

■ Auf einem Chip vereint

Aus Kohlenstoff-Nanoröhrchen entsteht ein quantenphotonisches Mikrobauteil, dessen Einzelphotonenquelle elektrisch angeregt wird.

Quantencomputer beruhen auf den Prinzipien der Superposition und Verschränkung. In ihren kleinsten Speichereinheiten, den Quantenbits, liegen die binären Zustände Null und Eins als Überlagerung vor. Die technische Umsetzung von Quantenbits gelingt z. B. mit Schleifen aus supraleitendem Niobium, in denen sich Ringströme ausbilden. Deren magnetisches Moment repräsentiert nur bei extrem tiefen Temperaturen das Quantenbit. Denn die hochgenaue Messung, die das Moment bestimmt, ist gegenüber Störungen besonders empfindlich.

Photonen als Quantenbits unterliegen dieser Einschränkung nicht und könnten die Information beispielsweise in ihrer Polarisation kodieren [1]. Zudem ermöglichen sie es als propagierende Teilchen, Quantencomputing und Quantenkommunikation direkt zu verknüpfen. Solche Konzepte entstehen im Rahmen der Quantenphotonik. Ein wichtiges Ziel ist es, steuerbare und effiziente Quellen einzelner Photonen zu entwickeln. Tatsächlich gelang es bereits, verschiedene Einzelphotonenquellen zu identi-

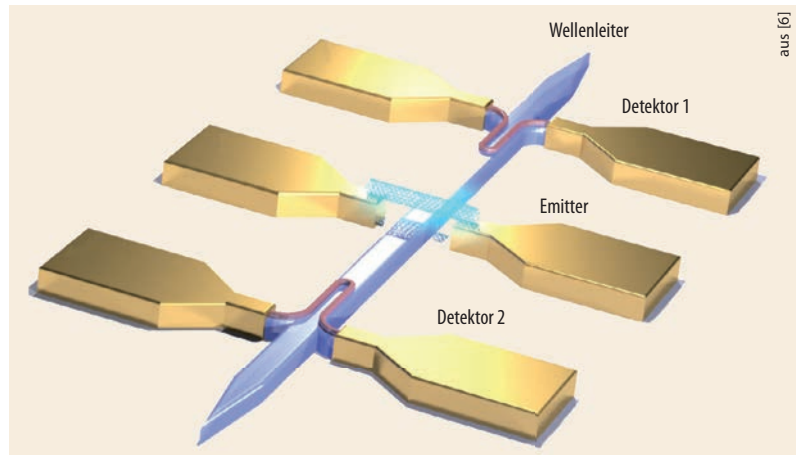


Abb. 1 Das Mikrobauteil besteht aus dem elektrisch kontaktierten Kohlenstoff-Nanoröhrchen als Emitter und den

zwei Detektoren. Ein Wellenleiter führt das Licht und dient dazu, die Komponenten effizient zu koppeln.

fizieren und zu realisieren. Dazu gehören Halbleiter-Nanokristalle („Quantum Dots“), Farbstoffzentren in Diamant und fluoreszierende Moleküle [2, 3]. All diese Quellen arbeiten mit optischer Anregung. Eine integrierte Lösung auf einem Chip erfordert daher eine Anregungslichtquelle. Zudem sind effiziente Spektralfilter notwendig, um das anregende Licht vom Licht der wesentlich schwächeren Einzelphotonenquelle zu separieren. Interessant wäre es daher, eine Einzelphotonenquelle elektrisch anzuregen [4, 5].

Kürzlich stellte eine Gruppe von Wissenschaftlern – federführend vom Karlsruher Institut für Technologie, der TU Darmstadt und der Universität Münster – einen neuen Ansatz vor, um die elektrische Anregung zu realisieren [6]. Dazu verwenden sie einzelne, halbleitende Kohlenstoff-Nanoröhrchen. Diese quasi-eindimensionalen Strukturen besitzen Durchmesser von etwa einem Nanometer und Längen bis in den Millimeterbereich. Sie entstehen z. B. mittels chemischer Gasphasenabscheidung und wachsen auf einem Substrat. Bisher entstehen dabei Mischungen aus halbleitenden Nanoröhrchen mit unterschiedlichen Bandlücken bis hin zu metallischen Strukturen. Für die technische Anwendung ist

es entscheidend, die Röhrchen mit geeignetem Verhalten auszuwählen.

Die Besonderheit des neuen Ansatzes besteht darin, die Kohlenstoff-Nanoröhrchen sowohl als elektrische Zuführung als auch als Einzelphotonenquelle zu verwenden (Abb. 1). Dadurch ist es nicht erforderlich, den sonst üblichen Größenunterschied zwischen konventioneller Zuführung im sub-Mikrometerbereich und nanoskaligem Quantensystem zu überbrücken. Für eine effiziente Abstrahlung und die kontrollierte räumliche Führung des Lichts koppeln die Nanoröhrchen direkt an einen optischen Wellenleiter an. Zwei supraleitende Einzelphotonendetektoren mit hoher Zeitauflösung komplettieren das Mikrobauteil. Im Mittelpunkt der Untersuchungen stand die Frage, ob sich die Nanoröhrchen als Einzelphotonenquellen elektrisch anregen lassen [6]. Dass eine optische Anregung möglich ist, wurde bereits gezeigt [7].

Im Experiment werden daher die Detektoren in Koinzidenz zueinander betrachtet. Im Fall einer Einzelphotonenquelle ist es nicht möglich, dass beide Detektoren gleichzeitig ein Photon registrieren, weil die Quelle erst nach Durchlaufen eines Anregungs-Emissions-Zyklus ein zweites Photon emittieren kann.

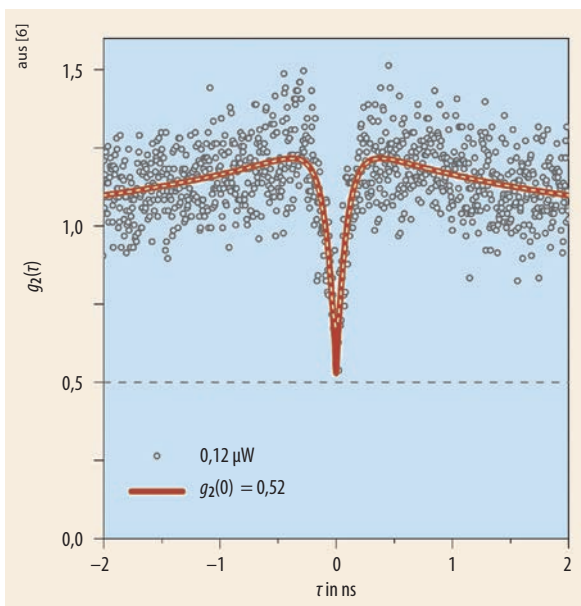


Abb. 2 Im Koinzidenz-Histogramm der beiden Detektoren zeigt sich ein steiler Rückgang bei $\tau = 0$: Zum selben Zeitpunkt weist entweder Detektor 1 oder Detektor 2 ein Photon nach – das Merkmal einer Einzelphotonenquelle.

Für eine ideale Quelle nimmt daher die Koinzidenz-Funktion $g_2(\tau)$ bei einer Zeitdifferenz $\tau = 0$ den Wert Null an. Für Zeitdifferenzen, die der mittleren Lebensdauer des Anregungszustands entsprechen, steigt der Wert der Koinzidenz-Funktion an. Ein thermischer Strahler erreicht beispielsweise den Wert 2.

Bei realen Quellen geht man aufgrund der Quantenstatistik bereits für Werte von $g_2(0) < 0,5$ von Einzelphotonenemission aus. Für die Nanoröhrchen im Mikrobauteil lagen die Werte von $g_2(0)$ bei etwa 0,52 (Abb. 2). Die kurze Lebensdauer des emittierenden Zustands von etwa 100 ps und die zeitliche Auflösung der Messung von ungefähr 40 ps führen dazu, dass Photonen aus zwei eng aufeinanderfolgenden Anregungs-Emissions-Zyklen gleichzeitig nachgewiesen werden. Das erhöht den beobachteten Wert von $g_2(0)$, sodass der tatsächliche Wert deutlich unter 0,5 liegen dürfte und damit die nichtklassische Quantennatur des emittierten Lichts nachweist.

Warum sich die räumlich ausgedehnten quasi-eindimensionalen Kohlenstoff-Nanoröhrchen wie

Einzelphotonenquellen verhalten, ist noch nicht völlig klar. Eine mögliche Erklärung wäre eine außergewöhnlich effiziente Lokalisierung mobiler Anregungszustände (Exzitonen) durch einen einzelnen energetisch abgesenkten Zustand. Dieser könnte durch Störungen der Umgebung entstehen, und dann als Emitter agieren. Nach diesem Prinzip erfolgte die gezielte Dotierung von Nanoröhrchen, um nach optischer Anregung eine Einzelphotonen-Emission bei Raumtemperatur zu realisieren [8]. Im Fall der elektrischen Anregung könnten auch die besonders starken Korrelationseffekte der Ladungsträger dazu führen, dass ein einzelner emittierender Zustand übrig bleibt: Treten zwei Anregungszustände gleichzeitig auf, könnten sie sich gegenseitig auslöschen (Annihilation).

Die Mikrobauteile erreichen mit 10^{-4} Photonen pro Elektron bereits eine sehr gute Konversionseffizienz. Die zu erwartende Modulationsbandbreite liegt im GHz-Bereich und würde daher sehr hohe Taktraten eines zukünftigen Quantencomputers ermöglichen. Bisher wurden die Bauteile bei

5 K betrieben, weil die Detektoren supraleitend arbeiten und die emittierenden Anregungszustände in diesem Fall lokalisiert sind. Eine gezielte Dotierung könnte den Betrieb bei Raumtemperatur erlauben. Auch im klassischen Computerdesign dienen Kohlenstoff-Nanoröhrchen als elektrische Zuleitungen und Transistoren [9]. Eine direkte Kombination von klassischem und Quantencomputing basierend auf den gleichen Komponenten erscheint mit dem neuen Chip möglich.

Achim Hartschuh

- [1] P. Kok et al., Rev. Mod. Phys. **79**, 135 (2007)
- [2] H. Stolz, M. Kira und S. W. Koch, Physik Journal, Juni 2008, S. 37
- [3] W. Pfaff, Physik Journal, Februar 2016, S. 20
- [4] C. L. Salter et al., Nature **465**, 594 (2010)
- [5] N. Mizuochi et al., Nat. Photon. **6**, 299 (2012)
- [6] S. Khasminkaya et al., Nature Photon. (2016), doi: 10.1038/nphoton.2016.178
- [7] A. Högele et al., Phys. Rev. Lett. **100**, 217401 (2008)
- [8] X. Ma et al., Nat. Nanotech. **10**, 671 (2015)
- [9] M. M. Shulaker et al., Nature **501**, 526 (2013)

■ Verblüffendes Wasser

Wassermoleküle in engen Kanälen von Beryll-Kristallen weisen Ordnung mit ferroelektrischem Verhalten auf.

Wasser ist zweifellos eine der wichtigsten und auch exotischsten Substanzen auf unserem Planeten. Die Vielzahl von Besonderheiten, die zuweilen als „Anomalien“ diskutiert werden, resultiert aus der speziellen Struktur des Wassermoleküls, insbesondere aus der Verteilung der elektrischen Ladungen. Diese Struktur bewirkt ein elektrisches Dipolmoment und führt im kondensierten Zustand zu einem perkolierenden, nahezu tetraedrischen Netzwerk aus Wasserstoffbrücken. Dieses entsteht durch die einzigartige Konstellation von zwei positiven und zwei – wenn auch verschmierten – negativen Ladungszentren pro Wassermolekül [1].

Ein einzelnes Wassermolekül ist in der Flüssigkeit trotz der starken Vernetzung durch Wasserstoffbrücken-Bindungen sehr beweglich. Die dielektrische Relaxationszeit beträgt für Wasser am Schmelzpunkt nur etwa 10^{-11} s und ist um sechs Größenordnungen kleiner als für Eis bei 0 °C. Diese Zeit ist ein Maß dafür, wie lange es dauert, bis sich ein Wassermolekül in einen neuen Bindungszustand innerhalb des Netzwerks umorientiert. Entscheidenden Einfluss auf die kurze Relaxationszeit der Flüssigkeit hat der höhere Gehalt an Netzwerk-Defekten gegenüber der im Eis weitgehend perfekten tetraedrischen Ordnung [2]. Auch die sehr große Konzentration von Möglichkeiten

für Wasserstoffbrücken (220 mol/l) spielt eine Rolle. Wenn sich infolge thermischer Fluktuationen Defekte bilden, findet ein betroffenes Wassermolekül durch Umorientieren rasch ein geeignetes Partnermolekül, um eine neue Bindung einzugehen [2, 3].

Zunächst überrascht die Tatsache, dass sich Wasser trotz seiner vergleichsweise starken Vernetzung und ausgeprägten Struktur aufgrund der zahlreichen verfügbaren Wasserstoffbrücken-Bindungspartner gegenüber anderen Flüssigkeiten durch eine hohe dynamische Flexibilität auszeichnet. Gleichermäßen erstaunlich ist es, dass die der Vernetzung entgegenwirkende Beeinflussung,