

■ Verschränkt im Quantenpunkt

Erstmals ist es gelungen, die Verschränkung zwischen einem Photon und einem Elektronenspin in einem Halbleiter-Quantenpunkt zu zeigen.

Prof. Dr. Peter Michler, Institut für Halbleiteroptik und Funktionelle Grenzflächen, Universität Stuttgart, Allmandring 3, 70569 Stuttgart

Die Verschränkung von Objekten gehört wohl zu den faszinierendsten Eigenschaften quantenmechanischer Systeme. Dies liegt sicherlich an den sich daraus ergebenden überraschenden Konsequenzen. So sind zwei quantenmechanisch miteinander verschränkte Systeme A und B als Einheit zu sehen und somit nicht voneinander zu trennen. Dies bedeutet, dass wir bei einer Messung z. B. den Zustand des Systems A nicht vorhersagen können, ihn aber mit Sicherheit wissen, wenn wir B messen, und umgekehrt. Diese starke Korrelation bleibt auch für beliebig entfernte Systeme erhalten, was besonders während der Entstehungsjahre der Quantenmechanik zu heftigen Diskussionen geführt hat. So brachte Einstein den Begriff „spukhafte Fernwirkung“ in die Debatte ein, und die Gründerväter der Theorie spekulierten, dass die Quantenmechanik nicht vollständig sei und es so genannte versteckte Parameter geben müsse [1]. Erst die erfolgreiche Verifizierung der Bellschen Ungleichungen widerlegte diese Argumente [2]. Heutzutage möchte man die Verschränkung als wertvolle Ressource für die Quantenkommunikation und das Quantencomputing nutzen. Hierzu gilt es vor allem, ein stationäres System mit einem „fliegenden“ Quantensystem (z. B. Photon) zu verschränken. Damit ließen sich mehrere lokale Quantensysteme zu einem Quantennetzwerk verknüpfen. Dies ist eine der zentralen Voraussetzungen, um ein Quantenkommunikationssystem über große Entfernungen zu realisieren. Für gefangene Ionen [3] und das Stickstoff-Fehlstellenzentrum im Diamant [4] ließ sich eine derartige Verschränkung schon zeigen.

Dies ist nun erstmalig auch zwei voneinander unabhängigen Forschungsgruppen auf der Basis eines Halbleiter-Quantenpunkts gelungen [5, 6]. Solche Nanostrukturen lassen sich mit modernen Epitaxie-

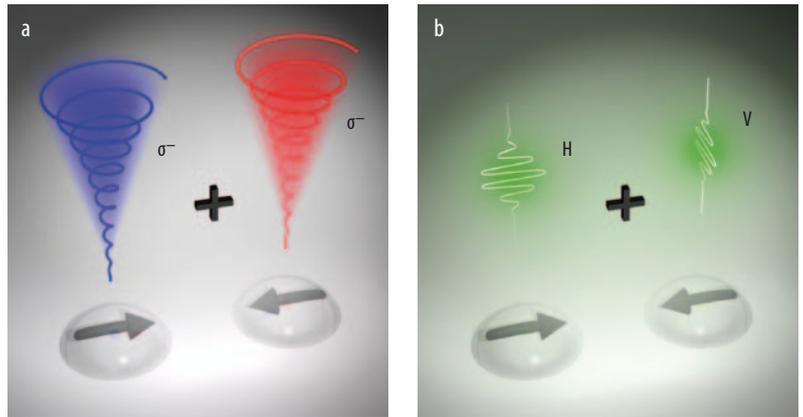


Abb. 1 Der Spin des Elektrons im Quantenpunkt kann verschränkt sein mit der Frequenz des Photons bei gleicher Polarisation (a) bzw. mit der Polarisation bei gleicher Frequenz (b).

verfahren in einem selbstorganisierten Prozess herstellen. Hierbei wird ein Halbleiter mit kleinerer Bandlücke (z. B. InAs) in einen mit größerer Bandlücke (z. B. GaAs) eingebettet. Dadurch entsteht ein effektives Einschlusspotential, in dem einzelne Ladungsträger (Elektronen und Löcher) gefangen sein können. Da die Dimension des Quantenpunktes typischerweise unterhalb der de-Broglie-Wellenlänge liegt (kleiner einige 10 nm), bilden sich diskrete Zustände aus – daher werden Quantenpunkte häufig als „künstliche Atome“ bezeichnet. De Greve et al. [5] und Gao et al. [6] verwendeten in ihren Experimenten beide den Spin eines einzelnen im Quantenpunkt gefangenen Elektrons zur Verschränkung mit der Polarisation bzw. der Wellenlänge eines Photons.

Um die Entartung der beiden Spinzustände „oben“ und „unten“ des Elektrons aufzuheben, liegt in beiden Experimenten ein Magnetfeld senkrecht zur Wachstumsrichtung der Probe an und erzeugt damit eine Zeeman-Aufspaltung. Zu Beginn pumpen die Physiker den Spin optisch in den „Spin oben“-Zustand. Anschließend regen sie das System mit einem Laserpuls passender Energie und Länge in einen „Trionenzustand“ an: Dieser besteht aus zwei Elektronen und einem Loch und kann durch Aus-

senden eines Photons in einen der beiden Grundzustände (Elektron „Spin oben“ oder „Spin unten“) zurückkehren. Diese strahlende Rekombination bringt das Elektron-Photon-System in eine Superposition von zwei Zuständen. In dem einen ist das Elektron im „Spin oben“-Zustand; das zugehörige Photon ist horizontal polarisiert und besitzt etwas höhere Energie („blaues Photon“) als in dem anderen Fall, bei dem sich das Elektron in dem „Spin unten“-Zustand befindet und das Photon vertikal polarisiert ist und etwas geringere Energie aufweist („rotes Photon“). Bei diesen beiden Zuständen sind sowohl die Polarisation als auch die Frequenz des Photons mit dem Spin des Elektrons korreliert. Für den Nachweis und praktische Anwendungen der Verschränkung sollte dies jedoch nur für eine dieser beiden Eigenschaften gelten.¹⁾ Daher haben die beiden Gruppen eine Korrelation in einem weiteren Schritt „gelöscht“.

Gao et al. entschieden sich, die Polarisationsinformation zu entfernen, indem sie die Photonen unabhängig von ihrer Frequenz mit Hilfe einer Polarisationsoptik in einen links-zirkularen Zustand brachten. Der resultierende Zustand ist dann nur bezüglich Photonenfrequenz und Spin verschränkt (Abb. 1a).

1) Bei der Messung eines emittierten Photons, z. B. in einer zirkularen Basis, besitzt der Spinzustand einen zeitabhängigen Phasenfaktor, dessen zeitliche Entwicklung die Zeeman-Aufspaltung bestimmt. Eine kleine Unsicherheit in der Ankunftszeit des Photons, z. B. aufgrund endlicher Zeitauflösung des Detektors, kann dann zu einer großen Phasenunsicherheit des Spinzustands führen und damit die Sichtbarkeit der Verschränkung reduzieren [5].

2) Die beim Differenzfrequenzverfahren erzeugte Zentralwellenlänge der Photonen ($\lambda_g = 1,56 \mu\text{m}$) ergibt sich aus $1/\lambda_g = 1/\lambda_{\text{rot,blau}} - 1/\lambda_l$ mit $\lambda_l = 2,2 \mu\text{m}$.

De Greve und seine Kollegen nutzten hingegen ein Differenzfrequenzverfahren mit einem Kurzpuls laser, um die Frequenzinformation zu löschen. Mithilfe eines 8 ps kurzen Laserpulses bei einer Wellenlänge von 2,2 μm vergrößert sich die Bandbreite der erzeugten Photonen bei der generierten Wellenlänge von 1,56 μm so stark, dass man nach dem Konversionsprozess nicht mehr zwischen dem ursprünglich „roten“ und „blauen“ Photon unterscheiden kann.²⁾ Der verschränkte Zustand ergibt sich dann zwischen der Polarisation des Photons und dem Elektronenspin (Abb. 1b). Ein für die Anwendung wichtiger Aspekt der Differenzfrequenzzeugung ist, dass die Wellenlänge der erzeugten Photonen im Absorptionsminimum der Glasfaser liegt. Weitere Untersuchungen zeigen, dass sowohl bei der Summen- [7] als auch bei der Differenzfrequenzzeugung [8] von einzelnen Photonen aus Quantenpunkten alle wichtigen Eigenschaften wie die Statistik, Kohärenzlänge und Ununterscheidbarkeit erhalten bleiben. Daher bringt dieses Resultat die Vision eines Quantennetzwerks basierend auf Elektronenspins und Photonen einen wichtigen Schritt näher.

Gegenüber anderen konkurrierenden Materialien besitzen Halb-

leiter-Quantenpunkte als Einzelphotonen-Emitter besondere Vorteile. Da die angeregten Zustände sehr schnell strahlend zerfallen (500 ps bis 1 ns), sind potenziell sehr hohe Wiederholraten in einem Netzwerk möglich. Hinzu kommt eine sehr gut entwickelte Technologie, um Quantenpunkte in Halbleiterresonatoren einzubetten, sodass möglichst wenig Photonen verloren gehen. Zudem ist es gelungen, nahezu ideale Photonen geringer Linienbreite mit positionierten Quantenpunkten zu erzeugen [9]. Damit rückt eine gezielte Integration von qualitativ hochwertigen Quantenpunkten in photonische Strukturen in greifbare Nähe. Diese Erfolge ebnet den Weg für ein Halbleiter-basiertes Quantennetzwerk.

Peter Michler

- [1] A. Einstein, B. Podolsky und N. Rosen, *Phys. Rev.* **47**, 777 (1935)
- [2] J. S. Bell, *Physics* **1**, 195 (1964)
- [3] B. B. Blinov, D. L. Moehring, L.-M. Duan und C. Monroe, *Nature* **428**, 153 (2004)
- [4] E. Togan et al., *Nature* **466**, 730 (2010)
- [5] K. De Greve et al., *Nature* **491**, 421 (2012)
- [6] W. B. Gao, P. Fallahi, E. Togan, J. Miguel-Sanchez und A. Imamoglu, *Nature* **491**, 426 (2012)
- [7] S. Ates et al., *Phys. Rev. Lett.* **109**, 147405 (2012)
- [8] S. Zaske et al., *Phys. Rev. Lett.* **109**, 147404 (2012)
- [9] K. D. Jöns et al., *Nano Letters* (2012), DOI: 10.1021/nl303668z

KURZGEFASST

■ CPT-Invarianz bestätigt

Alle physikalischen Gesetze bleiben unverändert, wenn man zugleich Teilchen durch Antiteilchen ersetzt (C-Transformation), eine Raumspiegelung ausführt (P) und die Zeitrichtung umkehrt (T). Dieses auf Wolfgang Pauli zurückgehende CPT-Theorem beruht auf sehr allgemeinen Voraussetzungen, die im Rahmen einiger Theorien der Quantengravitation jedoch nicht erfüllt sind. Eine Konsequenz davon wäre, dass die Lichtgeschwindigkeit von der Polarisation der Photonen abhängt. Japanische Wissenschaftler haben nun die Polarisation der Gammastrahlung von drei Gamma Ray Bursts analysiert und daraus abgeleitet, dass ein zur Beschreibung der CPT-Verletzung eingeführter Parameter kleiner als 10^{-15} sein muss – das ist eine Verbesserung um acht Größenordnungen gegenüber älteren Analysen.

K. Toma et al., *Phys. Rev. Lett.* **109**, 241104 (2012)

■ Bei drei ist Schluss

Die gesamte bekannte Materie ist aus nur einem Dutzend Teilchen zusammengesetzt, die drei Generationen mit jeweils vier Teilchen bilden. Jede Generation enthält zwei Quarks (z. B. up, down) sowie zwei Leptonen (z. B. Elektron und Elektron-Neutrino). Könnte es weitere, bislang unbekannte Generationen geben? Eine statistische Analyse, die Ergebnisse der Higgs-Suche an LHC und Tevatron sowie ältere Präzisionsmessungen zur elektroschwachen Wechselwirkung umfasst, hat nun eine klare Antwort geliefert: Mit einer Wahrscheinlichkeit von 99,99999 Prozent lässt sich eine vierte Teilchengeneration ausschließen. O. Eberhardt et al., *Phys. Rev. Lett.* **109**, 241802 (2012)