

■ Born to be right?

Ein Beugungsexperiment am Dreifachspalt stellt die Quantentheorie auf den Prüfstand.

Die Bornsche Regel (auch: Bornsche Wahrscheinlichkeitsinterpretation) ist ein zentrales Postulat der Quantentheorie. Sie sagt uns, wie man aus der abstrakten Wellenfunktion der Schrödinger-Gleichung eine konkrete Vorhersage in Form von Wahrscheinlichkeiten von Ergebnissen möglicher Messungen erhält. Damit ist sie das wohl wichtigste verbindende Element zwischen Theorie und Experiment. Ursprünglich taucht sie in der Quantenphysik als Randnotiz auf – im wahrsten Sinne des Wortes. In seiner Arbeit zur Quantentheorie der Stoßvorgänge schreibt Max Born in einer korrigierenden Fußnote: „Genauere Überlegung zeigt, daß die Wahrscheinlichkeit dem Quadrat der Größe Φ_{nm} proportional ist“ [1]; dabei sind Φ_{nm} die Amplituden der Wellenfunktion, d. h. die Wahrscheinlichkeitsamplituden für das Eintreten eines bestimmten möglichen Ereignisses.

Doch wie exakt ist Borns Deutung tatsächlich? Kann es sein, dass das postulierte, einfache quadratische Gesetz nur näherungsweise gilt und die Quantentheorie in ihrer uns bekannten Form den Grenzfall einer verallgemeinerten Theorie bildet? Diese Frage stand im Fokus eines Experiments, das kürzlich Forscher der Universitäten Innsbruck und Waterloo durchgeführt haben [2]. Das Team um Gregor Weihs untersuchte dabei die Interferenz von einzelnen Photonen an einem Dreifachspalt. Die Idee dahinter ist einfach: Wenn Borns Postulat exakt gilt, bestimmen nur Interferenzerscheinungen der Einfach- und Doppelspalte die Wahrscheinlichkeitsverteilung der Photonen hinter dem Dreifachspalt, d. h. das Interferenzmuster. Dies lässt sich unabhängig von zusätzlichen Annahmen überprüfen. Um das zu sehen, werfen wir einen kurzen Blick auf den bekannten Doppelspalt: Wenn a und b die Wahrscheinlichkeitsamplituden da-

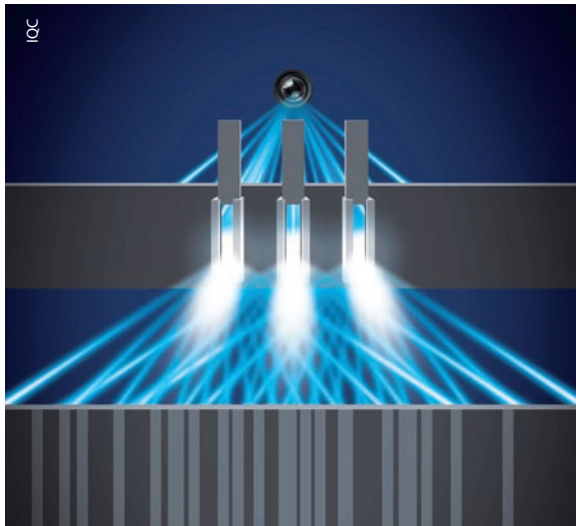
für sind, dass das Teilchen am Ort der Detektion den Weg durch Spalt A bzw. Spalt B genommen hat, ist die Detektionswahrscheinlichkeit für den Fall, dass beide Spalte offen sind, laut Born

$$P(AB) = |a + b|^2 = a^2 + b^2 + 2 \operatorname{Re}\{a^*b\}.$$

Die ersten beiden Beiträge sind die klassisch zu erwartenden Wahrscheinlichkeiten, dass das Teilchen entweder durch Spalt A oder durch Spalt B fliegt. Der letzte Teil ist der von der Quantentheorie vorhergesagte Interferenzterm, der mit der Annahme, dass das Teilchen einen konkreten Weg nimmt, inkonsistent ist. Was passiert, wenn ein dritter Spalt C existiert? Das Teilchen hat nun drei Möglichkeiten, an einem bestimmten Ort detektiert zu werden, und wie beim Doppelspalt ergibt sich die Detektionswahrscheinlichkeit als

$$P(ABC) = |a + b + c|^2 = a^2 + b^2 + c^2 + 2 \operatorname{Re}\{a^*b\} + 2 \operatorname{Re}\{b^*c\} + 2 \operatorname{Re}\{a^*c\}.$$

Man sieht hier eine direkte Konsequenz der Bornschen Regel: Da die Funktion zur Berechnung der Gesamtwahrscheinlichkeit exakt(!) quadratisch ist, mischen immer nur zwei der Amplituden, aber niemals drei, miteinander. Das Interferenzmuster ergibt sich daher als einfache Kombination aus den Verteilungen der Einzelspalte $P(A)$, $P(B)$ und $P(C)$ sowie der Verteilungen der drei möglichen Doppelspaltkonfigurationen $P(AB)$, $P(AC)$ sowie $P(BC)$. Bei jeder kleinen Abweichung von diesem exakt quadratischen Zusammenhang würden zusätzliche Interferenzterme auftreten, die alle drei Amplituden enthalten. Das eröffnet nun die Möglichkeit zu einem sehr präzisen Test der Quanteninterferenz, da sich alle auftretenden Terme experimentell bestimmen lassen: Die richtige Kombination der drei Einzel- und drei Doppelspaltverteilungen muss exakt das Beugungs-



Beim Drei-Spalt-Experiment ließen sich neben den quadratischen keine höheren Interferenzterme nachweisen, im Einklang mit Max Borns Wahrscheinlichkeitsinterpretation.

muster des Dreifachspalts ergeben. Im Experiment haben die österreichischen und kanadischen Forscher alle möglichen Kombinationen der Beugungsmuster vermessen. Dazu verwendeten sie einzelne Photonen, die mithilfe nichtlinearer Optik durch sog. spontane parametrische Downconversion erzeugt wurden. Dies stellte sicher, dass jedes Messereignis nur auf jeweils ein Photon zurückging. Für die Einzelspaltbeugung wurden jeweils zwei, für die Doppelspaltbeugung einer der drei Spalte abgedeckt. Schließlich ließ sich die Abweichung von der Bornschen Vorhersage überprüfen, indem man das ebenso aufgenommene Dreifachspalt-Interferenzmuster von der richtigen Kombination der gemessenen Einzel- und Doppelspaltverteilung abzog, und somit direkt die folgende Beziehung testet

$$P(ABC) - P(AB) - P(AC) - P(BC) + P(A) + P(B) + P(C) = 0.$$

Das Ergebnis: Im Rahmen der experimentellen Genauigkeit trat keinerlei Abweichung von den Vorhersagen der Quantentheorie auf. Die Autoren schließen, dass mögliche Dreispaltinterferenzen, wie sie bei einer Abweichung von Borns Regel zu erwarten wären, kleiner als ein Prozent der gemessenen Doppelspaltinterferenz sein müssten.

Wieder einmal hat also, innerhalb des Fehlerbalkens des Experiments, die Quantentheorie in ihrer

jetzigen Form recht behalten. Das Ergebnis liefert dennoch möglicherweise spannende Einsichten in die fundamentale Struktur der Quantenphysik. Zwar haben wir mit der Quantentheorie heute eine der erfolgreichsten Theorien der Physik. Doch wir scheitern nach wie vor an einem konsistenten Verständnis, welches Weltbild den Paradoxien der Quantenphysik zugrunde liegt. Die Arbeit von Weihs und Mitarbeitern reiht sich ein in eine Serie von wichtigen Experimenten, die versuchen, mögliche alternative Sichtweisen und Formulierungen der Quantentheorie zu überprüfen und so, durch Ausschluss an Alternativen, tiefer in die zugrundeliegenden Konzepte zu blicken. Beispiele sind Beugungsexperimente mit Neutronen zum Test von verallgemeinerten quaternionischen Quantentheorien [3] oder zum Test von nichtlinearen Erweiterungen der Quantentheorie [4], die vorgeschlagen wurden, um das Messproblem der Quantenphysik zu lösen. Das wohl berühmteste Beispiel sind die Tests der Bellschen Ungleichung mit verschränkten Photonen und Ionen [5], die eine lokal realistische Beschreibung von den beobachteten Quantenphänomenen generell ausschließen, deren Erweiterung zu drei Teilchen (GHZ-Theorem) [6] und weiteren nichtlokalen Modellen (Leggett-

Ungleichungen) [7] sowie deren Einteilchenvariante zum Test der Nichtkontextualität [8]. All diese Experimente haben die Quantentheorie bestätigt.

Letztlich geht es darum, ein besseres Verständnis darüber zu erlangen, was uns die Quantentheorie über die Natur verrät – jenseits der funktionierenden Mentalität von „shut up and calculate“. Jedes dieser Experimente lässt uns derzeit ein bisschen mehr verstehen, was die Quantenphysik nicht ist. Das ist definitiv der erste Schritt zu einem tieferen Verständnis. Vermutlich werden wir irgendwann in der Zukunft eine Theorie jenseits der jetzigen Quantentheorie haben. Derzeit ist nur nicht klar, wo genau wir zu suchen haben. Experimente wie das von Weihs und Kollegen sind aber sicherlich ein Schritt nach vorne.

Markus Aspelmeyer

- [1] M. Born, Z. Physik 37, 863 (1926)
- [2] U. Sinha et al., Science 329, 418 (2010)
- [3] H. Kaiser et al. Phys. Rev. A 29, 2276 (1984)
- [4] C. G. Shull et al., Phys. Rev. Lett. 44, 765 (1980); R. Gähler et al., Phys. Rev. A 23, 1611 (1981)
- [5] siehe z. B. R. Bertlmann und A. Zeilinger (Hrsg.), Quantum [Un]Speakables, Springer, Berlin (2002)
- [6] J.-W. Pan et al., Nature 403, 515 (2000)
- [7] S. Gröblacher et al., Nature 446, 871 (2007); C. Branciard et al., Nature Physics 4, 681 (2009)
- [8] Y. Hasegawa et al., Nature 425, 45 (2003)

KURZGEFASST

■ Ein Limit für WIMPs

Die ersten Resultate des Experiments XENON100 im italienischen Gran-Sasso-Untergrundlabor bestätigen nach nur drei Wochen die Ergebnisse früherer Versuche. Der Wirkungsquerschnitt von WIMPs – Kandidaten für die Dunkle Materie – hat demnach eine Obergrenze von $3,4 \cdot 10^{-44} \text{ cm}^2$. Die Forscher suchen nach Kollisionen von WIMPs mit den Xenon-Atomen, deren Rückstoß sie durch abgegebene Photonen und Elektronen registrieren. Die Theorie sagt bis zu ein Ereignis pro Woche und kg flüssigem Xenon voraus. In den 40 kg im Zentrum des Detektors fand sich aber noch keine Spur. Vielleicht gelingt ein Fund im weiteren Verlauf des Experiments bis Ende 2010. E. Aprile et al. (XENON100 Collaboration), Phys. Rev. Lett. 105, 131302 (2010)

■ IBEX: Überraschung, die zweite!

Neue Daten des „Interstellar Boundary Explorer“ (IBEX) zeigen, dass sich der Überschuss an energiereichen neutralen Atomen (ENAs) aus einem schmalen Streifen der Grenzschicht des Sonnensystems nach nur sechs Monaten erheblich verringert hat. Dies kam für die Forscher ebenso unerwartet, wie der damalige Fund selbst (Physics Journal, Februar 2010, S. 16). Als Ursache für den Überschuss vermuten sie eine Wechselwirkung von Teilchen der Sonne mit dem interstellaren Magnetfeld. Die verantwortlichen Prozesse spielen sich offenbar in einem kleinen Gebiet ab und reagieren empfindlich auf die Stärke des in jüngster Zeit schwachen Sonnenwinds. D. J. McComas et al., J. Geophys. Res., 115, A09113 (2010)

Prof. Dr. Markus Aspelmeyer, Fakultät für Physik, Universität Wien, Boltzmannngasse 5, 1090 Wien, Österreich