

folgung von Infrarot-Lasern benutzt, funktionieren aber auch mit nicht-kohärentem Licht.

Ähnlich, nämlich durch Energie-Transfer zwischen verschiedenen Selten-Erd-Atomen, funktionieren verschiedene anorganische Phosphore, wie Erbium-dotiertes Natrium-Yttrium-Fluorid ($\text{NaYF}_4:\text{Er}$), das auf der Rückseite von kristallinen Silizium-Solarzellen eine Quantenausbeute von 2,5 % bei Laserbelichtung mit 1532 nm erreichte [4]. Der Laser wurde dabei nur aus praktischen Gründen als

Lichtquelle benutzt. Der Nachteil dieses und anderer Selten-Erd-Phosphore für Solarzellenanwendungen ist die Begrenzung der *up-conversion* auf einen recht engen Spektralbereich. Hier könnte der Ansatz von Balushev et al. wesentliche Verbesserungen bringen. Ihre Ergebnisse sind somit vielversprechend, reichen für eine tatsächliche Verbesserung des Wirkungsgrades der Solarzellen aber noch nicht aus: Eine Verschiebung der *up-conversion* ins Infrarote, eine Verbesserung des Quantenwirkungsgrads auf grö-

ßer 10 % und eine weitere Verringerung der benötigten Lichtintensität müssen noch erreicht werden. Dazu wünschen wir den Autoren viel Erfolg.

Thorsten Trupke und Peter Würfel

- [1] P. Würfel und T. Trupke, *Physik Journal*, Dezember 2003, S. 45
- [2] S. Balushev, T. Miteva, V. Yakutkin, G. Nelles, A. Yasuda und G. Wegner, *Phys. Rev. Lett.* **97**, 143903 (2006)
- [3] T. Trupke et al., *J. Appl. Phys.* **92**, 4117 (2002), P. Würfel, *Physics of Solar Cells*, Wiley-VCH (2005)
- [4] A. Shalav, *Appl. Phys. Lett.* **86**, 013505 (2005)

■ Protokolle für die Quanteninformation

Erstmals gelang die Teleportation von Licht auf Materie und die Verschränkungsreinigung von atomaren Teilchen

Die Quanteninformationsverarbeitung (QIV) nutzt quantenmechanische Eigenschaften von Materie und Licht für sichere Kommunikationstechnologien und für neuartige Computer und Algorithmen. Die experimentell bislang am weitesten entwickelte Form der QIV ist die Quantenkryptographie, bei der quantenmechanische Informationsträger, üblicherweise Photonen, zum Aufbau eines Nachrichtenschlüssels verwendet werden. Mit Hilfe dieses Schlüssels lassen sich anschließend geheime Nachrichten sicher übertragen.

Eine Herausforderung für künftige praktische Anwendungen ist die Skalierbarkeit der Methode über weite Distanzen. Schickt man Photonen durch Glasfasern bei typischen Wellenlängen, so werden diese nach einer Entfernung von wenigen Kilometern absorbiert. Um Photonen über weitere Entfernungen zu schicken, müssten diese, wie auch klassische Signale, in regelmäßigen Abständen verstärkt werden. Quantenzustände haben aber die bemerkenswerte Eigenschaft, dass man sie nicht kopieren („klonen“) kann, was einerseits vor Abhörattacken schützt, andererseits aber eine Verstärkung ohne Verlust der Quanteneigenschaften unmöglich macht. Dadurch wird das Verfahren exponentiell ineffizient.

Dieses Problem lässt sich generell mithilfe von verschränkten Zuständen lösen. Dabei wird nun nicht mehr ein (unbekannter) Zustand als Träger der Quanteninformation über einen verrauschten Kanal übermittelt, sondern vielmehr ein bekannter, verschränkter Zustand, den man mehrfach erzeugen kann. Die Verschränkungsreinigung und die Teleportation, zwei grundlegende Protokolle der QIV, erlauben es dann, (unbekannte) Quanteninformation beinahe rauschfrei zu übermitteln. Insbesondere kann durch eine geschickte Kombination dieser beiden Protokolle, dem Quantenrepeater [1], Verschränkung über beliebige Distanzen effizient aufgebaut werden.

Verschränkung als Ressource

Einfachstes Beispiel für einen verschränkten Zustand verschiedener Freiheitsgrade eines Systems ist der aus zwei Quantenbits A und B bestehende EPR-Zustand $|\Psi\rangle_{AB} = |0\rangle_A|1\rangle_B - |1\rangle_A|0\rangle_B$. Bei einem Quantenbit handelt es sich um ein Zwei-Niveau-System, wobei physikalisch völlig unterschiedliche Objekte als Quantenbit beschrieben werden können, etwa der Spin eines Spin- $\frac{1}{2}$ -Teilchen, zwei orthogonale Polarisationszustände eines Photons oder zwei Energieeigenzustände eines Atoms. Dieser EPR-Zustand hat die

bemerkenswerte Eigenschaft, dass die Komponenten der Spins bezüglich jeder beliebigen Messrichtung perfekt anti-korreliert sind.

Damit wird das seltsame Quantenphänomen der Verschränkung, das unser Bild der Welt in Bezug auf Realität und Lokalität in Frage stellt, zur wertvollen Ressource für verschiedene praktische Anwendungen in der QIV. Man kennt inzwischen einen ganzen Zoo von verschränkten Zuständen mehrerer Quantenbits, mit Anwendungen im Bereich der Quantenkommunikation und des Quantenrechnens.

Zu den Anwendungen dieser Verschränkung zählt auch die so genannte Teleportation. Dabei werden die Korrelationen zwischen zwei verschränkten, räumlich getrennten Quantensystemen A und B (im Zustand $|\Psi\rangle_{AB}$) genutzt, um einen dritten, unbekanntem Quantenzustand $|\phi\rangle_A$ von A nach B zu übermitteln. Um dies zu erreichen, werden die Quantenbits in A und A' in einer aus verschränkten Zuständen bestehenden Basis, der Bell-Basis, gemessen. Der Zustand des Quantenbits in B ist – bis auf lokale Drehungen, die nur vom vorliegendem Messergebnis abhängen – identisch mit $|\phi\rangle$. Teleportation wurde in den letzten Jahren bereits für einzelne Photonen, Atome und Lichtfelder experimentell nachgewiesen. Kürz-

Dr. Wolfgang Dür und Prof. Dr. Hans-J. Briegel, Institut für Theoretische Physik, Universität Innsbruck, Technikerstr. 25, A-6020 Innsbruck und Institut für Quantenoptik und Quanteninformation der Österreichischen Akademie der Wissenschaften, Technikerstrasse 21a, 6020 Innsbruck

lich ist es nun erstmals gelungen, Quanteninformation zwischen Licht und Materie, als höchst verschiedenartigen Systemen, mittels Teleportation über eine Entfernung von einem halben Meter zu übertragen [2], wobei größere Entfernungen im Prinzip möglich sind. Dies erlaubt die Übertragung von Quanteninformation von Informationsträgern mit guten Transmissionseigenschaften (etwa einzelne Photonen, oder, wie hier, kohärente Lichtfelder) auf stationäre Medien bzw. Speicher (etwa einzelne Atome, oder, wie hier, die Spin-Freiheitsgrade eines makroskopischen atomaren Ensembles, das aus 10^{12} Cäsiumatomen besteht). Im Hinblick auf den Quantenrepeater ist dies von zentraler Bedeutung, um die Speicherung und Weiterverarbeitung der Quanteninformation, insbesondere die iterative Durchführung von Verschränkungsreinigung, zu gewährleisten.

Reine Verschränkung

Verschränkungsreinigung ist ein zweites fundamentales QIV-Protokoll, welches aus zwei Kopien eines verrauchten, verschränkten Zustands eine Kopie mit geringerem Rauschanteil herstellt. Dabei werden die zwei Kopien zuerst selbst miteinander verschränkt, und durch eine Messung an der zweiten Kopie wird Information über die erste Kopie gewonnen. Da sich in dem Rauschen nichts anderes als unser unvollständiges Wissen über den tatsächlichen Zustand des Systems ausdrückt, reduziert der Informationsgewinn das Rauschen. Wiederholt angewendet lässt sich mit diesem Protokoll der Rauschanteil sogar vollkommen eliminieren,

sodass man im Prinzip perfekt verschränkte Zustände erzeugen kann.

In einem weiteren Experiment ist es nun auch erstmals gelungen, Verschränkungsreinigung für Atome, genauer gesagt Beryllium-Ionen, durchzuführen [3]. Die in den letzten Jahren entwickelten Techniken zur Kühlung, Manipulation und Messung von Ionen mittels Lasern sind dabei von zentraler Bedeutung. Das Hauptproblem bei diesem Experiment ist die Herstellung von kontrollierter Verschränkung zwischen den beiden Kopien, was sich in einer relativ kleinen, aber dennoch noch deutlich messbaren Verringerung des Rauschens widerspiegelt. Im Gegensatz zu bereits länger bekannten Experimenten mit Photonen [4] stehen hier die verschränkten Zustände nach der Reinigung weiter zur Verfügung und können im Prinzip für andere Zwecke, etwa Teleportation, verwendet werden.

Im Hinblick auf den Quantenrepeater liefert dieses Experiment den zweiten wichtigen Baustein, nämlich die mögliche Weiterverarbeitung und Verschränkungsreinigung von stationären Quantenbits. Damit rückt die experimentelle Realisierung von Quantenkommunikation über beliebige Distanzen einen Schritt näher.

Wolfgang Dür und Hans-J. Briegel

- [1] H.-J. Briegel, W. Dür, J. I. Cirac und P. Zoller, *Phys. Rev. Lett.* **81**, 5932 (1998)
- [2] J. F. Sherson et al., *Nature* **443**, 557 (2006)
- [3] R. Reichle et al., *Nature* **443**, 838 (2006)
- [4] J. W. Pan et al., *Nature* **423**, 417 (2003); siehe auch H. Aschauer und H.-J. Briegel, *Physik Journal*, Juli 2003, S. 18

KURZGEFASST

Flash Imaging am FLASH

Am Freie-Elektronen-Laser FLASH in Hamburg ist es gelungen, ein hochaufgelöstes Beugungsbild einer nicht-kristallinen Probe mit einem einzigen, extrem intensiven Laserblitz aufzunehmen, unmittelbar bevor der Laserpuls die Probe zerstört. Künftig soll dieses *Flash Imaging* an Röntgenlasern genutzt werden, um Molekülkomplexe mit atomarer Auflösung aufzunehmen. H. N. Chapman et al., *nature physics*, doi:10.1038/nphys461

Pulsierende Gammastrahlen

Astrophysiker des HESS-Teleskops in Namibia haben eine erste Quelle entdeckt, die pulsierende Gammastrahlung emittiert – mit einer 100 000-mal höheren Energie als bei anderen pulsierenden Quellen. Dabei handelt es sich um das Doppelsternsystem LS5039 in unserer Galaxis – ein Neutronenstern oder ein Schwarzes Loch, das in vier Tagen um einen Blauen Riesenstern rast. F. A. Aharonian et al., *Astronomy & Astrophysics*, 24. November