ist eines der zentralen und rätselhaftesten Quantenexperimente: Eine Elektronenkanone schießt nacheinander Teilchen auf eine mit zwei Spalten versehene Blende. Auf dem Detektorschirm dahinter formieren sich die Elektronen zu einem Muster, wie es auch entsteht, wenn Wellen durch den Doppelspalt laufen würden. 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 mit Billardkugeln erwarten würden.

DAS MONSTRUM

Um den Wellencharakter von Teilchen zu erkennen, schalten Markus Arndt (l.) und sein Team, darunter Stefan Gerlich (r.), Umwelteinflüsse möglichst aus. Dazu erzeugen sie im Labor ein sehr gutes Vakuum – und müssen die zahlreichen Beobachtungsfenster und Flansche der mächtigen Apparatur dicht halten



deren teilweise mit Guckfenstern versehene Deckel mit zig Muttern luftdicht verschraubt sind. Drumherum ein Verhauf aus Kabeln und Messgeräten. Motoren sorgen dafür, dass die Spaltgitter sich mit der Präzision von Millionstel Millimetern positionieren lassen.

2019 stellte Arndts Team mit dem Gerät den derzeit gültigen Weltrekord auf. Es schickte Riesenmoleküle aus 2000 Atomen, zusammen so schwer wie etwa 25 000 Wasserstoffatome, durch die LUMI-Röhre. Und beobachtete am Detektor das typische Streifenmuster, das sich bei der Überlagerung von Wellen ergibt. Was belegt, dass sogar derart große Moleküle noch räumlich „verschmiert“, also an mehreren Orten zugleich 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 und Antibiotikamoleküle unter bestimmten Umständen wie Wellen verhalten und nicht wie die Teilchen, als die wir sie intuitiv interpretieren.

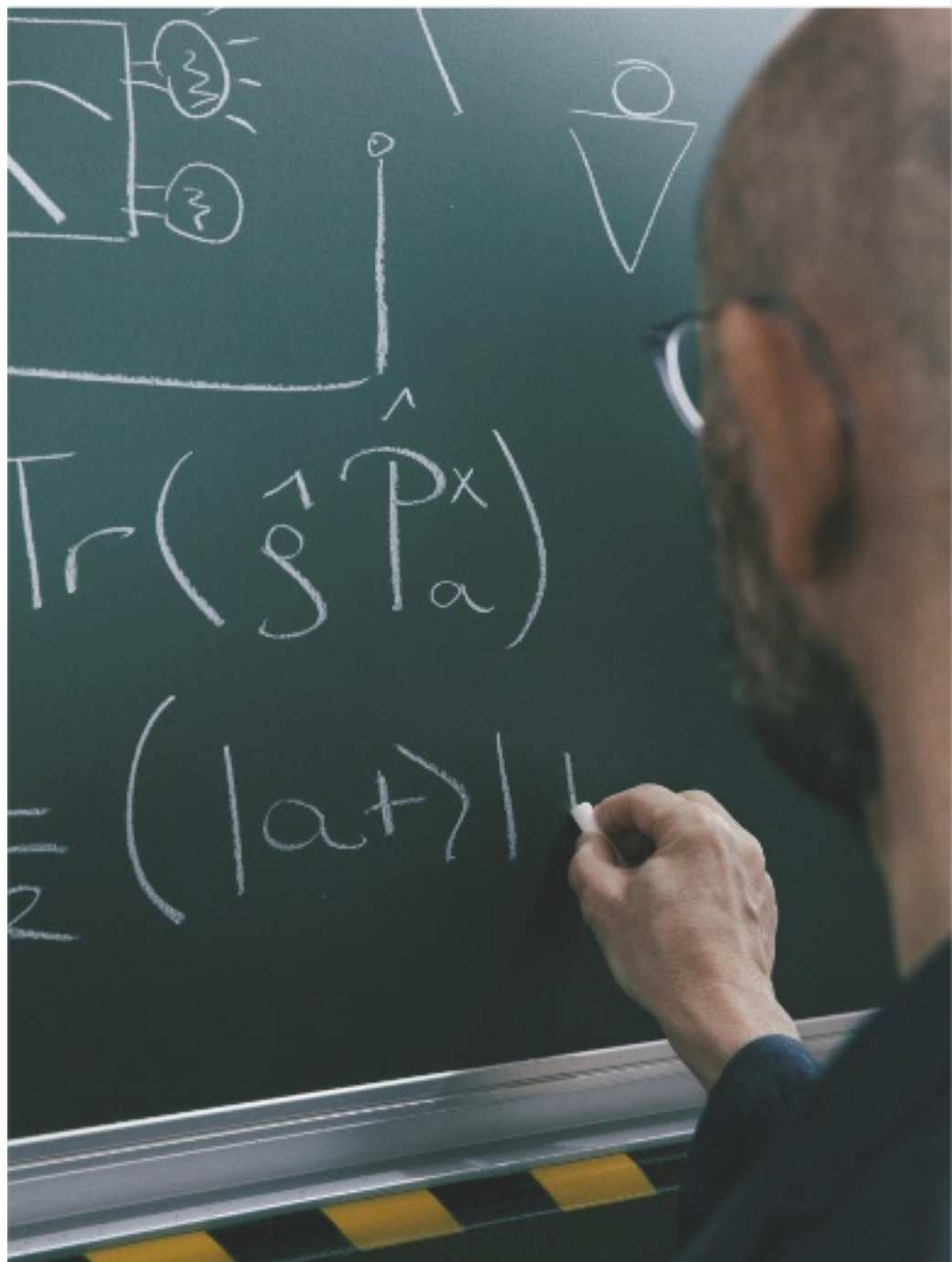
ES SIND UNGLAUBLICHE Befunde, die unserer Erfahrung spotten. Auch Arndt staunt immer wieder über das bizarre Phänomen: „Wir wissen, da ist ein Teilchen. Wir können es im Mikroskop sehen. Dann verschwimmt es. Wenn man es unbeobachtet lässt, ist der Ort delokalisiert. Das Komische aber ist: Im Detektor, 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.“

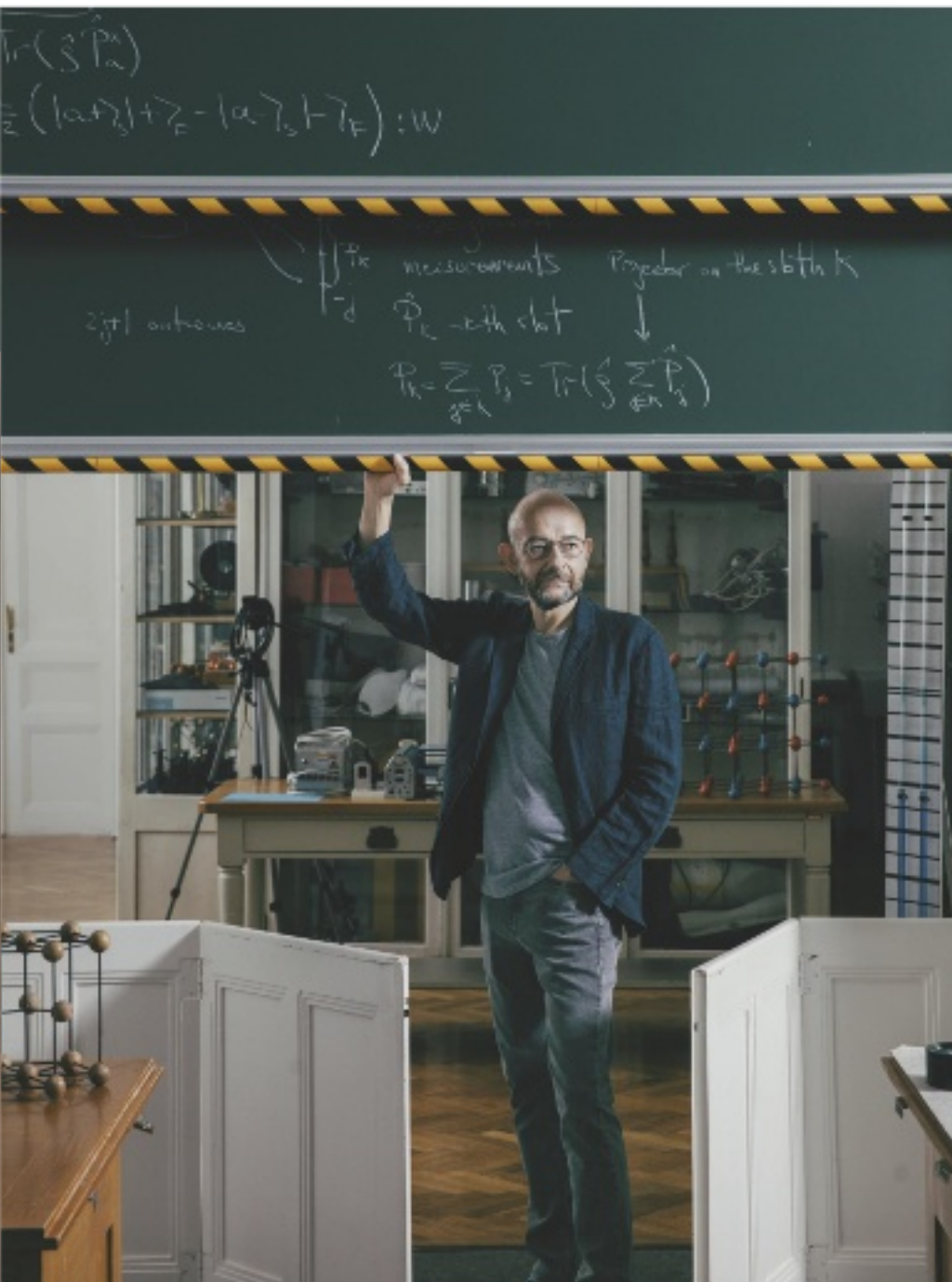
Der amerikanische Physiker John Archibald Wheeler verglich die quantische Ungewissheit in den 1970er Jahren mit einem „großen rauchenden Drachen“: Auf dem Weg von der Quelle zum Detektor besitze ein Photon am Anfang und am Ende eine eindeutig definierbare Realität. „Das Maul des Drachen ist scharf, damit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

DIE MATHEMATIK

Die Formeln der Quantenmechanik erlauben erstaunlich präzise Vorhersagen des Verhaltens von Teilchen. Doch es bleiben große Untiefen beim Verständnis der Theorie. Der Wiener Physiker Časlav Brukner will diese Probleme auflösen





DIE UNSCHÄRFE

Brukner ist inzwischen überzeugt, dass keine Demarkationslinie zwischen klassischer und quantischer Welt existiert, sondern dass unsere Messgeräte nur zu unscharf sind, um bizarres Quantenverhalten im Alltag zu erkennen

Pioniere der Quantentheorie Werner Heisenberg und Niels Bohr.

Wie halten Sie es mit der Interpretation Ihrer Versuche, Herr Arndt? „Ich bin Experimentator, insofern enthalte ich mich eines Glaubens“, bekennt der Grenzsucher. Er picke sich vielmehr aus den unterschiedlichen Sichtweisen auf die Welt der Quanten jeweils einzelne Elemente heraus.

Die Orthodoxen

Was wir über Quantenobjekte überhaupt wissen können, was deren Verhalten für unser Verständnis von Sein, von Ursache und Wirkung bedeutet, das waren und sind für Physiker und Physikerinnen oft Fragen, über die sie stritten und streiten wie Gottesgläubige über die richtige Religion.

Časlav Brukner hatte sich als junger Mann eigentlich ein Forschungsfeld gesucht, das weniger Spielraum für Interpretationen lässt. Seine Eltern arbeiteten in Jugoslawien in der Archäologie – das Fachgebiet schien ihm zu offen für unterschiedliche Deutungen der Funde. Er selbst wünschte sich eher eine eindeutige Wissenschaft, mit klaren Fragen und klaren Ergebnissen. „Und jetzt bin ich ausgerechnet in der Quantenphysik gelandet“, sagt der schmale Physiker mit dem kahlen Schädel.

Während der Balkankriege Anfang der 1990er Jahre verließ Brukner Belgrad mitten im Studium und landete in Wien, in der Arbeitsgruppe von Anton Zeilinger, dem mittlerweile 76-jährigen Großmeister der Quantenexperimentierkunst. Heute ist Brukner 54 Jahre alt und arbeitet im Institut für Quantenoptik und Quanteninformation der Österreichischen Akademie der Wissenschaften und an der Universität Wien, geradewegs über den Hof vor Markus Arndts Büro.

Auch weltanschaulich steht Brukner der Wiener Schule rund um Zeilinger nahe, die Niels Bohrs Interpretation der Quantenmechanik favorisiert. Sie ging als „Kopenhagener Deutung“ in die Lehrbücher ein und ist eine Zumutung für Menschen, die sich in einer Welt bewegen, in der die klassische Newtonsche Mechanik gilt und Objekte stets und allseits definierte Eigenschaften aufweisen.

Bohr bestand darauf: „Es ist es 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, wenn wir es vermessen. Darüber zu sprechen, wie ein Teilchen beschaffen

ist, wenn wir es nicht beobachten, hielt Bohr für sinnlos.

Dem stimmt Brukner 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.“

B RUKNER GEHÖRT ZU jenen, die sich den grundlegenden Fragen der Quantentheorie 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 glaubt, dass im Übergang von Mikro zu Makro kein plötzlicher Kulissenwechsel stattfindet, sondern im Großen die gleichen Gesetze gelten wie im Kleinen. Warum die 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 etwa vermessen wird oder mit Luftmolekülen kollidiert.

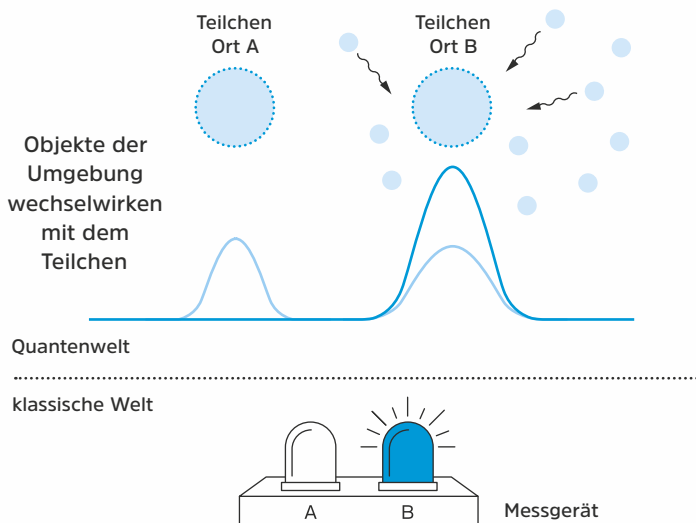
Durch die Wechselwirkung des Quantensystems mit der Umgebung entsteht ein größeres, umfassenderes Quantensystem, erklärt Brukner. Das Partikel verschränkt sich mit dem Messgerät, dieses Konstrukt wiederum mit dem, der die Messung vornimmt, und so weiter. Wenn man so will, werden die Quanteninformationen des Ursprungs-

teilchens so weit verdünnt, dass die Entwicklung praktisch unumkehrbar ist und das Teilchen „dekohäriert“.

Rasend schnell verläuft die Dekohärenz bei größeren Objekten: Ein mikrometergroßes Staubteilchen büßt seine Quanteneigenschaften ein, wenn Sonnenlicht darauf fällt – binnen einer Billionstelsekunde. Ein viel winzigeres freies Elektron bleibt unter bestimmten Versuchsbedingungen dagegen 116 Tage „quantisch“. Bei Experimenten müssen daher möglichst viele Störungen ausgeschaltet werden, um diese Effekte wirklich zu erkennen. Das erfordert Hochvakuum und extrem niedrige Temperaturen in der Messapparatur.

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

DEKOHÄRENZ



Quantenteilchen können sich an mehreren Positionen gleichzeitig aufhalten. Die Quantenmechanik liefert nur Wahrscheinlichkeiten für die Aufenthaltsorte (hellblaue Kurve). In unserer klassischen Welt spüren wir nichts von diesem bizarren Verhalten. Als Erklärung haben sich Physiker das Phänomen der Dekohärenz ausgedacht: Wenn das Teilchen mit anderen Quantenobjekten in seiner Umgebung wechselwirkt (schwarze Pfeile), wird es auf eine Position festgelegt, seine Wellenfunktion kollabiert, wie es im Fachjargon heißt. Bei einer Messung finden wir das Partikel am Ort B, die Aufenthaltswahrscheinlichkeit dort (dunkelblaue Kurve) liegt bei 100 Prozent.

Schrödingers Katze, sie ist zu einer Ikone der Quantenwunderwelt geworden. Der österreichische Physiker Erwin Schrödinger ersann das Gedankenexperiment, um die antirealistischen Interpretationen Bohrs und Heisenbergs ad absurdum zu führen: Eine Katze wird in eine Stahlkammer gesperrt, zusammen mit einer „Höllmaschine“ – 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 es dem Zufall unterliegt, ob binnen einer Stunde ein Atom zerfällt oder nicht, 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 Realität nicht gelten lassen.

Einen pragmatischen Ausweg aus dem Dilemma bietet die viel später entwickelte Idee der Dekohärenz, also des Zusammenbruchs der Quanteneigenschaften, sobald Teilchen mit ihrer Umwelt interagieren. 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, aber nicht in dem geisterhaften Zwischenzustand.

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 gar keine zwei separaten Reiche,

hie quantisch, da klassisch. Die Welt ist eins. Quantenmerkmale gerinnen nur bei größeren Objekten zu „normalem“ Verhalten, so wie eine quecksilbrige Flüssigkeit bei tiefen Temperaturen zu einem soliden Kristall ausfriert.

Der Glaubensstreit um die Interpretation der Quantentheorie und um das, was wir als real bezeichnen dürfen, ist damit jedoch 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.

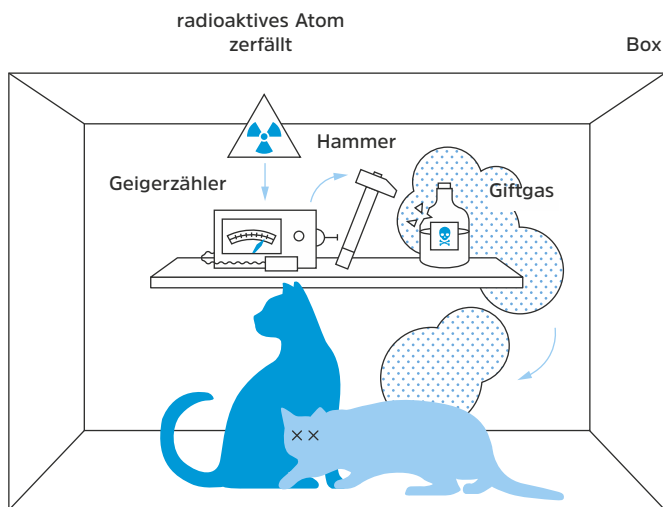
Die Rebellen

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. So sah das Niels Bohr, und so sehen das seine wissenschaftlichen Nachfahren, unter ihnen Brukner. Das will Bassi nicht akzeptieren. „Die Quantentheorie ist nicht exakt“, trägt er in einem Stakkato vor. Sie sei vielmehr eine sehr gute Annäherung an eine tiefer liegende Theorie.

Bassi weiß: Viele in der Physik halten das für Häresie. Denn die Fans von Bohrs Deutung der Quantenmechanik verteidigten ihre Ansichten mit Zähnen und Klauen. Vor allem in den 1960er und 1970er Jahren riskierte der wissenschaftliche Nachwuchs seine Karriere, wenn er die Kopenhagener Orthodoxie in Frage stellte und über Alternativen nachgrübelte.

Das muss Bassi nicht fürchten. Er ist heute in guter Gesellschaft: Auch Nobelpreisträger wie Roger Penrose und Anthony Leggett sympathisieren mit Kollapsmodellen, wie diese Ansätze heißen. Dahinter verbergen sich mehrere Ideen, doch eines ist ihnen gemeinsam: Die Existenz einer Realität hängt in ihrer Deutung nicht davon ab, ob

SCHRÖDINGERS KATZE

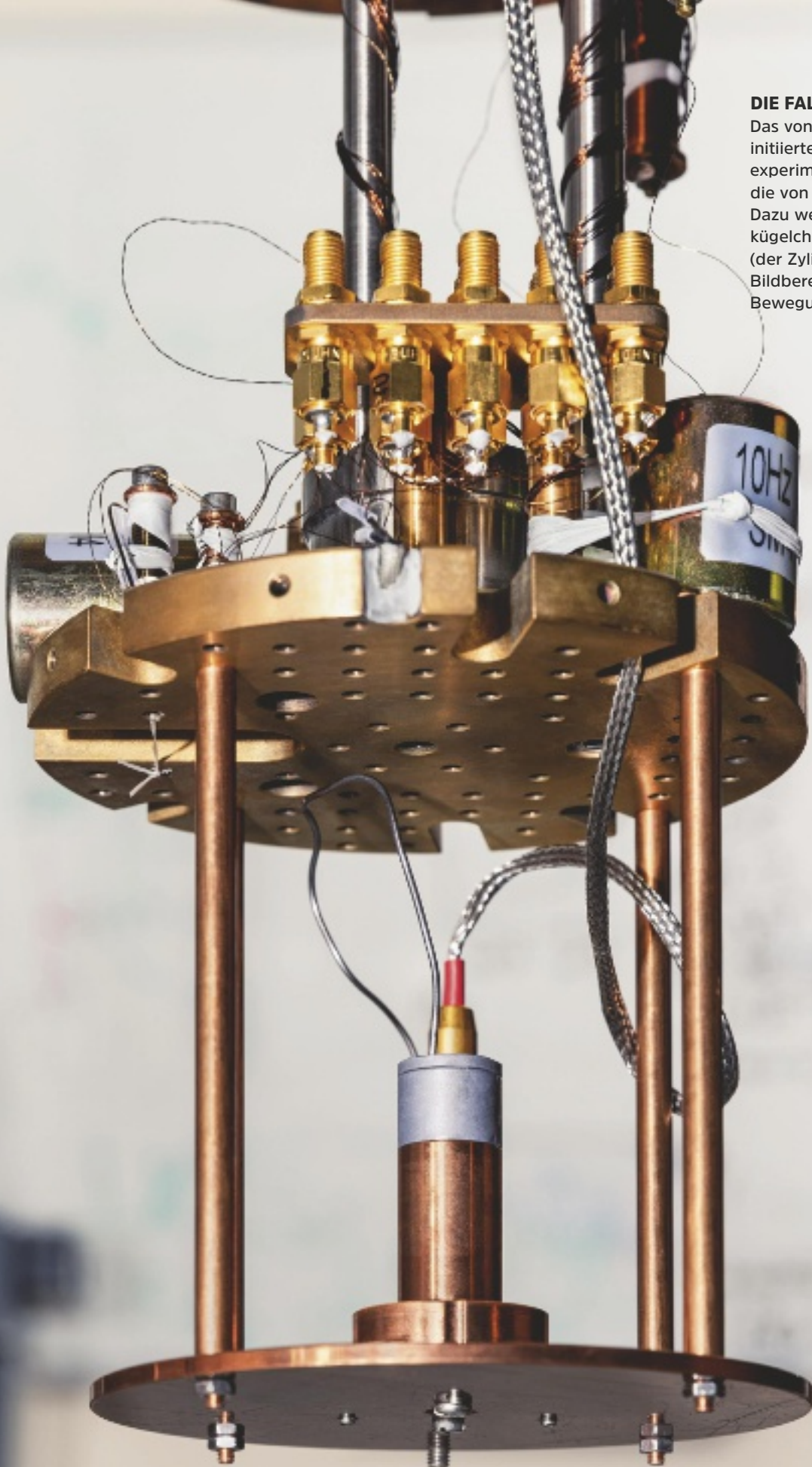


Mit dem Gedankenexperiment wollte der Physiker Erwin Schrödinger die absurden Konsequenzen der Quantenmechanik zeigen: In einer Kiste steckt eine Katze, dazu ein radioaktiver Stoff, von dem in einer Stunde vielleicht ein Atom zerfällt, vielleicht aber auch nicht. Zerfällt ein Atom, registriert das ein Geigerzähler, der einen Hammer in Bewegung setzt, der eine Giftphiole zertrümmert. Ohne nachzusehen ist unklar, was in der Stunde in der Kammer geschehen ist. Die Quantenmechanik drückt das so aus, dass die Wellenfunktion der toten und der lebenden Katze sich überlagern, die Tiere vermischt sind. Ein Zustand, den es nach unserer Lebenserfahrung nicht gibt.



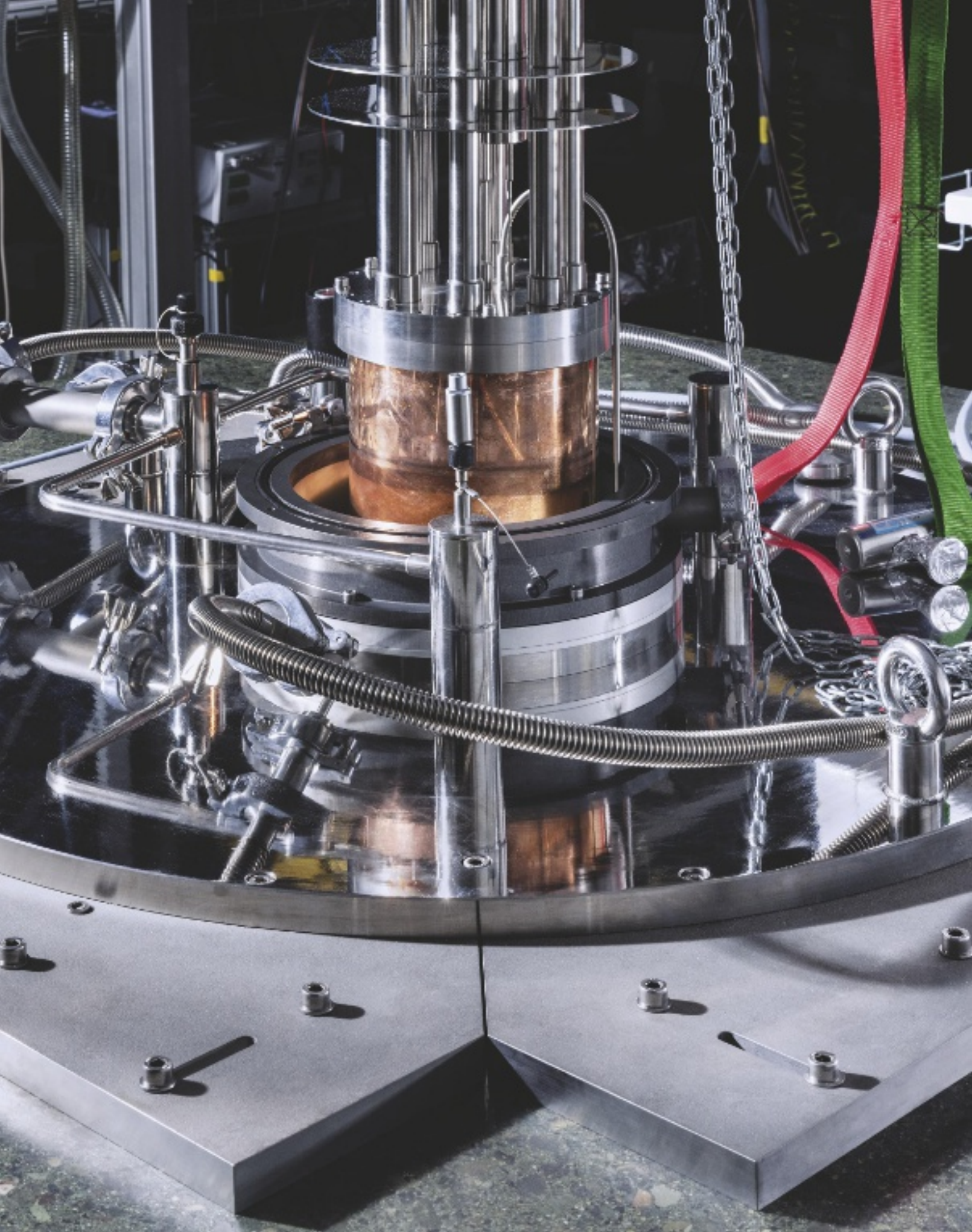
DIE ALTERNATIVE

Ein Elektron wird erst real, wenn wir es beobachten: Mit dieser klassischen Deutung der Quantenmechanik mag sich Angelo Bassi von der Universität Triest nicht abfinden. Er glaubt, dass Quantenobjekte, die spontan definierte Eigenschaften annehmen, auch ohne Messung Realität werden



DIE FALLE

Das von Angelo Bassi mit initiierte Projekt TEQ sucht nach experimentellen Belegen für die von ihm favorisierte Theorie. Dazu werden winzige Glaskügelchen in einer Magnetfalle (der Zylinder im unteren Bildbereich) gefangen und ihre Bewegungen analysiert



DER TIEFKÜHLER

Hendrik Ulbricht (u.) und sein Team haben das TEQ-Experiment an der Universität Southampton aufgebaut. Die Falle, in der Mikroteilchen untersucht werden, hängt – im Bild nicht sichtbar – unterhalb des kupferfarbenen Trägers (l.). Dieser wird auf 300 Millikelvin gekühlt



jemand hinschaut; ein Atom wird also nicht erst zu einem definierten Teilchen, weil ein Detektor es vermisst. Stattdessen ist ein objektiver physikalischer Mechanismus am Werk. Er bewirkt, dass ein über den Raum „verschmiertes“ Partikel an einem Punkt materialisiert: Die Wellenfunktion des Teilchens kollabiert spontan. Ganz gleich, ob es beobachtet wird oder nicht.

STRENG GENOMMEN stehen die Kollapsmodelle außerhalb der Quantenmechanik. Sie erweitern deren Kardinalformel, die Schrödinger-Gleichung, die das Verhalten von Quantenobjekten beschreibt.

Aber was verursacht diesen Kollaps der Wellenfunktion? „Im Moment gibt es noch keinen klaren Hinweis“, gesteht Bassi. Die Schwerkraft könnte eine Rolle spielen, ein Ansatz, den etwa der britische Physiker Roger Penrose favorisiert.

Ähnlich wie Časlav Brukner von der Wiener Schule um Anton Zeilinger wurde Angelo Bassi von seinem Lehrer Giancarlo Ghirardi geprägt. Bei ihm hörte er in den 1990er Jahren an der Universität Triest seine erste Vorlesung über Quantenphysik, später betreute ihn der theoretische Physiker bei seiner Doktorarbeit. Ghirardi gilt zusammen mit Alberto Rimini und Tullio Weber als Architekt des GRW-Modells (benannt mit den Anfangsbuchstaben der Urhebernamen).

Nach dieser Theorie kollabiert jede Wellenfunktion irgendwann spontan, aber mit einer sehr kleinen Wahrscheinlichkeit. Weshalb ein einzelnes Elektron im luftleeren Raum recht lange räumlich „verschmiert“ sein kann, ohne an einem definierten Ort zu materialisieren. Weshalb es im Doppelspaltversuch durch das Vakuum im Interferometer fliegt, ohne zu kollabieren.

Finden sich dagegen viele Teilchen zusammen, 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. Schrödingers Katze bleibt es verwehrt, in ihrem Kasten gleichzeitig tot *und* lebendig zu sein, wie es in dem Gedankenexperiment der Fall ist, bloß weil niemand in die Kiste schauen und den Zustand der Katze bestimmen kann.

Bassi wuchs auf in einem Dorf rund eine Autostunde von Triest: Sein Vater war Schmied. Welch ein Beruf lässt sinnlicher erfahren, dass wir in einer

soliden, materiellen Welt leben? Vielleicht tendiert Bassi auch aus dieser Erfahrung heraus zu einer objektiven Realität, in der die Dinge unabhängig von Beobachtenden existieren.

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 Universitätsinstituten und einem Privatunternehmen. TEQ (*Testing the large-scale limit of Quantum Mechanics*) heißt das Projekt; Angelo Bassi hat es mit erdacht, die EU finanziert die Forschung mit 4,4 Millionen Euro.

Die in verschiedenen Städten Europas speziell entwickelten Bauteile sind an der Universität von Southampton zusammengekommen. Im Parterre des Physikgebäudes haben Hendrik Ulbricht

und sein Team sämtliche Komponenten vereint. Von außen sieht das Experiment aus wie ein Ölfass mit Röhren- und Kabelfrisur: In dem Fass stecken, ineinander gepackt wie Matroschkas, zwei Kryostaten, Hightech-Kühlgeräte, die das Innerste auf eine Temperatur knapp über dem absoluten Nullpunkt abkühlen. Dieses Innerste bildet eine Paul-Falle, ein Käfig, in dem ein winziges Glaskügelchen schwebt, gut 100 Millionstelmillimeter groß, gehalten von elektrischen Feldern.

Auf das Glaskügelchen richtet sich die Aufmerksamkeit. Um Störungen fernzuhalten, treibt die Gruppe einen Mordsaufwand: Sie hat das Experiment auf einem Spezialtisch installiert, um es von Vibrationen durch den Stadtverkehr zu entkoppeln, sie erzeugt in der Falle ein Ultrahochvakuum, sie schirmt Licht penibel ab, sie kühlt mit flüssigem Helium und Laserlicht.

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

HINTER DEM Hin- und Herwackeln der Glaskügelchen könnte, so die Überlegung der Kollaps-Fans, eine ebenfalls unsichtbare und bislang unbekannte Störquelle stecken. Vielleicht die Gravitation, wie Roger Penrose vermutet, vielleicht etwas ganz anderes. Noch ist der Spekulation Tür und Tor geöffnet. Die an TEQ Beteiligten hoffen

ANWENDUNGEN

Wie uns die Quantenmechanik nützt

Viele technische Errungenschaften, die auf der Quantenmechanik beruhen, haben längst Eingang gefunden in unseren Alltag. Laser und Mikroelektronik bedienen sich der bizarren Eigenschaften von Lichtteilchen und Elektronen. Die Magnetresonanztomografie ermöglicht Bilder des Körperinneren, weil Atomkerne wie winzige Kreisel nur in definierten – gequantelten – Energiezuständen rotieren. Inzwischen jedoch tüfteln Wissenschaftler*innen weltweit an der zweiten Generation von Quantentechniken.

Das wohl ehrgeizigste Ziel ist der **Quantencomputer**. Microsoft, Google und IBM, aber auch Universitäten und Start-ups arbeiten daran. Sie stellen Nullen und Einsen, also die Binärzahlen, auf denen digitale Informationsverarbeitung beruht, mithilfe von Quantenobjekten dar, mit isolierten Ionen oder supraleitenden Schwingkreisen. Der Dreh: die Quantenbits zu verschränken, sie also in einen Zustand zu versetzen, in dem sie wie durch ein unsichtbares Band verknüpft sind. Gelingt das, wirken sich Manipulationen eines Bits automatisch auf alle anderen aus, die Rechenleistung erhöht sich dramatisch. Allerdings werden wir Quantencomputer nicht auf unseren Schreibtischen finden, sie sind prädestiniert für Spezialaufgaben wie die Suche in Datenbanken und die Berechnung von Molekülen in der Medikamentenforschung. Zudem leben die Teilchen ihre erstaunlichen Eigenschaften am liebsten im extrem kalten Vakuum aus.

Enormes Potenzial sehen Fachleute in der **Quantenkryptografie**. Eine durch Verschränkung von Lichtteilchen codierte Nachricht gilt als unknackbar, zumindest fällt es sofort auf, wenn Unbefugte mitzulesen versuchen und so die Verschränkung der Teilchen durchbrechen. Einige Firmen bieten bereits Systeme zur Quantenverschlüsselung an, die aber nur über kurze Distanzen funktionieren. Ein großer Schritt vorwärts gelang 2018 einem chinesischen Team. Es übermittelte einen Schlüssel aus verschränkten Photonen zwischen zwei 1100 Kilometer entfernten Orten.

Am schnellsten könnten **Quantensensoren** Anwendung finden. Da Atome, Photonen und Elektronen in Quantenzuständen empfindlich auf ihre Umwelt reagieren, eignen sie sich perfekt für feinste Messungen. Mit tiefgekühlten Atomen, die in eine Vakuumröhre fallen, lassen sich winzige Fluktuationen im Schwerfeld der Erde erkennen, ausgelöst etwa durch aufsteigendes Magma oder durch noch unentdeckte Öl- und Gasvorkommen. Mit extrem kalten Atomen gelingt es auch, Beschleunigungen sehr präzise zu messen. Nach diesem Prinzip entwickeln Forschungsteams einen **Quantennavigator**. Statt die eigene Position ständig per Satellit zu bestimmen, registriert das Navi der Zukunft jede Kurve, jede Geschwindigkeitsveränderung und berechnet daraus, wo das Fahrzeug sich befindet. Das funktioniert auch, wenn das GPS-Signal ausfällt, oder in einem U-Boot.

Klaus Bachmann

aber, dass die Macht im Hintergrund zumindest einen erkennbaren Fingerabdruck hinterlässt. Und wenn das passiert, könnten sie jedenfalls mit Fug und 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 in der Mikrowelt gewonnen.

Im Sommer 2021 sind die ersten Messungen gelaufen.

Ulbricht brennt auf die Ergebnisse. Früher habe er sich auf die Rolle des Experimentators zurückgezogen, erzählt er. So musste er in der Quantendebatte keine Position beziehen, sondern konnte sich damit herausreden: Jetzt warten wir erst einmal, was das Experiment ergibt, dann sehen wir weiter.

Aber nachdem er sich lange mit den Modellen beschäftigt habe, bevorzuge er ein realistisches Weltbild. Eines, in dem Teilchen definierte Eigenschaften

haben. Und in dem sie nicht so nebulös daherkommen wie John Wheelers Bild des rauchenden Drachens. „Das ergibt mehr Sinn für mich“, sagt er. Ihn elektrisiert die Aussicht, „dass man noch etwas komplett Neues entdeckt, was alles umkrempelt.“ So ähnlich wie die Quantenmechanik am Anfang des 20. Jahrhunderts das Tor zu einer neuen Welt aufgestoßen hat, öffnet das Experiment vielleicht den Blick auf eine bislang verborgene Ebene von Naturkräften.

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.

Brukner glaubt ohnehin 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. „Die Quantentheorie ist eine junge Theorie“, sagt Bassi. „Wir müssen geduldig sein. Das zeigt die Wissenschaftsgeschichte. 100 Jahre sind da gar nichts.“

NATURPHILOSOPHIE

Den festen Boden verlierend

Seit Menschen über die Welt nachdenken, haben sich ihre Vorstellungen von Materie, Raum und Zeit fundamental verändert

ARISTOTELISCHE MECHANIK Dem griechischen Philosophen zufolge existiert der Raum nur, wo Materie ist – es gibt kein Vakuum. Sein Zentrum ist der Mittelpunkt der Erde – um ihn herum strukturiert sich das Universum. Jede Materie hat ihren natürlichen Ort, zu ihm strebt sie; dort angelangt, ruht sie. Aristoteles' Ideen prägten lange Zeit das Denken im arabischen sowie ab 12. Jahrhundert im europäischen Raum.

KLASSISCHE MECHANIK Die Erde ruhe nicht im Zentrum des Universums, sie kreise um die Sonne – Nikolaus Kopernikus bricht mit Aristoteles. Aber erst Isaac Newton begründet eine neue Weltsicht: Der Raum existiert an sich, zuweilen auch als Vakuum. Er bildet eine unendliche Bühne für das Wirken der Materie. Der Raum ist unveränderlich und überall gleich. Und über allem tickt die gleiche, stetig fortschreitende Zeit. Wenn Materie nicht ruht, bewegt sie sich geradlinig fort – bis eine Kraft sie auf eine neue Bahn lenkt. Solch eine Kraft ist die Gravitation: Sie entsteht, weil sich die Teilchen der Materie gegenseitig anziehen.

ELEKTRODYNAMIK Licht, Elektrizität und Magnetismus erweisen sich im 19. Jahrhundert als verschiedene Phänomene derselben Naturkraft. Diese lässt sich nicht mehr durch das Wirken von Materieteilchen erklären. Hinter ihr steckt etwas schwerer Fassbares: Felder. Keine Materie, sondern eine Form von Energie, die aber zwischen Materie Kraft ausübt. Licht ist die Welle eines solchen Feldes. Sie kann Vakuum durchqueren und hält sich dabei nicht an Newtons Bewegungsgesetze. Fortan gilt das Universum als nicht nur von Materie, sondern auch von Feldern bevölkert.

RELATIVITÄTSTHEORIE Albert Einstein verschmilzt grundlegende Begriffe der Physik: Raum und Zeit bilden eine Einheit, beide existieren nicht unabhängig von Materie. Raumzeit beeinflusst Materie (was wir als Gravitation wahrnehmen), zugleich verformt die Materie den Raum, verzerrt die Zeit, sodass sie nicht überall gleich schnell vergeht. Ein Anfang allen Seins ist wissenschaftlich denkbar: der Urknall. In seiner Formel $E=mc^2$ zeigt Einstein: Materie besitzt nicht nur Energie, sie *ist* Energie.

QUANTENTHEORIE Die Physik entfernt sich weiter von Alltagsvorstellungen. Teilchen und Wellen sind dem Wesen nach gleich: Beide sind Energiequanten. Der Raum ist nicht leer, sondern durchzogen von Quantenfeldern, deren sichtbare Elemente die Quanten sind. *Martin Scheufens*



Bemerkenswert fand GEO-Redakteur **KLAUS BACHMANN** (l.) die große Geduld, mit der ihm die Forscher Auskunft gaben. Der italienische Fotograf **MATTIA BALSAMINI** (M.) arbeitet bevorzugt über technische und wissenschaftliche Themen. Der in London lebende Fotograf **DAVID VINTINER** konnte zum Glück ohne Corona-Quarantäne den englischen Part der Fotoproduktion übernehmen.