

Ein realisierbares Gedankenexperiment

Verschränkte Spiegel

ROMAN SCHNABEL | HELGE MÜLLER-EBHARDT | HENNING REHBEIN

Zwei Objekte können so stark miteinander gekoppelt werden, dass sie dabei ihre individuelle Identität verlieren: Sie formen ein neues Quantenobjekt. Diese Quantenverschränkung lässt sich nicht nur an Photonen oder Atomen beobachten. Heute erscheint es technisch möglich, auch makroskopisch große und schwere Objekte miteinander zu verschränken, zum Beispiel zwei Spiegel.

Mit der Entwicklung der Quantentheorie zu Beginn des 20. Jahrhunderts wurde einer neuen Klasse von Experimenten ein mathematisches Gerüst gegeben. Beispielsweise konnte nun erfolgreich beschrieben werden, wie Licht oder Elektronen mal wie Teilchen, mal wie Wellen in Erscheinung treten. Inzwischen konnte dieser Welle-Teilchen-Dualismus sogar an großen Molekülen wie C_{60} -Fullerenen beobachtet werden [1].

Die Quantentheorie besagt, dass die Wechselwirkung zwischen physikalischen Systemen quantisiert, also in Portionen erfolgt. Das hat Auswirkungen auf hochpräzise Messungen, weil sich die quantisierte Wechselwirkung als Quantenrauschen bemerkbar macht. Dieses Quantenrauschen verhindert zum Beispiel eine beliebig genaue Messung der Position eines Spiegels, was zu einem Problem bei Gravitationswellendetektoren führt [2]. Diese basieren nämlich darauf, dass man mit Laserlicht präzise die Entfernung zwischen aufgehängten Spiegeln misst. Das Quantenrauschen setzt also bei solchen Detektoren der erreichbaren Messempfindlichkeit eine Grenze.

Das Albert-Einstein-Institut in Hannover betreibt mit GEO600 einen solchen Gravitationswellendetektor. Wir haben uns deshalb gefragt, ob an aufgehängten Spiegeln prinzipiell auch andere Quanteneffekte beobachtbar sind. Vor allem wollten wir herausfinden, ob wir zwei Spiegel quantenmechanisch miteinander verschränken können. Bislang wurde Verschränkung nur zwischen relativ kleinen und leichten Objekten erzeugt. Besonders erfolgreich funktioniert das bei zwei verschränkten Photonen, in anderen Experimenten wurden bis zu acht Ionen bezüglich ihrer energetischen Anregung verschränkt [3,4]. Grundsätzlich sollte Quantenverschränkung auch an schweren Objekten wie zwei Spiegeln beobachtbar sein. Wir wollen hier vorstellen, wie ein solches Experiment aussehen könnte.

Verschränkte Zustände

Noch während die Quantentheorie formuliert wurde, zeigte sich, dass sie eine neue Sichtweise auf die Physik mit sich brachte. Nach der Quantentheorie sollte es für alle Dinge, egal ob mit Teilchen- oder mit Wellencharakter, möglich sein, sich in verschränkten Zuständen zu befinden. Insbesondere die Verschränkung war es, die die Physiker ins Grübeln brachte. Den Begriff prägte Erwin Schrödinger im Jahr 1935 [5].

Es zeigt sich, dass zwei Teilchen in einem verschränkten Zustand beliebig weit voneinander entfernt sein können. Trotzdem besitzen sie in Bezug auf die miteinander verschränkten physikalischen Größen keine individuelle Eigenschaft: Sie formen mit ihrem Partner ein gemeinsames Quantenobjekt. Für Albert Einstein, Boris Podolsky und Nathan Rosen waren es genau diese verschränkten Zustände, die sie veranlassten, an der Quantentheorie zu zweifeln. Im Jahre 1935 publizierten sie eine Arbeit [6], in der sie ein besonderes Gedankenexperiment skizzierten, das ihrer Meinung nach einen Widerspruch in dieser Theorie aufzeigen sollte. Es wurde als EPR-Paradoxon berühmt.

Einstein, Podolsky und Rosen betrachteten darin zwei räumlich von einander getrennte Teilchen, die sich bezüglich ihrer Orte und Impulse in einem verschränkten Zustand befinden. Das Besondere an diesem Zustand ist, dass in Bezug zu einem gemeinsamen Referenzpunkt sowohl die Differenz der Abstände der beiden Teilchen als auch die Summe ihrer Impulse exakt bestimmt sind. Möglich wäre auch ein anderer verschränkter Zustand mit scharf definierten Werten für die Summe der Abstände und die Differenz der Impulse. Würde man nun präzise den Ort des einen Teilchens messen, so wüsste man auch präzise den Ort des anderen Teilchens. Das gleiche würde für eine alternative Messung der Impulse gelten. Man erhält also instantan *wahlweise* präzise Information über den Ort oder den Impuls eines beliebig weit entfernten Teilchens. Also besitzt dieses entfernte Teilchen *gleichzeitig* einen präzisen Ort und Impuls. Zumindest war das die Schlussfolgerung von Einstein, Podolsky und Rosen.

Dieses Gedankenexperiment scheint nun zu einem Widerspruch in der Quantentheorie zu führen, weil nach der Heisenbergschen Unschärferelation Ort und Impuls eines Teilchens nicht gleichzeitig präzise Werte haben dürfen. Der Ausweg aus diesem Dilemma wäre, dass beide Teilchen vor einer irgendwie gearteten Messung noch gar keine in-

dividuellen Eigenschaften bezüglich ihrer Orte und Impulse besitzen!

Diesen Ausweg lehnten Einstein, Podolsky und Rosen ab, denn er widersprach ihrem Verständnis der Physik. Stattdessen argumentierten sie, dass alle Größen eines Teilchens, die mit Bestimmtheit vorhergesagt werden können, tatsächlich auch dessen Eigenschaft sein sollten. Diese Eigenschaften sollten entsprechend lokal am Ort des Teilchens definiert sein. Sie sollten auch nicht von etwaigen Messungen an entfernten Teilchen abhängen. Schließlich käme das in dieser Sichtweise einer „spukhaften Fernwirkung“ gleich, wie Einstein es später nannte. Um das Problem zu lösen, schlugen die Drei eine Erweiterung der Quantentheorie vor.

Inzwischen gibt es viele erfolgreiche Experimente mit verschränkten Zuständen. Durch eine Verletzung der berühmten Bellschen Ungleichung konnte auch gezeigt werden, dass die Quantentheorie prinzipiell gar nicht so erweiterbar ist, wie es sich Einstein, Podolsky und Rosen vorgestellt hatten. Damit scheint genau das der Fall zu sein, was die Drei klar ablehnten: Zwei verschränkte Objekte haben gar keine lokal, individuell definierten Eigenschaften bezüglich der verschränkten Größen.

Verschränkte Würfel

Um das Besondere an verschränkten Objekten deutlich zu machen, betrachten wir zunächst zwei Würfel. Beide Würfel sollen ungezinkt sein, so dass ihre Augenzahlen vor einem Wurf absolut nicht vorhersagbar sind. Darüber hinaus sollen sie aber auch in ihrer Eigenschaft „Augenzahl“ miteinander verschränkt sein. Damit wäre das folgende, ungläubliche Szenario möglich.

Die beiden Würfel befinden sich in getrennten Räumen, jeder in einem Würfelbecher. In jedem Raum befindet sich auch ein Spieler, der seinen Würfel aus dem Becher nimmt und ihn wirft. Man sieht, wie der Würfel über den Tisch rollt und zufällig auf einer Seite liegen bleibt. Beide Spieler notieren sich ihr Ergebnis. Danach legen sie ihre Würfel zurück in die Würfelbecher. Das Ganze wiederholt sich nun zum Beispiel alle zehn Sekunden. Dabei richtet sich jeder Spieler nach einer Uhr in seinem Raum. Dass die Würfel exakt gleichzeitig geworfen werden, ist dabei allerdings nicht wichtig. Am Ende des Spiels treffen sich beide und vergleichen ihre Notizen. Zunächst stellen sie fest, dass jeder Würfel wie erwartet zufällig die Zahlen von eins bis sechs produziert hat. Dann stellen sie jedoch verblüfft fest, dass ihre Kolonnen von Zufallszahlen Eintrag für Eintrag genau identisch sind.

Wir würden natürlich sofort vermuten, dass die „Zufalls“-Zahlen gar keine echten Zufallszahlen sind. Dieses erstaunliche Ergebnis wäre ja nur erklärbar, wenn noch während des Würfelrollens irgendwelche verborgenen Kräfte im Spiel waren. Oder wenn Schummelei durch heimlichen Informationsaustausch vorlag: Der Würfel, der eher fällt, könnte blitzschnell ein Signal zum zweiten Würfel gesendet haben, der sich dann entsprechend genauso hingelegt hätte. Aber nichts von alledem ist bei Verschränkung der Fall.



Abb. 1 Zwei verschränkte Würfel würden nach einem Wurf immer eine zufällige, aber identische Augenzahl zeigen – unabhängig davon, wie weit sie von einander entfernt sind. Das Erstaunliche dabei: Beim Würfeln gäbe es keinen Austausch, weder in Form physikalischer Kräfte noch in Form sonstiger Information (etwa für die Würfelnden). (Bild: A. Franzen, Albert-Einstein-Institut.)

Während die Würfel rollen, gibt es weder eine das Ergebnis beeinflussende Kraft, noch einen Informationsaustausch. Die Zahlen sind in der Tat echte Zufallszahlen – und trotzdem bei beiden Würfeln identisch.

Als logische Konsequenz scheint das Wurfresultat des ersten Würfels vom Ergebnis des zweiten abzuhängen – und umgekehrt (Abbildung 1). Die beiden sind keine unabhängigen, individuellen Würfel mehr, sondern formen eine Einheit, ein verschränktes Objekt. Später werden wir sehen, dass zwei verschränkte Spiegel sich recht ähnlich verhalten.

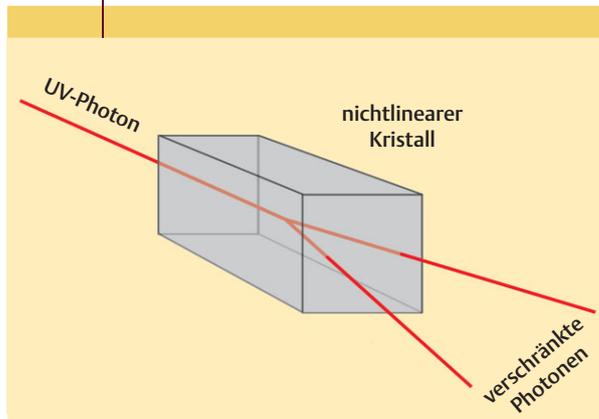
In diesem Gedankenexperiment entspricht übrigens das Fallen der Würfel einer Messung der Augenzahl. Eine Messung zerstört unweigerlich die Verschränkung. Das Zurücklegen der Würfel in die Würfelbecher dient hier also dazu, die Verschränkung wieder neu aufzubauen.

Wie erzeugt man Verschränkung?

Verschränkung entsteht – sozusagen ganz natürlich – beim spontanen Zerfall eines Objekts. „Spontan“ bedeutet hier, dass der Zerfall ohne Einfluss der Umgebung passiert. Weil also die Umgebung keine Rolle spielt, sind die physikalischen Eigenschaften des Zerfalls zunächst nur relativ zueinander definiert, aber eben nicht relativ zur Umgebung.

Besonders erfolgreich sind Verschränkungsexperimente mit Photonen. Ein ultraviolettes Photon kann beispielsweise in einem bestimmten, nichtlinearen Prozess spontan in zwei rote Photonen der halben Energie zerfallen (Abbildung 2). Dabei ist die Polarisation nur wechselseitig zwischen den Photonen definiert, aber nicht relativ zur Umgebung. Erst wenn ein Außenstehender die Polarisation an ei-

ABB. 2 | VERSCHRÄNKTE PHOTONEN



Ein Kristall (grauer Quader) mit bestimmten nichtlinearen optischen Eigenschaften kann aus einem ultravioletten Photon zwei rote Photonen erzeugen, die in ihrer Polarisation miteinander verschränkt sind.

nem Photon misst, legt er diese relativ zur Umgebung fest. Instantan hat nun das zweite Photon auch eine bestimmte, in Bezug zur Umgebung definierte Polarisation (zum Beispiel die gleiche) – egal wie weit es entfernt ist.

Man kann Verschränkung aber auch mit zwei Objekten erzeugen, deren physikalische Größen zunächst völlig lokal und individuell definiert sind. Dazu muss man sie in eine starke Abhängigkeit untereinander bringen, zum Beispiel durch eine gemeinsame „Kraft“. Ist diese stark genug und der Einfluss der Umgebung schwach, so kann nach einer gewissen Zeitdauer die Verbindung zur Umgebung in den Hintergrund treten. Die vormals individuellen Objekte beginnen, eine neue Einheit zu bilden. Auch wenn man diese Kraft nun abstellt, bleibt ihre Einheit und damit ihre Verschränkung erhalten. Dies gilt zumindest so lange, bis der Einfluss der Umgebung wieder dominiert.

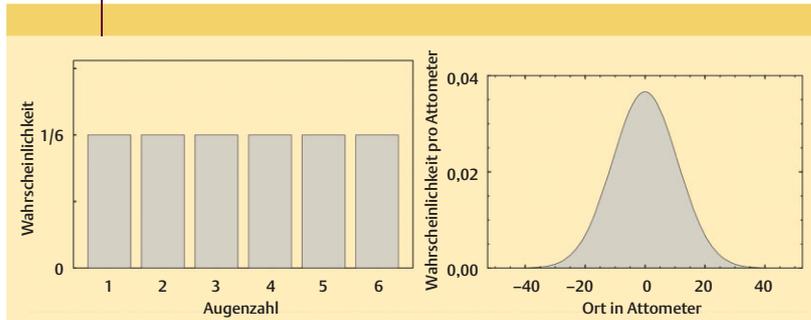
Dieses zweite Prinzip ist die Grundlage unserer Idee, zwei Spiegel miteinander zu verschränken. Dabei stellt sich die Frage, worin die Herausforderung im Vergleich zu mikroskopischen Teilchen liegt, wenn man zwei echt makroskopische Objekte miteinander verschränken will. Generell

ist es wesentlich schwieriger, große und schwere Objekte gut von der Umgebung zu entkoppeln. Zunächst müssen wir uns aber noch eine weitere Frage stellen: Auf Basis welcher physikalischen Größen sollen die beiden Spiegel überhaupt miteinander verschränkt werden?

In unserem Vorschlag sollen diese Größen die Orte und Impulse der beiden Spiegelschwerpunkte sein [7]. Dabei wollen wir nur die Komponente in einer Raumrichtung betrachten. Diese Raumrichtung wird durch die Ausbreitungsrichtung von Laserstrahlen bestimmt, die von den Spiegeln reflektiert werden und die über ihren Lichtdruck die Verschränkung erzeugen. Besonders schwierig gestaltet sich dieses Experiment, weil viele verschiedene Kräfte aus der Umgebung die Bewegung der Spiegel beeinflussen können. Gewinnen sie Oberhand, so legen sie die Orte und Impulse der einzelnen Spiegel relativ zur Umgebung fest. Sie würden so verhindern, dass sich die Verschränkung aufbauen kann. Sowohl elektrische als auch magnetische Kräfte auf die Spiegel müssen also gut genug abgeschirmt werden. Wir müssen unsere Spiegel aber auch irgendwie halten. Diese Halterung wird notwendigerweise die Orte und Impulse der Spiegel beeinflussen. Dazu später mehr.

Zunächst vergleichen wir die Situation mit unseren verschränkten Würfeln. Bei ihnen sind die Augenzahlen miteinander verschränkt. Jeder ideale Würfel für sich betrachtet liefert jede der sechs möglichen Augenzahlen mit der Wahrscheinlichkeit von $1/6$. Die Größe „Augenzahl“ hat also ein sogenanntes diskretes Wertespektrum. Bei der Spiegelbewegung besitzen jedoch die zu verschränkenden Größen kontinuierliche Wertespektren. Die Wahrscheinlichkeit, dass sich ein bestimmter Wert für den Ort (oder auch Impuls) realisiert, muss also durch eine kontinuierliche Funktion beschrieben werden. Diese Funktion ist eine Gauß-Verteilung um den wahrscheinlichsten Wert herum. Abbildung 3 vergleicht das diskrete und das kontinuierliche Spektrum. Den wahrscheinlichsten und zentralen Wert der kontinuierlichen Verteilung definieren die Halterungen der Spiegel. Daraus resultiert keinerlei Einschränkung für die Stärke der zu erwartenden Verschränkung, solange die Werteverteilung selbst allein durch die quantenmechanische Unschärfe des Spiegels gegeben ist. Für Spiegel von 100 g Masse, aufgehängt als Fadenpendel mit einer Sekunde Schwingungsperiode, ergibt sich für den Ort eine Breite der Gauß-Verteilung von gut 0,01 Femtometer (10^{-17} m).

ABB. 3 | WAHRSCHEINLICHKEITSVERTEILUNGEN



Links: Wahrscheinlichkeitsverteilung eines perfekten Würfels. Rechts: Wahrscheinlichkeitsverteilung des Ortes einer Masse von 100 g, die als Sekundenpendel aufgehängt ist, im quantenmechanischen Grundzustand.

Das Experiment

Die Basis des Experiments soll eine schwingungsarme Plattform bilden, die wir in einem Hochvakuum an dünnen Fasern, zum Beispiel Quarzfäden, aufhängen. So reduzieren wir Störungen aus der Umgebung von vornherein stark. An dieser Plattform sind ein Laser sowie ein halbdurchlässiges Fenster befestigt, das den Laserstrahl in zwei gleich helle Strahlen aufteilt (Abbildung 4). Bei dem Laser wird es sich um einen Dauerstrichlaser handeln, der die beiden Spiegel permanent seinem Lichtdruck aussetzt.

Die beiden Spiegel, die miteinander verschränkt werden sollen, sind ebenfalls über Halterungen mit der Plattform verbunden, hängen jedoch an dünnen Fasern. Die Konstruktion könnte derjenigen in Abbildung 5 ähnlich sehen. Die Aufhängefasern bestimmen die Position der Spiegel auf langen Zeitskalen. Sie sorgen auch dafür, dass die Spiegel vom Lichtdruck nicht langsam weggeblasen werden. Dank dieser pendelartigen Konstruktion verhalten sich beide Spiegel auf kurzen Zeitskalen von zum Beispiel einer hundertstel Sekunde wie frei schwebende Objekte, zumindest in Ausbreitungsrichtung der Laserstrahlen. Auf diesen Zeitskalen wollen wir nun die beiden Orte und Impulse der Spiegelschwerpunkte miteinander verschränken. Die gemeinsame Kraft auf die beiden Spiegel, die die quantenmechanische Kopplung der Spiegelbewegung herbeiführen soll, wird durch den Lichtdruck des Hochleistungslasers erzeugt. Ein Strahlteiler spaltet seinen Strahl gleichmäßig in zwei Teilstrahlen auf, die auf die Spiegel treffen. Diese sind so justiert, dass sie dieses Licht auf den Strahlteiler zurück reflektieren.

Vor dem Einschalten des Lasers werden sich die Spiegel etwas bewegen, jedoch noch völlig unabhängig voneinander. Selbst bei idealer Isolierung von der Umgebung und bei Temperaturen nahe des absoluten Nullpunkts lässt sich nämlich eine Bewegung nicht völlig unterdrücken. Ursache ist die Heisenbergsche Unschärferelation, die keine gleichzeitige, präzise Definition von Ort und Impuls eines Spiegels erlaubt. Folglich können wir nicht beide Größen exakt gleich null setzen.

Nach Einschalten des Lasers prasseln die Photonen seines Strahls in einer unregelmäßigen, zufälligen Folge auf beide Spiegel und lenken diese aus. Nach wenigen tausendstel Sekunden soll die Bewegung der Spiegel nur noch vom Lichtdruck der gemeinsamen Laserstrahlquelle bestimmt sein: Das System hat nun jede „Erinnerung“ an die Situation zuvor verloren. Ist der Einfluss der Umgebung und auch die thermisch angeregte Bewegung des Spiegels genügend unterdrückt, so verschränkt der Lichtdruck genau in diesem Moment die Spiegel miteinander. Aber wie äußert sich nun die verschränkte Spiegelbewegung? Wie können wir sie nachweisen und was ist das Besondere an ihr?

Eine Möglichkeit des Nachweises bieten die beiden reflektierten Laserstrahlen selbst: Bekanntermaßen ist Laserlicht ideal, um Entfernungen zwischen Spiegeln zu messen (siehe „Laserinterferometrie“ auf S. 239). Die Laserstrahlen beeinflussen nämlich nicht nur die Bewegung der Spiegel – die beiden Spiegelbewegungen beeinflussen umgekehrt auch die reflektierten Lichtstrahlen. Schwingt ein Spiegel vom Strahlteiler weg, so reflektiert er den Laserstrahl etwas später. Das reflektierte Licht trägt also Informationen über die Bewegung der Spiegel.

Für den Nachweis der Verschränkung muss man allerdings die Bewegung der Spiegel relativ zueinander betrachten. Diese Relativbewegung vermessen wir über die Interferenz. Wir lassen die beiden reflektierten Laserstrah-

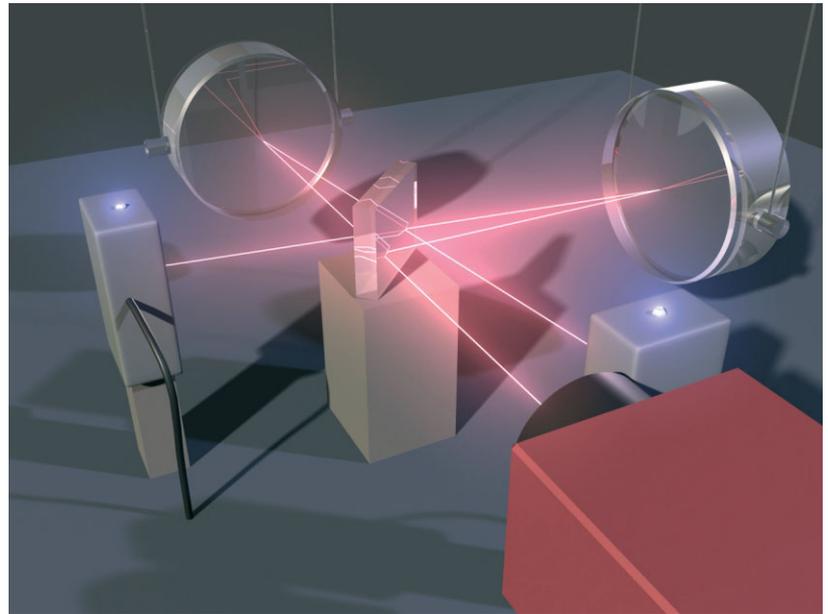


Abb. 4 Die Bewegungen der beiden aufgehängten Spiegel sollen über den Lichtdruck von Laserphotonen verschränkt werden. Die beiden Photodetektoren zum Nachweis der Verschränkung sind die grauen Kästen links und rechts unten, dort halb verdeckt vom Lasergehäuse (rot) (Bild: A. Franzen, Albert-Einstein-Institut).

len auf exakt den gleichen Punkt am Strahlteiler treffen, so dass sie über ihren kompletten Querschnitt miteinander interferieren. Dabei entstehen zwei neue Strahlen, deren Phasenverschiebungen (zeitliche Verzögerung) und Intensitätsänderungen die gewünschten Informationen liefern, sobald wir sie mit zwei photoelektrischen Detektoren analysieren. Der erste Detektor sitzt in der Nähe der Laserstrahlquelle: Er misst an seinem Interferenzstrahl im Wesentlichen dessen Phasenverschiebung gegenüber dem ursprünglichen Laserlicht (Abbildung 4 rechts, halb verdeckt vom Laser). Aus dieser Messung gewinnen wir eine präzise Information darüber, wie groß die Summe der Spiegelabstände relativ zum Strahlteiler ist.

Wenn wir viele solcher Messungen kurz nacheinander machen, sollte es sich zeigen, dass die Summe der Spiegelabstände vom Strahlteiler unglaublich wenig variiert. Die Unschärfe in diesem Messwert ist in der Tat kleiner als es der quantenmechanische Grundzustand der Spiegel erlaubt. Da sich die Spiegel wegen der Heisenbergschen Unschärferelation bewegen müssen, könnten wir nun schlussfolgern, dass ihre Bewegung perfekt *asynchron* ist: Während ein Spiegel vom Strahlteiler weg schwingt, bewegt sich der andere um die gleiche Auslenkung auf diesen zu. Nur so könnte die Summe der Abstände immer konstant bleiben.

Nun betrachten wir die Funktion des zweiten Detektors, der am anderen Ausgang des Interferometers sitzt (Abbildung 4 links). Er beobachtet im Wesentlichen die Intensitätsänderung des Laserstrahls: Diese Größe liefert eine Information über die asynchrone *Geschwindigkeit* der

Spiegelbewegungen. Doch hier erwarten wir nun die Beobachtung, dass der asynchrone Anteil der Spiegelbewegung verschwindend gering ist: Die Differenz der Impulse der Spiegel sollte annähernd null sein. Vom Standpunkt dieser Messung müssten wir also annehmen, dass Heisenbergs Unschärferelation nur erfüllt werden kann, wenn sich die Spiegel perfekt *synchron* bewegen. Genau das steht aber im Widerspruch zur ersten Messung.

Die verschränkten Spiegel scheinen also eine paradoxe, für uns unvorstellbare Bewegung durchzuführen: Laut Impulsmessung sollten sich die beiden Spiegel synchron, laut Ortssmessung aber asynchron bewegen. Genau dieser Widerspruch liefert laut Quantenphysik den Beweis für die Verschränkung und zeigt an, dass die Spiegelbewegungen zu einer quantenmechanischen Einheit verschmolzen sind. Definiert sind lediglich die Orte und Impulse der Spiegel in wechselseitiger Relation. Die Heisenbergsche Unschärferelation wird deshalb nicht verletzt, weil für jeden einzelnen Spiegel weder sein Ort noch sein Impuls in Bezug zur Umgebung definiert sind.

Spiegel versus Würfel

In dem Gedankenexperiment mit den verschränkten Würfeln haben zwei unabhängige Beobachter die Würfelzahlen notiert. Im Prinzip sollte ein vergleichbares Experiment auch mit den verschränkten Spiegeln möglich sein. Dazu bräuchten wir zwei Messapparaturen, jeweils in der Nähe beider Spiegel. Diese Apparaturen könnten nun unabhängig voneinander zum Beispiel die Impulse der Spiegel in Bezug zur Plattform beobachten. Wie bei den Würfeln be-

stünde bei verschränkten Spiegeln das Ergebnis in zwei unvorhersagbaren Zahlenkolonnen, die jedoch – im Rahmen der Messgenauigkeit – identisch wären.

Anders als bei den Würfeln wäre das Messwertespektrum jedoch kontinuierlich. Wir können also nicht erwarten, dass die Zahlen (im Rahmen der Messgenauigkeit) bis auf beliebige Stellen hinter dem Komma übereinstimmen. Aber warum ist die Behauptung, dass die Spiegel ein den Würfeln vergleichbares Verhalten zeigen, trotzdem richtig? Auch bei den Spiegeln sind die Messergebnisse zufällig, sollten also gar keine Übereinstimmung zeigen. Im Beispiel der verschränkten Würfel haben wir einfach vorausgesetzt, dass jeder Würfel für sich ein zufälliges Ergebnis liefert, sie also ungezinkt sind. Die beobachtete Korrelation führt dann direkt zu einer paradoxen Situation.

Bei den verschränkten Spiegeln müssen wir die Zufälligkeit der Messergebnisse noch beweisen. Das machen wir über die zweite, komplementäre Messung: Wir führen zwischen den Impulsmessungen ab und zu Ortssmessungen durch. Beobachten wir bei diesen Messungen die besagte starke Antikorrelation der Messwerte, so ist diese ein Beweis, dass die Impulse der Spiegel nicht einfach derart präpariert worden sind, dass die Messwerte stark korreliert sind. Heisenbergs Unschärferelation würde ja in der Tat auch für nicht verschränkte Spiegel erlauben, dass die Impulse der Spiegel sehr scharf definiert sind, und hier gerade so, dass die Differenz nicht schwankt. Aber in diesem Fall müssten die Orte sehr unscharf sein. Diesen Sachverhalt schließen wir mit der Beobachtung der komplementären Messgröße aus. Für den Fall, dass die zweite Messgröße die Verschränkung beweist, gilt, dass die gewonnenen Messreihen bei der Impulsmessung zufällige Einträge haben.

Wir können die verschränkten Spiegel also als direkte Analogie zu den verschränkten Würfeln ansehen. Nun wollen wir das Experiment noch etwas genauer betrachten: Verschränkung ist eine sehr zerbrechliche Eigenschaft unseres Systems. Wenn wir den Laser abschalten, verbleibt uns schätzungsweise nur eine hundertstel Sekunde, diese auch nachzuweisen. Es ist unvermeidlich, dass die Spiegel mit ihrer Umwelt wieder in Wechselwirkung treten und dabei ihre Quanteneigenschaften zerstört werden. Die Verbindung zur Umgebung tritt also wieder in den Vordergrund, und das System lässt sich im Rahmen der klassischen Physik beschreiben.

Dieser Effekt, der als Dekohärenz bezeichnet wird, führte zu der weit verbreiteten Annahme, dass es prinzipiell gar nicht möglich ist, quantenmechanische Phänomene an makroskopischen Objekten zu beobachten. Tatsächlich ist es aber so, dass Verschränkung auch in der Gegenwart nicht zu starker Dekohärenz beobachtbar ist. Der Trick ist, die verschränkungserzeugende Kraft möglichst stark zu machen, und direkt nach ihrem Abschalten nur einen kurzen Zeitabschnitt zu beobachten. Auf längeren Zeitskalen wird sich unweigerlich der Einfluss der Umgebung störend bemerkbar machen. Um dem zuvor zu kommen, müssen wir die verschränkende Kraft also wieder kurz aktivieren und

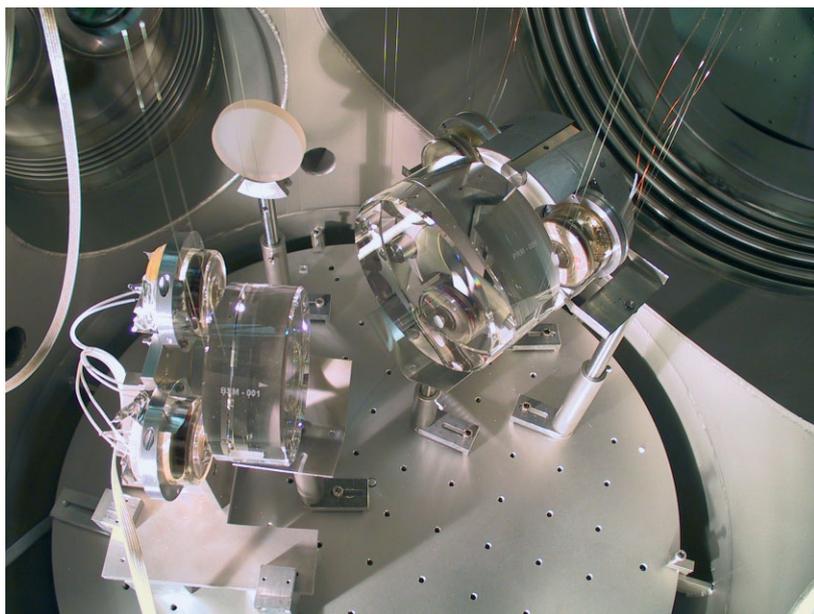


Abb. 5 Spiegel im Gravitationswellendetektor GEO600. Sie hängen über 0,2 mm dicken Quarzfäden an einem aufwendigen System von Pendeln und Blattfedern, um ihre Bewegung sorgfältig von Umgebungseinflüssen zu entkoppeln. Zwischen ihnen reflektieren Laserstrahlen hin und her, um Veränderungen in ihrem Abstand zu messen (Foto: H. Lück, Albert-Einstein-Institut).

dann erneut abstellen. So ist eine kontinuierliche Aufnahme der beiden Impulsmessreihen möglich.

Mit der Zeit wird es aufgrund der Störungen aus der Umgebung allerdings zu einer Verschiebung der synchronen Schwankung, also der Korrelation kommen. Bei den Würfeln würde das veranschaulicht bedeuten, dass nach beispielsweise hundert Würfeln plötzlich der erste Würfel ständig eine um eins höhere Zahl zeigt als der zweite (und statt der Sechs eine Eins). Die Korrelation hat sich verschoben. Das ändert jedoch nichts an der Präsenz von Verschränkung. Schließlich gibt es noch immer die Möglichkeit, vom Ergebnis des einen Würfels mit fast hundertprozentiger Sicherheit auf das Ergebnis des zweiten Würfels zu schließen: Wir müssen nur die systematische Verschiebung erkennen. Genau so würden wir auch bei einem Experiment mit verschränkten Spiegeln vorgehen: Wir würden neue Messergebnisse auf die Erkenntnis früherer Messungen „konditionieren“.

Im Prinzip ist auf diese Art also auch das EPR-Paradoxon mit verschränkten Spiegeln demonstrierbar. Stellen wir den Laser ab, so sind die Spiegel ohne Kontakt zueinander, trotzdem bleibt die Verschränkung aber für eine kurze Zeit erhalten. Bei genügend starker Verschränkung können wir mit einer Messung des Ortes des einen Spiegels nun den Ort des anderen Spiegels präzise bestimmen. Alternativ können wir mit einer Messung eines Spiegelimpulses denjenigen des zweiten Spiegels vorhersagen. Die Wahl der Art der Messung bleibt dem Beobachter am ersten Spiegel überlassen. In jedem Fall ist die Vorhersage erfolgreich, obwohl der zweite Spiegel (wie auch der erste) nicht gleichzeitig einen scharf definierten Ort und Impuls besitzen darf.

Zurzeit untersuchen wir noch, wie eine solche Demonstration des EPR-Paradoxons mit verschränkten Spiegeln praktisch durchführbar wäre. Ein echtes An- und Abschalten des Laserstrahls würde nämlich zu viele Störungen im Experiment hervorrufen.

Ist unser Vorschlag realisierbar?

Unser vorgeschlagenes Experiment stellt ohne Frage enorme Anforderungen an die apparative Ausrüstung. Voraussetzung ist ein hochstabiler und leistungsstarker Laserstrahl, in dem die zeitliche Variation der Photonen nur von der Quantentheorie bestimmt ist und nicht von Schwingungen oder Temperaturschwankungen des Laserkristalls. Der Laserstrahl muss genügend Leistung haben, damit der Strahlungsdruck seiner Photonen die beiden massereichen Spiegel quantenmechanisch koppeln kann.

Die Spiegel müssen wir wahrscheinlich auf Temperaturen von wenigen Kelvin abkühlen, um sämtliche inneren Bewegungen der Spiegel einzufrieren. Die Brownsche Bewegung der Atome des Spiegelmaterials lässt nämlich den Abstand zwischen Spiegeloberfläche und Spiegelschwerpunkt permanent variieren. Wir wollen ja die Schwerpunkte der Spiegel miteinander verschränken, die Laserstrahlen werden jedoch von ihren Oberflächen reflektiert. Da die Spie-

LASERINTERFEROMETRIE

In der Laserinterferometrie nutzt man die Welleneigenschaft des Lichts, um Entfernungsänderungen mit großer Präzision zu messen. Der Strahl eines Dauerstrichlasers wird an einem halbdurchlässigen Spiegel, dem Strahlteiler, in zwei gleich helle Strahlen aufgetrennt. Einer der beiden Strahlen läuft entlang der zu vermessenden Strecke, der zweite entlang einer Referenzstrecke.

Entscheidend ist, dass beide Laserstrahlen wieder auf einen gemeinsamen Punkt zurückgeführt werden, um dort zu interferieren. Dieser Punkt liegt entweder auf dem gleichen Strahlteiler oder auf einem zweiten, baugleichen Strahlteiler. Dort überlagern sich die elektromagnetischen Felder beider Strahlen: Der Strahlteiler wirkt nun als Strahlkombinierer und produziert in Reflexion und in Transmission zwei neue Strahlen.

Bei Präzisionsmessungen sollten sich beide Strahlen am Referenzpunkt so überlagern, dass ihr Licht über den gesamten Laserstrahlquerschnitt vollständig interferieren kann. Dazu müssen beide Eingangsstrahlen an diesem Punkt geometrisch exakt gleich sein, also gleiche Strahldurchmesser und gleiche Krümmungen der Wellenfronten haben. Herrscht nun für einen der Ausgangsstrahlen perfekte destruktive Interferenz, dann befindet sich

wegen der Energieerhaltung das gesamte Licht im anderen Ausgang: Der zweite Ausgangsstrahl zeigt also konstruktive Interferenz. Wieso ist diese Interferenz zur präzisen Messung von Entfernungsänderungen nutzbar?

Perfekte destruktive Interferenz tritt genau dann auf, wenn sich in diesem Ausgang zwei Lichtwellen gleicher Amplitude so überlagern, dass Wellenberg auf Wellental trifft. Ändert sich jedoch anschließend die Länge der Messstrecke nur um die Hälfte der Wellenlänge des Lichts, in unserem Experiment um die Hälfte von 1064 nm, so entsteht aus perfekt destruktiver Interferenz perfekt konstruktive Interferenz.

Bei einer Entfernungsänderung von nur einem Femtometer (10^{-15} m) würde die Lichtleistungsänderung bei einem Watt Gesamtleistung immerhin noch einige Nanowatt betragen können. Tatsächlich kann man Photodetektoren bauen, die auf kurzen Zeitskalen von Millisekunden so kleine Änderungen der Lichtleistung messen können. Die empfindlichsten Laserinterferometer, die je gebaut worden sind, sind Gravitationswellendetektoren. Indem sie um Größenordnungen höhere Laserleistungen verwenden, sind sie in der Lage, sogar Entfernungsänderungen von nur einem Attometer (10^{-18} m) zu messen.

gel zudem geringfügig Licht absorbieren, erwärmt sie der Laser. Das erschwert das Erreichen eines ausreichend niedrigen Temperaturniveaus. Die Spiegel könnten durchaus Massen von bis zu einem Kilogramm haben, sollten aber möglichst aus einem einzelnen (synthetischen) Kristall gefertigt sein. Dadurch konzentriert sich die thermische Energie der Spiegel auf einige wenige Vibrationsmoden, so dass der Einfluss der Brownschen Bewegung sich weiter reduziert.

Diese Anforderungen sind hoch, nach dem heutigem Stand der Experimentiertechnik jedoch erfüllbar. Wir sehen deshalb gute Chancen, die verschränkten Spiegel in vielleicht nur wenigen Jahren Realität werden zu lassen. Damit ließen sich die verblüffenden Paradoxien der Quantenwelt auch an makroskopischen Objekten demonstrieren.

Zusammenfassung

Die Herstellung von verschränkten Quantenobjekten aus Photonen oder Ionen ist bereits Routine. Da die Quantenmechanik der Größe und Schwere solcher Objekte keine prinzipielle Obergrenze setzt, sollten sich auch makroskopische Gegen-

stände miteinander verschränken lassen. Allerdings stellt das hohe Ansprüche an die Experimentiertechnik, vor allem im Bereich der Laser- und Kältetechnik, sowie an die Methoden zur Entkopplung der Objekte von der Umgebung. Die hier vorgestellte Idee nutzt einen Laserstrahl, um zwei massive Spiegel miteinander zu verschränken. Das entsprechende Experiment soll in den nächsten Jahren realisiert werden. Es könnte sogar eine Demonstration des Einstein-Podolsky-Rosen-Paradoxons mit makroskopischen Objekten ermöglichen.

Stichworte

Verschränkung, verschränkte Würfel, verschränkte Spiegel, Laserinterferometrie, GEO600, Heisenbergsche Unschärferelation, Einstein-Podolsky-Rosen-Paradoxon, Dekohärenz.

Literatur

- [1] M. Arndt, L. Hackermüller, K. Hornberger, *Physik in unserer Zeit* **2006**, 37(1), 24.
- [2] P. Aufmuth, K. Danzmann, *New J. Phys.* **2005**, 7, 202.
- [3] A. Aspect, P. Grangier, G. Roger, *Phys. Rev. Lett.* **1982**, 49(2), 91.
- [4] W. Hänsel, *Physik in unserer Zeit* **2006**, 37(2), 64.
- [5] E. Schrödinger, *Naturwissenschaften* **1935**, 48,807; 49,823 und 844.
- [6] A. Einstein, B. Podolsky, N. Rosen, *Phys. Rev.* **1935**, 47, 777.
- [7] H. Müller-Ebhardt et al., *Phys. Rev. Lett.* **2008**, 100(1), 013601.

Die Autoren



Roman Schnabel, Physikstudium an der Universität Hannover, 1999 dort Promotion. Postdoktorand am Max-Planck-Institut für Quantenoptik. Danach Stipendiat der Alexander-von-Humboldt-Gesellschaft an der Australian National University in Canberra. Im Anschluss Juniorprofessor an der Leibniz Universität Hannover. Dort seit 2008 Universitätsprofessor am Albert-Einstein-Institut.



Helge Müller-Ebhardt studierte Physik an der Leibniz Universität Hannover und der University of Manchester; zurzeit promoviert er am Albert-Einstein-Institut in Hannover.



Henning Rehbein studierte Physik an der Leibniz Universität Hannover und promoviert zurzeit am Albert-Einstein-Institut in Hannover.

Anschrift

Prof. Dr. Roman Schnabel, Institut für Gravitationsphysik der Leibniz Universität Hannover und Max-Planck-Institut für Gravitationsphysik (Albert-Einstein-Institut), Callinstrasse 38, D-30167 Hannover. Roman.Schnabel@aei.mpg.de