

zwischen 26 und 36 GHz. Die Winkelauflösung wird durch die Anordnung der 13 Elemente bestimmt; in der gewählten Konfiguration betrug sie 20 Bogenminuten.

Um störende atmosphärische und thermische Einflüsse zu verringern, wurden die Polarisationsmessungen an der Amundsen-Scott-Südpolstation durchgeführt. In zwei aufeinander folgenden Südpolarnächten wurden zwei Felder am Himmel mit je $3,4^\circ$ Radius insgesamt 271 Tage lang beobachtet. Diese Felder waren zuvor sorgfältig ausgewählt worden, um störende Vordergrundemission zu vermeiden.

Mit diesem Experiment gelang der Nachweis, dass die kosmische Mikrowellenstrahlung in den beiden beobachteten Feldern tatsächlich linear polarisiert ist. Gleichzeitig wurde auch die unpolarisierte Strahlung in denselben Feldern beobachtet. Die Intensität der polarisierten Strahlung hat nicht nur die erwartete Amplitude von etwa einem Zehntel derjenigen der unpolarisierten Strahlung. Darüber hinaus lässt sich aus der Amplitude der Temperaturschwankungen als Funktion ihrer Größe vorhersagen, wie die Amplitude der Polarisationschwankungen mit deren Größe variieren sollte, und auch diesen Test hat das DASI-Experiment zweifelsfrei bestanden. Eine Batterie weiterer sorgfältiger Tests schließt aus, dass die nachgewiesene Polarisation einen anderen Ursprung haben könnte als die Thomson-Streuung des CMB 400000 Jahre nach dem Urknall.

Die genaue Messung der Polarisation gehört nun zu den wichtigsten Zielen weiterer Experimente, von denen der bereits operierende NASA-Satellit MAP und der für 2007 geplante ESA-Satellit Planck die wichtigsten sein werden. Vollständige Himmelskarten der Temperatur- und Polarisationschwankungen im CMB werden es dann erlauben, die Grundlagen der Kosmologie mit bisher ungeahnter Genauigkeit festzulegen.

MATTHIAS BARTELMANN

- [1] *M. Bartelmann*, *Sterne und Welt- raum*, Mai 2000, S. 337
- [2] *M. Bartelmann*, *Phys. Bl.*, September 2001, S. 41
- [3] *M. Bartelmann*, *Phys. Bl.*, Juni 2000, S. 14
- [4] *W. Hu, M. White*, *New Astronomy* 2, 323 (1997)
- [5] *J. Kovac et al.*, <http://arXiv.org/abs/astro-ph/0209478>

Dr. Stefan Strauf und Priv. Doz. Dr. Peter Michler, Institut für Festkörperphysik, Universität Bremen, Otto-Hahn-Allee, 28359 Bremen

Identische Photonen „auf Bestellung“

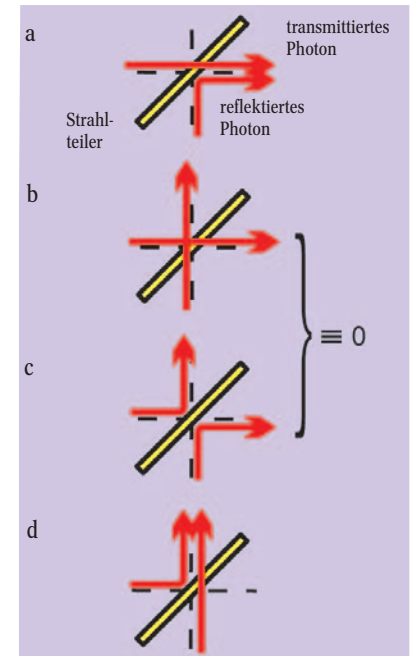
Mit Halbleiter-Quantenpunkten in Mikroresonatoren lassen sich einzelne und vollständig identische Photonen für die Quanteninformationsverarbeitung erzeugen.

Die Halbleiter-Quantenoptik ist ein faszinierendes neues Forschungsgebiet mit großem Einfluss auf viele Bereiche der Grundlagenphysik und mit dem Potenzial, die Kommunikationssysteme zu revolutionieren. Das Interesse an diesem Forschungsfeld hat aufgrund der Entwicklung von qualitativ hochwertigen Quantenpunkten und Mikroresonatoren sowie der Aussicht auf völlig neuartige Bauelemente in den letzten Jahren ständig zugenommen. So benötigt beispielsweise das sich schnell entwickelnde Gebiet der Quanten-Informationsverarbeitung Lichtquellen, die auf Bestellung einzelne Photonen oder Photonenpaare mit starken Quantenkorrelationen emittieren können (vgl. [1]). Santori und Kollegen [2] von der University of Stanford haben nun gezeigt, wie sich mit einer Einzelphotonenquelle auf Halbleiterbasis Photonen erzeugen lassen, die vollkommen identisch sind, obwohl sie völlig unabhängig voneinander und zu unterschiedlichen Zeitpunkten emittiert werden. Diese Arbeiten können als ein erster Schritt für die Implementierung von logischen Gattern mit einzelnen identischen Photonen für einen optischen Quantencomputer angesehen werden [3].

Befinden sich zwei Photonen in derselben Mode des elektromagnetischen Feldes, stimmen sie also in all ihren Eigenschaften in Frequenz und Polarisation überein, so tritt der bosonische Charakter identischer Quanten zutage. Ein überraschender Effekt zeigt sich z. B. bei der Interferenz zweier identischer Photonen, die aus unterschiedlichen Richtungen auf einen 50/50-Strahlteiler treffen (Abb.). Mithilfe der Quantenelektrodynamik berechnen sich die Wahrscheinlichkeiten für Reflexion bzw. Transmission der Photonen aus dem Quadrat der Summe der Wahrscheinlichkeitsamplituden *sämtlich möglicher Wege* der Photonen. Für identische Photonen heben sich nun die Amplituden dafür, dass entweder beide transmittiert oder beide reflektiert werden (Abb. b, c) ge-

rade auf; die Amplituden interferieren destruktiv. Es scheint, als ob sich die Photonen „verabredet“ hätten, den Strahlteiler stets *gemeinsam* über den gleichen Ausgang zu verlassen (Abb. a, d).

Die Ununterscheidbarkeit identischer Photonen wurde experimentell erstmals 1987 von Hong, Ou



Treffen zwei Photonen an einem 50/50-Strahlteiler aufeinander, so gibt es für die Reflexion bzw. Transmission vier Realisierungsmöglichkeiten: Entweder wird eines der beiden Photonen transmittiert und das andere reflektiert (Fall a und d), oder es werden entweder *beide* Photonen transmittiert (b) oder *beide* Photonen reflektiert (c). Handelt es sich um zwei *identische Photonen*, die *zeitgleich* eintreffen, so interferieren nach den Regeln der Quantenmechanik die Wahrscheinlichkeitsamplituden für die Fälle (b) und (c) gerade destruktiv. Es scheint dann so, als ob sich die Photonen „verabredet“ hätten den Strahlteiler stets *gemeinsam* über den gleichen Ausgang zu verlassen. Dieses Experiment zum Nachweis der Ununterscheidbarkeit zweier Photonen wurde von Santori und Kollegen [1] für völlig *unabhängige* Photonen demonstriert, die von einem Halbleiter-Quantenpunkt emittiert wurden.

und Mandel an der University of Rochester nachgewiesen [4]. Als Photonenquelle diente ein nichtlinearer Kristall, der mit einem Laser bestrahlt wurde. Ein Teil des einfallenden Lichts wurde dabei über eine nichtlineare Wechselwirkung in ein simultan erzeugtes Zwillingpaar von Photonen konvertiert. Die beiden Photonen verlassen den Kristall jeweils in unterschiedliche Raumrichtungen, sodass sie entweder *von links* oder *von unten* auf dem Strahlteiler eintreffen können

(vgl. Abb. 1). Durch Einfügen einer optischen Verzögerungsstrecke in den Weg des einen Photons lässt sich die relative Ankunftszeit zwischen den beiden Photonen am Strahlteiler variieren. Treffen sie zu unterschiedlichen Zeiten ein, so werden sie jeweils zu 50 % entweder reflektiert oder transmittiert. Eine Koinzidenzmessung mit Hilfe zweier Photonenzähler an den beiden Ausgängen des Strahlteilers ergibt in diesem Fall eine messbare Koinzidenzrate. Ist die Verzögerungszeit jedoch null, treffen die zwei Photonen also gleichzeitig ein, so sinkt die Koinzidenzrate infolge Ununterscheidbarkeit identischer Photonen auf null.

Da das Zwillingsspaar simultan erzeugt wird, könnte argumentiert werden, dass die beiden Photonen sich schon bei ihrer Erzeugung „verabredet“ haben, den Strahlteiler über den gleichen Ausgang zu verlassen. Dies ist in dem neuen Experiment von Santori und Kollegen nun nicht mehr möglich [2]. Die Identität der Photonen wird dabei ähnlich wie im oben geschilderten Experiment über eine Koinzidenzmessung der Zwei-Photonen-Interferenz am Strahlteiler nachgewiesen. Als Quelle verwenden sie jedoch einen Halbleiter-Quantenpunkt, der in einen Mikroresonator hoher Güte eingebettet ist, sodass die Photonen nahezu vollständig in ein und der selben Mode emittiert werden. Gegenüber der Erzeugung von Zwillingsspaaren mit einem nichtlinearen Kristall hat die Photonenquelle von Santori den Vorteil, dass immer nur ein *einzelnes Photon* auf ein geeignetes Triggersignal hin zum *gewünschten Zeitpunkt* von dem Quantenpunkt emittiert wird. Beide Eigenschaften sind neben der Ununterscheidbarkeit der Photonen wichtige Voraussetzungen für die Realisierung eines optischen Quantencomputers.

Problematisch ist beim derzeitigen Stand der Technik noch die zu geringe Sammeleffizienz der Photonen, sowie die limitierte Quantenausbeute von geeigneten Detektoren. Beide Prozesse generieren eine Fehlerrate beim Quantenrechnen mit Photonen, die noch weit oberhalb der Wirksamkeit von Korrektur-Algorithmen liegt. Ein neuer Ansatz zur Steigerung der Detektor-effizienz, der mithilfe von gespeicherten Photonen Effizienzen oberhalb von 99 % verspricht, wurde kürzlich von Imamoglu vorgeschla-

gen [5]. Eine weitere technologische Herausforderung stellt die gezielte Anpassung der optischen Übergangsenergie von Quantenpunkten an die optische Mode des Mikroresonators dar. Nur wenn beide Energien übereinstimmen, lassen sich identische Photonen effizient erzeugen. Abhilfe schaffen hier eventuell einzelne Dotieratomen in Halbleitern, für die kürzlich ebenfalls eine Emission einzelner Photonen auf Bestellung nachgewiesen wurde [6]. Der Vorteil im Vergleich zu den Quantenpunkten liegt in der etwa eins bis zwei Größenordnungen besser definierten optischen Übergangsenergie von gebundenen Exzitonen an Dotieratomen, sodass sich die Anpassung an die Mode des Mikroresonators vereinfacht.

Das Experiment von Santori und Kollegen hat auf eindrucksvolle Weise gezeigt, dass man mit Halbleiter-Quantenpunkten die „reinsten“ Lichtzustände, das heißt einzelne Photonen in einzelnen Moden erzeugen kann. Somit ist ein wichtiger Meilenstein in der Halbleiter-Quantenoptik erreicht, und technologische Neurungen werden mit Sicherheit folgen.

STEFAN STRAUF UND
PETER MICHLER

- [1] P. Michler, C. Becher, Phys. Blätter, September 2001, S. 55; A. Beveratos et al., Phys. Rev. Lett. **89**, 187901 (2002)
- [2] C. Santori, D. Fattal, J. Vuckovic, G. S. Solomon, Y. Yamamoto, Nature **419**, 594 (2002)
- [3] E. Knill, R. Laflamme, G. J. Milburn, Nature **409**, 46 (2001)
- [4] C. K. Hong, Z. Y. Ou, L. Mandel, Phys. Rev. Lett. **59**, 2044 (1987)
- [5] A. Imamoglu, Phys. Rev. Lett. **89**, 163602 (2002)
- [6] S. Strauf et al., Phys. Rev. Lett. **89**, 177403 (2002)