

## ■ Welcher Weg war das Ziel?

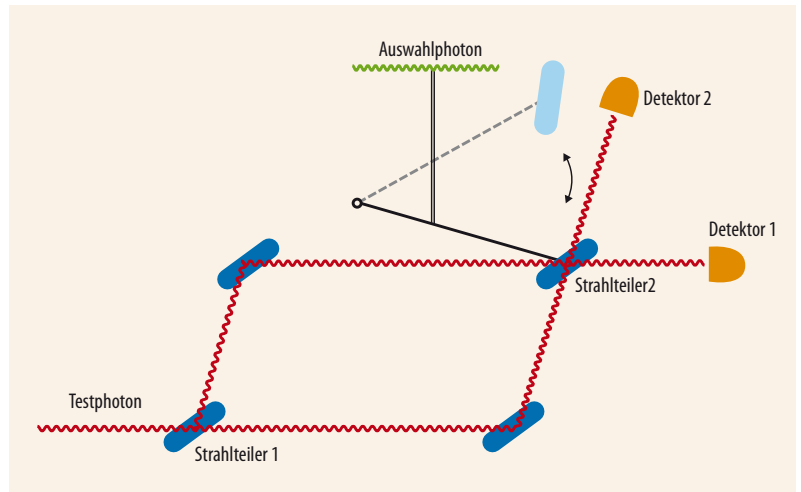
Ob ein Photon Teilchen- oder Wellencharakter hat, lässt sich noch nach seiner Detektion festlegen.

Wer die Wahl hat, hat bekanntlich die Qual. Ganz besonders scheinen davon Photonen betroffen zu sein, wenn sie sich entscheiden müssen, ob sie sich als Welle oder als Teilchen präsentieren sollen. Diese jahrhundertalte Kontroverse über das Wesen der Quantenobjekte scheint nicht beizulegen zu sein. Der einfache Doppelspalt hatte schon Einstein und Bohr fasziniert, und daran hat sich für viele bis heute nichts geändert. Der Experimentator kann und muss sich dabei entscheiden, ob er hinter den Spalten das Interferenzmuster oder doch lieber den gewählten Weg – links oder rechts – beobachten möchte. Das Interferenzmuster ist typisch für Wellen, wohingegen die Information über das Passieren eines bestimmten Spalts mit dem Teilchencharakter assoziiert ist. Nur eines der beiden Experimente ist möglich, nur ein Charakter – Welle oder Teilchen – ist real.

Besonders bizarr ist John Archibald Wheelers Vorschlag aus dem Jahr 1978 mit verzögerter Auswahl der Messung: Der Beobachter entscheidet sich erst dann für die Art der Messung, wenn das Photon die Spaltanordnung bereits passiert hat [1]. Nach der ersten experimentellen Realisierung 1984 [2], folgten verbesserte Varianten, meist mit einem Mach-Zehnder-Interferometer statt des Doppelspalts (Abb. 1) und zuletzt unter Verwendung echter Einzelphotonen [3].

Ein einfallendes Testphoton entscheidet sich dabei am Strahlteiler 1 für einen der beiden Wege und wird zufällig in Detektor 1 oder 2 nachgewiesen – solange kein zweiter Strahlteiler das Interferometer vervollständigt. Wenn hingegen Strahlteiler 2 im Strahlengang ist, verlässt das Testphoton das Interferometer aufgrund von Interferenz immer in Richtung von Detektor 1, und wir können nichts mehr darüber aussagen, welchen Weg es im Interferometer wohl genommen hat.

Weniger bekannt ist, dass der betrachtete Charakter nicht in Rein-



**Abb. 1** Ein einzelnes Testphoton trifft auf ein Mach-Zehnder-Interferometer und nimmt jeden der beiden Wege mit einer Wahrscheinlichkeit von 50 Prozent, wenn man sich für den Weg interessiert. Ist jedoch der Strahlteiler 2 im Strahlengang, wird das Photon durch Interferenz immer in Detektor 1 detektiert. Ein unab-

hängiges Auswahlphoton „schaltet“ Strahlteiler 2 in oder aus dem Strahlengang. In der quantenmechanischen Version bestimmt der Zustand (z. B. Polarisation) des Auswahlphotons direkt den Reflexionsgrad von Strahlteiler 2 zwischen 0 (Wegmessung) und 50 Prozent (perfekte Interferenz).

kultur vorliegen muss, sondern dass es auch alle Nuancen dazwischen geben kann. Der Reflexionsgrad des Strahlteilers 2 ist für eine teilweise Weg-Unterscheidbarkeit verbunden mit unvollständiger Interferenz entscheidend: 50 Prozent ergibt perfekte Interferenz, 0 Prozent, also kein Strahlteiler, liefert perfekte Weginformation [4].

Wer glaubt, das Thema wäre mit den Überlegungen und Experimenten der Vergangenheit abgehakt, täuscht sich. Ein kürzlich erschienener theoretischer Vorschlag überlässt die Entscheidung – Wellen- oder Teilchencharakter – einem anderen einzelnen Quantenteilchen [5]. Der Zustand (z. B. die Polarisation) eines so genannten Auswahlphotons legt den Reflexionsgrad von Strahlteiler 2 zwischen 0 Prozent für Wegmessung und 50 Prozent für perfekte Interferenz fest. Aufgrund der kohärenten Kopplung des Auswahlphotons an den „Strahlteiler“ werden die Eigenschaften der beiden Photonen verschränkt.

Mit dieser Verschränkung bzw. der später stattfindenden Messung des Auswahlphotons kann

nun die Entscheidung über den zu beobachtenden Charakter des Testphotons sogar bis nach dessen Detektion verschoben werden. Wem das zu abstrus klingt, sei beruhigt: Da Verschränkung keine Richtung hat, darf man in diesem Fall mit gleichem Recht sagen, dass der gemessene Zustand des Testphotons via Verschränkung den Zustand des Auswahlphotons bestimmt.

Zwei Forscherteams haben diese Idee nun im Experiment realisiert und dabei durchaus unterschiedliche experimentelle Strategien verfolgt [6, 7]: Peruzzo et al. benutzten einen integriert-optischen Schaltkreis, der aus acht (!) Mach-Zehnder-Interferometern besteht [6]. Am Anfang und Ende dienen je zwei Interferometer dazu, die Zustände der beiden Photonen einzustellen und zu messen. Dazwischen gibt es einen Schaltkreis, der die besagte Verschränkung herstellt und damit den Reflexionsgrad des Strahlteilers 2 an das Auswahlphoton koppelt. Erreicht wird diese Verschränkung aber nur, wenn auch beide Photonen in gewissen Ausgängen des Chips detektiert werden, man

spricht von einer nicht-deterministischen Wechselwirkung.

Klarerweise wäre so ein komplexer Aufbau niemals mit diskreten Elementen möglich, da die Weglängen de facto nicht über viele Stunden Messzeit stabil zu halten wären. Miniaturheizelemente auf dem Chip von Peruzzo et al. stabilisierten die Phasen der verschiedenen Teilinterferometer. Die Qualität des Experiments zeigt sich in der starken Verschränkung, die auf dem Chip zwischen den beiden Photonen erzeugt und nachgewiesen wurde.

Verglichen mit dieser komplexen Miniaturversion des quantenverzögerten Auswahlperiments nimmt die Apparatur von Kaiser et al. geradezu gigantische Ausmaße an [7]. Das liegt vor allem daran, dass die Autoren nicht nur die Verschränkung nachweisen, sondern auch jegliche Kommunikation zwischen den beiden Seiten des Experiments von vorneherein ausschließen wollten. Daher sind die beiden Seiten raumzeitlich getrennt, ähnlich wie in einer unserer Arbeiten [8].

Anstatt die zwei Photonen über die Wechselwirkung mit dem Strahlteiler zu verschränken, benutzten Kaiser et al. eine schon vorher existierende Verschränkung

aus einer typischen Quelle polarisationsverschränkter Photonenpaare. Die Polarisation des Auswahlphotons bestimmt über die Verschränkung die Polarisation des Testphotons und über die Polarisationsabhängigkeit des Strahlteilers dessen Reflexionsgrad. Damit gelang es, den Strahlteiler alleine durch Manipulation des Auswahlphotons zu schalten, 18 Meter entfernt vom Testphoton. Trotz dieser großen Entfernung konnte das Team einen noch höheren Verschränkungsgrad der Eigenschaften nachweisen als Peruzzo et al. [6].

Die schöne Erkenntnis aus diesen Versuchen ist, dass Komplementarität nicht nur im ursprünglichen, Bohrschen Sinn gilt, sondern weitaus allgemeiner zutrifft. Sowohl die kontinuierliche Variation der Beobachtungsart als auch deren Kontrolle durch ein anderes Quantenteilchen sind aus dieser Sicht erweiterte Ausprägungen des Komplementaritätsprinzips. Damit schließt sich der Kreis zur quantenmechanischen Verschränkung, was wieder einmal zeigt, dass man dem Quantenformalismus nicht leicht entkommen kann.

Beide Ergebnisse entsprechen im Rahmen der Messgenauigkeit exakt der Vorhersage der Theorie, wie bei den meisten Grundlagen experi-

menten zur Quantenphysik. Ist daher all unsere Arbeit und Mühe nur eine riesige Zeitverschwendung? Ich denke nicht; die Quantentheorie ist ein bisschen wie eine Insel in der Landschaft der Theorien. Wir wissen zwar, wie wir hingekommen sind, aber nicht, wie wir weitergehen könnten – es ist kein anderes Land in Sicht. Anstatt es sich auf der Insel gemütlich zu machen, müssen wir ihre Grenzen erkunden, indem wir immer ausgefeiltere Experimente durchführen. Wer weiß, vielleicht finden wir eines Tages dort Neuland, wo uns die Theorie nur Wasser vorhergesagt hat.

Gregor Weihs

- [1] J. A. Wheeler, *Mathematical Foundations of Quantum Theory*, hrsg. von A.R. Marlow, Academic Press, S. 9 (1978)
- [2] C. O. Alley, O. Jakubowicz und W. C. Wickes, *Proc. of the 2nd International Symposium: Foundations of Quantum Mechanics in the Light of New Technology*, Tokyo, Physical Society of Japan, S. 36 (1987)
- [3] V. Jacques et al., *Science* **315**, 966 (2007)
- [4] B.-G. Englert, *Phys. Rev. Lett.* **77**, 2154 (1996)
- [5] R. Ionicioiu und D. R. Terno, *Phys. Rev. Lett.* **107**, 230406 (2011)
- [6] A. Peruzzo et al., *Science* **338**, 634 (2012)
- [7] F. Kaiser et al., *Science* **338**, 637 (2012)
- [8] G. Weihs et al., *Phys. Rev. Lett.* **81**, 5039 (1998)

## NEBEL AUF EINEN BLICK

Seinen Betrieb hat es zwar bereits vor über einem Jahr aufgenommen, die offizielle Einweihung des VLT Survey Telescope (VST) am Paranal-Observatorium der ESO fand aber erst Anfang Dezember statt. Aus diesem Anlass hat die ESO die nebenstehende Aufnahme des Carinanebels veröffentlicht, einer riesigen Sternentstehungsregion etwa 7500 Lichtjahre von der Erde entfernt im Sternbild Carina (Kiel des Schiffs). Angesichts der großen Ausdehnung dieser hell leuchtenden Gaswolke können die meisten Teleskope nur einen kleinen Ausschnitt davon abbilden. Das VST ist jedoch speziell für Himmelsdurchmusterungen konzipiert und hat ein sehr großes Gesichtsfeld, sodass sich fast der gesamte Nebel auf einmal und extrem scharf aufnehmen lässt. Herzstück des 2,6-Meter-Teleskops ist die Kamera mit 268 Megapixel.

