

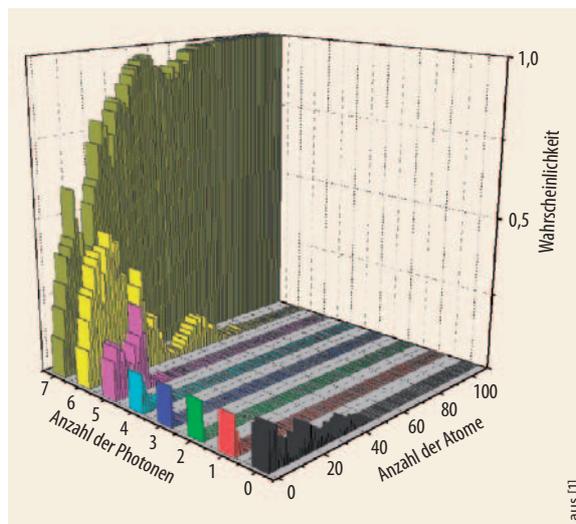
■ Photonen zählen zerstörungsfrei?

Quantenmechanische Messungen an gespeicherten Photonenfeldern ermitteln sukzessive die Zahl der im Resonator vorhandenen Photonen.

Spätestens im Hauptstudium lernt man, wie es bei der Messung eines Quantenzustands zugeht: Die Wellenfunktion kollabiert zu einem der Eigenzustände, und der Messwert entspricht dann dem zugehörigen Eigenwert – soweit die Theorie. Mit Experimenten an gespeicherten Photonenfeldern und Rydberg-Atomen ist es der Gruppe um Serge Haroche an der École Normale Supérieure in Paris nun gelungen, diesen Kollaps in einen Zustand mit fester Teilchenzahl (Fock-Zustand) sowie den anschließenden Zerfall dieser Photonenfelder im Detail zu beobachten [1]. Dafür wurde eine „quantum non-demolition“-Messung (QND) durchgeführt. Um hier gleich mit einem Missverständnis aufzuräumen: Generell lässt eine Messung an einem Quantensystem den Quantenzustand nicht unbeschädigt. Das ist schon in den Diskussionen zu den Gedankenexperimenten von Werner Heisenberg, Niels Bohr, Albert Einstein und Erwin Schrödinger klar geworden. Man kann es nur geschickt einrichten, dass die „interessante“ Variable – in unserem Fall die Zahl der Photonen in einem Mikrowellenresonator – zerstörungsfrei gemessen wird, während die Phase des Feldes sich durch die Messung völlig verändert.

Zwei essenzielle Eigenschaften des Pariser Experiments erlauben die QND-Messung: Erstens sind die Forscher in der Lage, ein Mikrowellenfeld so lange zu speichern, dass sie es immer wieder messen können. Dazu nutzen sie einen Resonator aus höchst reflektierenden, weil supraleitenden Spiegeln im Abstand von 2,7 cm, der Photonen für etwa 0,13 s speichert. Diese Zahl ist sehr eindrucksvoll, denn in derselben Zeit würde ein freies Photon etwa ein Zehntel der Strecke von der Erde bis zum Mond zurücklegen.

Zweitens ist die Kopplung der gespeicherten Photonen an das



Während zu Beginn der Messung die Photonenzahlen von 0 bis 7 noch alle gleich wahrscheinlich sind, kollabiert die Wellenfunktion in diesem Beispiel immer stärker auf den Zustand mit 7 Photonen, je mehr Rydberg-Atome den Resonator passiert haben.

„Messgerät“ – in diesem Fall einzelne Rydberg-Atome – ausreichend stark. Bei diesen Atomen befinden sich die angeregten Elektronen auf sehr hohen Bohrschen Bahnen, sodass sie äußerst empfindliche Antennen für Mikrowellenstrahlung darstellen. Für die QND-Messung durchqueren diese Atome den Resonator mit dem dort gespeicherten Photonenfeld. Die Atome absorbieren aber keine Energie aus dem Feld, sondern spüren nur eine Verschiebung ihrer Energieniveaus. Dafür wird ein einfliegendes Rydberg-Atom zunächst in einer Superposition von zwei Zuständen präpariert, durchfliegt dann den Resonator und erlebt eine Phasenverschiebung seiner Wellenfunktion, weil die atomaren Energieniveaus in unterschiedlicher Weise vom elektrischen Feld im Resonator abhängen – gut bekannt ist solch eine Verschiebung als elektrischer Stark-Effekt. Im aktuellen Experiment reicht jedoch schon die Feldstärke eines einzigen Feldquants für eine deutlich messbare Verschiebung. Beim Durchfliegen akkumuliert sich je nach Photonenzahl im Resonator eine Phasenverschiebung. Nachdem das Atom den Resonator vollständig durchquert hat, fragt ein Mikrowellenpuls die atomare Phasenverschiebung ab. Denn je nach Phasenlage von atomarem Dipol und Mikrowellenpuls regt er

das Atom an oder nicht. Diese Methode ist als Ramsey-Spektroskopie für atomare Frequenzstandards verbreitet. Ob ein Atom angeregt wurde, lässt sich schließlich über dessen Ionisation nachweisen.

Während für das einfachere Problem, bei dem zwischen null oder einem Photon im Resonator zu unterscheiden ist [2], bereits eine einzige QND-Messung ausreicht, sind die Messergebnisse der Ramsey Anordnung im vorliegenden Fall von 0, 1, 2, ..., 7 Photonen nicht orthogonal. Daher ist eine ganze Abfolge von Messungen auszuwerten, um die Photonenzahl zu ermitteln. Zunächst wird ein Mikrowellenpuls in den Resonator geschickt. Im Verlauf der Messung lässt sich sehr schön beobachten, wie die Information über das Quantenfeld im Laufe von etwa hundert aufeinander folgenden Messungen sich allmählich festigt, bis schließlich der Wert der Photonenzahl feststeht (Abb.).

Ist der Zustand des Feldes auf diese Weise gemessen, so kann er auf einer längeren Zeitskala Photon für Photon zerfallen, das Feld entweicht dabei nicht etwa kontinuierlich, sondern in Energieportionen. Ständig durchqueren Atome den Resonator, die das aktuell gespeicherte Feld messen und es erlauben, dem Zerfall dieses Feldes zuzuschauen. Manchmal dauert es lange, bis die Photonenzahl um

ein Quantum sinkt, und manchmal kommt es schnell zu einem solchen Quantensprung. Im Mittel ergibt sich über viele Realisierungen dieses stufenweisen Zerfalls jedoch der altbekannte exponentielle Zerfall der Energie des Feldes.

Noch interessantere Zustände des elektrischen Feldes bestehen aus einer Superposition von zwei unterschiedlichen Photonenzahlen. In diesem Fall finden sich im Mikrowellenresonator z. B. die elektrischen Felder der Fock-Zustände von null und acht Photonen quantenmechanisch überlagert. Dieser Superpositionszustand kann dann in einen Fock-Zustand mit

sieben Photonen zerfallen. Das wäre ohne die Quantenmechanik unmöglich, da die mittlere Energie des ursprünglichen Überlagerungszustands nur dem Mittel aus acht und null Photonen entspricht, also vier. Solche exotischen und bisher unbeobachteten Superpositionszustände des Photonenfeldes, die bekannten Schrödinger-Katzen, werden in der Gruppe um Haroche bereits anvisiert, denn hier lässt sich der Übergangsbereich zwischen klassischer und quantenmechanischer Weltbeschreibung exemplarisch untersuchen. Man darf auf weitere Experimente gespannt sein.

Mögliche Anwendungen der Pariser Experimente bestehen in der Verarbeitung, dem Schreiben und dem Auslesen von Quanteninformation als Vorstudie zu quantenmechanischen Rechenprozessen. Aber auch wenn diese Anwendungen noch in weiter Zukunft liegen mögen, eines zumindest ist ganz sicher: Die Gründerväter der Quantenphysik hätten ihre wahre Freude an den Pariser QND-Experimenten gehabt.

Ferdinand Schmidt-Kaler

Prof. Dr. Ferdinand Schmidt-Kaler, Quanteninformationsverarbeitung, Universität Ulm, Albert-Einstein-Allee 11, 89069 Ulm

[1] Ch. Guerlin et al., Nature **448**, 889 (2007)

[2] S. Gleyzes et al., Nature **446**, 297 (2007)

■ Waschbrettspisten im Labor

Rippelmuster, die auf unbefestigten Straßen für ein holpriges Vorankommen sorgen, sind schon seit langem bekannt. Jetzt erst untersuchen Physiker intensiver ihre Entstehung.

Wohl jeder, der schon einmal auf unbefestigten Straßen unterwegs war, hat zu seinem Leidwesen mit ihnen Bekanntschaft gemacht: den regelmäßigen Rippeln, die an ein Waschbrett erinnern und durch das Befahren entstehen. Dieses altbekannte Phänomen behindert den Transport weltweit, besonders stark in Entwicklungsländern. Daher untersuchen insbesondere Ingenieurwissenschaftler schon sehr lange diese Musterbildung [1].

Ausgehend von einer zunächst flachen Oberfläche wachsen aufgrund einer Instabilität die immer vorhandenen kleinsten Unebenheiten so stark an, dass sich letztlich das Waschbrettmuster ausbildet. Die Wellenlänge beträgt meist zwischen 30 cm und 1 m und die Amplitude selten mehr als 5 cm. Während andere Instabilitäten, z. B. an der Grenzfläche zwischen zwei Flüssigkeiten, wie die Rayleigh-Taylor- oder die Saffman-Taylor-Instabilität, vergleichsweise sehr gut verstanden sind und ausführlich in der statistischen Physik untersucht wurden, hat die theoretische Physik bislang erst wenig zum Verständnis der Entstehung von Waschbrettspisten beigetragen [2].



Fahrzeuge sorgen auf unbefestigten Straßen mit der Zeit für waschbrettartige

Muster, die besonders in Entwicklungsländern den Verkehr behindern.

Grundsätzlich ist die Rippelbildung bei granularen Oberflächen ein weit verbreitetes Phänomen. So können z. B. Wind oder Wasserströmung ein Granulat wie Sand horizontal bewegen und damit Rippelmarken im Wattenmeer oder Dünen verursachen. Dagegen sind in dem hier betrachteten Fall die abrollenden Räder für den horizontalen Transport des Materials verantwortlich, da sie aufgrund ihres Gewichtes etwas in den unbefestigten Boden einsinken können und damit Granulat zur Seite drängen. In einer kürzlich erschienenen Arbeit haben

nun Physiker versucht, diese Instabilität in einem möglichst einfachen System besser zu verstehen [3]. Um die wesentlichen Parameter bei der Musterbildung ausfindig zu machen, untersuchten sie das System sowohl in einem einfachen Experiment als auch in Partikel-basierten Simulationen sowie einem theoretischen Modell.

In dem Experiment rollte ein Gummirad über den Rand eines rotierenden Drehtellers (Durchmesser: 1 m), der mit Sand gefüllt war. Bei der verwendeten Rotationsgeschwindigkeiten bewegte sich das