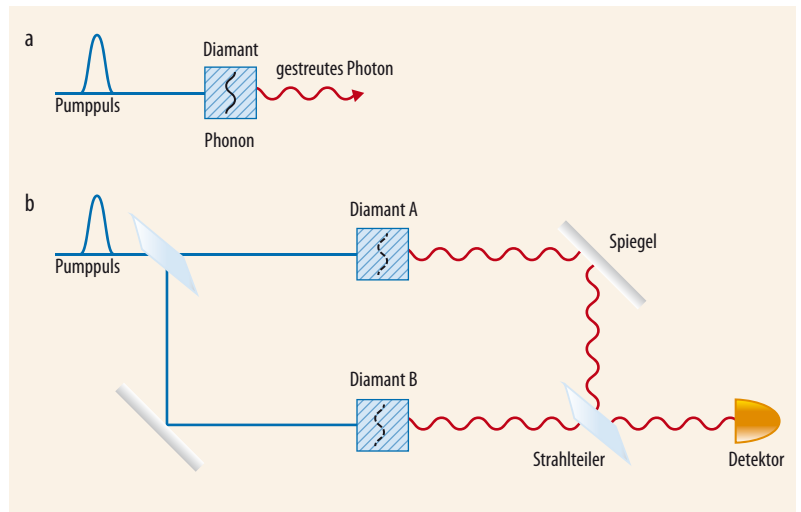


## ■ Diamantene Quantenhochzeit

Die Gitterschwingungen von zwei räumlich getrennten Diamanten lassen sich bei Zimmertemperatur durch Lichtstreuung quantenmechanisch verschränken.

Wie Schrödinger sehr drastisch am „burlesken“ Beispiel seiner Katze dargelegt hat, führt „die gegenwärtige Situation“ der Quantenmechanik zur Existenz verschränkter Zustände auch makroskopischer Systeme [1]. Der Nachweis dieser Verschränkung ist aber sehr schwierig: Eine kohärente Superposition makroskopisch verschiedener Quantenzustände ist im Allgemeinen sehr anfällig gegenüber kleinsten Umgebungseinflüssen, die für „große“ Systeme natürlich unvermeidbar sind. Diese Einflüsse führen zur Dekohärenz, das ist der Verlust der Interferenzfähigkeit der überlagerten Alternativen [2]. Für zukünftige Quantentechnologien besteht die größte Herausforderung darin, kohärente Superpositionen und damit auch verschränkte Zustände mehrerer Quanten langlebig herzustellen und zu manipulieren. Darüber hinaus muss es gelingen, diese Kohärenz in Systemen mit immer größerer Teilchenzahl und wachsender (räumlicher) Ausdehnung zu bewahren. Wir erleben gerade, wie die naive Aufteilung in eine den Gesetzen der Quantenmechanik folgenden Mikrowelt und einer der klassischen Physik gehorchenden makroskopischen Welt überwunden wird: Es ist eine spannende Frage von sehr grundlegendem Interesse, wie weit man experimentell in makroskopische Dimensionen vordringen kann und dennoch der Nachweis kohärenter Superpositionen oder verschränkter Zustände gelingt.

Als Beispiele solcher Bestrebungen seien die Interferenzexperimente von immer schwereren Molekülen genannt [3], die Abkühlung mechanischer Oszillatoren in ihren quantenmechanischen Grundzustand [4] und natürlich viele Meilensteine der experimentellen Quanteninformationsverarbeitung (siehe etwa [5]). Die Frage, inwieweit Quantenkohärenz maßgeblichen Einfluss auf das effiziente



**Abb. 1** Der erste Puls erzeugt einen verschränkten Zustand der Gitterschwingung (Phonon) und gestreutes Lichtwellen (Stokes-Photon) (a). Die gestreuten Phononen zweier Diamanten werden zur Interferenz gebracht und schließlich

nachgewiesen (b). Im Falle, dass nur ein Photon detektiert wurde, teilten sich die beiden Diamanten kohärent ein Phonon. Der erzeugte Zustand zeigt somit quantenmechanische Verschränkung.

Funktionieren biologischer Prozesse hat – etwa auf den Energietransport in Lichtsammelkomplexen [6] – wird intensiv untersucht. Nun gelang es einer Forschergruppe aus Oxford (mit Unterstützung aus Ottawa und Singapur) die Gitterschwingungen zweier Diamanten zu verschränken [7]. Die einige Kubikmillimeter großen Kristalle waren 15 cm voneinander entfernt und wurden bei Zimmertemperatur angeregt.

Das Experiment basiert wesentlich auf einem Vorschlag von Duan, Lukin, Cirac und Zoller [8]. Diese Idee wurde auch schon erfolgreich zur Verschränkung atomarer Ensembles [9] und zur Teleportation [5] eingesetzt. Im aktuellen Experiment wird durch Raman-Streuung eines Laserphotons mit kleiner Wahrscheinlichkeitsamplitude eine Gitterschwingung (optisches Phonon) angeregt und ein Photon kleinerer Frequenz („Stokes“) emittiert. An den beiden Diamanten entsteht so zunächst jeweils ein verschränkter Phonon-Photon-Zustand (**Abb. 1**). Ein Strahlteiler dient dazu, die beiden Stokes-Moden zu überlagern. Wird danach

ein Stokes-Photon nachgewiesen, befindet sich ein Phonon im System der beiden Diamanten (A, B). Die Herkunft des Photons bleibt aber offen, da mit ihm sowohl ein Phonon in Diamant A als auch in Diamant B korreliert sein könnte. Die beiden zugehörigen Diamantzustände (ein Phonon in A, keines in B und umgekehrt) bleiben kohärent überlagert, und der gewünschte verschränkte Phononenzustand der beiden Diamanten ist präpariert. All dies lässt sich ohne wesentlichen Kohärenzverlust bei Zimmertemperatur durchführen, da die Anregungsfrequenz des optischen Phonons so hoch ist, dass thermische Fluktuationen keinen Einfluss haben. Allerdings hat der verschränkte Phononenzustand nur eine endliche Lebensdauer. Um die Existenz der Verschränkung tatsächlich nachzuweisen, ist daher Eile geboten. Der Nachweis gelingt mithilfe von Femtosekundenlasern und eines zweiten Pulses, der mit kleiner Amplitude die Gitterschwingung wieder in den Grundzustand zurücksetzt unter Emission eines nun energiereichen Photons („Anti-Stokes“). Die

harmonische Abhängigkeit des gemessenen Signals von einer frei einstellbaren Phase belegt die Kohärenz der Überlagerung der beiden Phononenzustände, während der dabei beobachtete Kontrastverlust quantitative Rückschlüsse auf die Dekohärenz zulässt. Durch die Abbildung auf einen verschränkten Photon-Zustand der beiden anti-Stokes-Moden ist es möglich, die Verschränkung im Phononen-Zustand quantitativ zu untersuchen.<sup>§)</sup> Die Forschergruppe kommt nach statistischer Datenanalyse zum Schluss, dass mit etwa 98 Prozent Wahrscheinlichkeit zwischen den beiden Diamanten Verschränkung vorgelegen haben muss.

Die Verschränkung lässt sich mithilfe der sog. Concurrence  $C$  quantifizieren: Für maximal verschränkte Zustände gilt  $C = 1$ , für unverschränkte Zustände  $C = 0$ . Die Phononen-Verschränkung ist mit einem abgeschätzten  $C$  von etwa fünf Millionstel sehr, sehr klein. Da der Nachweis der Verschränkung nur indirekt über den Anti-Stokes-Photonenzustand geführt wird, ist eine sehr sorgfältige

Argumentation nötig. Auch ist zu erwähnen, dass im Laborsystem die Anti-Stokes-Photonen entstehen (350 fs nach den Stokes-Photonen), noch bevor durch den Nachweis des Stokes-Photons im Detektor der verschränkte Phonon-Zustand erzeugt wird. Man darf auf weitere Untersuchungen gespannt sein. Insbesondere sollte die Dynamik des Verschränkungsverlusts aufgrund von Dekohärenzmechanismen in den Kristallen durch die vorhandene Femtosekudentechnik experimentell direkt zugänglich sein.

Verschränkte Photonenpaare sind heute Routine und finden Anwendungen etwa in der Quantenkryptographie. In vorangegangenen Experimenten wurden auf ganz ähnliche Weise verschränkte Zustände zweier Atomensembles präpariert, deren Anregungen allerdings elektronischer Natur waren [9]. Im aktuellen Experiment gelingt nun zum ersten Mal die Verschränkung von Bewegungsfreiheitsgraden (Gitterschwingungen) zweier makroskopischer Systeme. Die Untersuchungen

zeigen eindrucksvoll, wie Quantenphänomene und hier insbesondere Quantenkorrelationen bereits heute in Systemen mit makroskopischen Abmessungen und bei Zimmertemperatur experimentell zugänglich sind.

Walter Strunz

- [1] E. Schrödinger, *Naturwissenschaften*, **23**, 807 (1935)
- [2] W. T. Strunz, G. Alber und F. Haake, *Physik Journal*, November 2002, S. 47
- [3] M. Arndt, S. Gerlich, K. Hornberger und M. Mayor, *Physik Journal*, Oktober 2010, S. 37
- [4] J. Chan et al., *Nature* **478**, 89 (2011)
- [5] M. Aspelmeyer, *Physik Journal*, April 2008, S. 19
- [6] G. D. Scholes, G. R. Fleming, A. Olaya-Castro und R. van Grondelle, *Nature Chemistry* **3**, 763 (2011)
- [7] K.C. Lee et al., *Science* **334**, 1253 (2011)
- [8] L.-M. Duan, M. D. Lukin, J. I. Cirac und P. Zoller, *Nature* **414**, 413 (2001)
- [9] C. W. Chou et al., *Nature* **438**, 828 (2005) und T. Chaneliere et al., *ibid.*, 833

§) Dazu wird der Dichteoperator der Anti-Stokes-Photonen analysiert. Aus dem direkten Anti-Stokes-Nachweis folgt nur dessen Diagonalanteil. Die beiden Nebendiagonalelemente der Matrix (die „Kohärenzen“) lassen sich durch den Kontrast der erwähnten Phasemessung abschätzen.

Prof. Dr. Walter Strunz, Institut für Theoretische Physik, TU Dresden

## ■ Das Rätsel um Majorana

Ultrakalte Atome in optischen Gittern, die an ein dissipatives Bad gekoppelt sind, gelten als vielversprechender Kandidat bei der Suche nach Majorana-Fermionen.

Am 26. Mai 1938 verschwand der italienische Physiker Ettore Majorana spurlos. Die Spekulationen über seinen Verbleib deckten das ganze Spektrum von Selbstmord oder Eintritt in ein Kloster bis hin zu einer Auswanderung nach Argentinien ab. Die Suche nach Majorana wurde nach einigen Monaten eingestellt, die von ihm theoretisch vorhergesagten Majorana-Fermionen befinden sich heutzutage jedoch stärker im Visier der Wissenschaftler als je zuvor.

Majorana fand kurz vor seinem Verschwinden eine modifizierte Dirac-Gleichung, die mit reellen Zahlen auskommt und reelle Lösungen hat [1]. Da die komplexe Konjugation reelle Felder nicht verändert, beschreiben diese Lösungen

der Majorana-Gleichung neutrale Elementarteilchen, die ihre eigenen Antiteilchen sind. In zweiter Quantisierung ist es möglich, die Erzeugungs- und Vernichtungsoperatoren eines Fermions  $c^\dagger$  und  $c$  in zwei Majorana-Fermion-Operatoren umzuschreiben:  $\gamma_1 = (c^\dagger + c)/2$  und  $\gamma_2 = (c^\dagger - c)/2i$ . Diese Majorana-Operatoren erfüllen dieselben Antikommutationsregeln wie Fermionen, sind aber ihre eigenen Antiteilchen: Der Erzeugungsoperator ist gleich dem Vernichtungsoperator:  $\gamma_i^\dagger = \gamma_i$ . Rein mathematisch lassen sich die obigen Relationen umdrehen und alle Fermionen durch je zwei Majorana-Fermionen beschreiben. Doch kommen diese als solche in der Natur vor? Auf der Suche nach

Majorana-Fermionen haben Innsbrucker Physiker kürzlich einen vielversprechenden Kandidaten vorgeschlagen [2].

Bereits Ettore Majorana spekulierte, ob die damals erst hypothetischen Neutrinos Majorana-Fermionen sein könnten. Experimentelle Beobachtungen nach der Entdeckung des Neutrinos, insbesondere die Leptonenzahlerhaltung, bedingten solche Spekulationen jedoch frühzeitig. Seit der Entdeckung der Neutrino-Oszillationen fragen sich Wissenschaftler aber erneut, ob Neutrinos ihre eigenen Antiteilchen sein könnten. Ein eindeutiges Indiz dafür wäre die Beobachtung eines neutrinolosen Doppel-Betazerfalls, z. B.  ${}^{76}\text{Ge} \rightarrow {}^{76}\text{Se}$ .<sup>§)</sup> Anstelle als Elementarteilchen können Majorana-

§) vgl. *Physik Journal*, März 2011, S. 23. Einen Überblick über geplante und vorgeschlagene Experimente bieten [http://de.wikipedia.org/Doppelter\\_Betazerfall](http://de.wikipedia.org/Doppelter_Betazerfall) und [http://en.wikipedia.org/wiki/Double\\_beta\\_decay](http://en.wikipedia.org/wiki/Double_beta_decay)