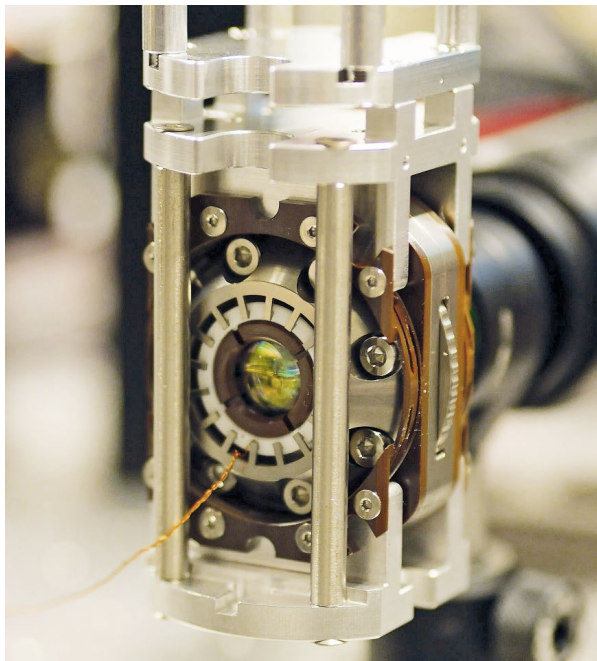


Atomare Einzelmitter in optischen Resonatoren

Der Weg zum Quanteninternet

ANDREAS REISERER

Globale Quantennetzwerke könnten mit einzelnen Atomen als Emitter in optischen Resonatoren realisiert werden. Dies würde eine abhörsichere Kommunikation sowie die Vernetzung von Quantencomputern und Quantensensoren ermöglichen.



In dem gezeigten optischen Resonator befindet sich ein Kristall mit Dotieratomen. In Zukunft kann ein solches Bauteil als Schnittstelle zwischen fliegenden Qubits aus Licht in einer Glasfaser und ruhenden Qubits, zum Beispiel in Form von Erbium-Dotieratomen, dienen. Damit ließe sich Quanteninformation über längere Strecken als 100 km übertragen.

This is an open access article under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License, which permits use, distribution and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited and is not used for commercial purposes.

In den vergangenen Jahrzehnten hat die Fähigkeit, Information digital zu verarbeiten, unsere Welt nachhaltig verändert. Dieser Wandel begann mit der Erfindung des Computers und des Personal Computers und wurde zur „digitalen Revolution“, als diese Computer vernetzt wurden. Dadurch kann man heute an fast jedem Ort der Welt mit einem günstigen Endgerät auf die Rechenleistung und – wichtiger noch – die Daten in großen Rechenzentren zurückgreifen.

Die digitale Revolution ist zwar sicher noch nicht abgeschlossen, dennoch arbeitet die Wissenschaft bereits an der nächsten, der „Quanten-Revolution“. Diese meint neuartige Geräte, in denen quantenmechanische Überlagerungszustände genutzt werden, um eine Funktionalität zu erreichen, die mit klassischen Geräten nicht möglich ist. Beispielsweise können so Sensoren mit bisher unerreichter Auflösung realisiert werden. Hinzu kommen Quantencomputer, die immer komplexere Rechenprobleme lösen können, oder Quantensimulatoren, die zum Beispiel die Entwicklung neuer Materialien oder die Suche nach neuen Arzneimitteln revolutionieren sollen. Ähnlich wie in der klassischen Informationsverarbeitung könnte dabei die Vernetzung von Quantencomputern und Quantensensoren zu einem Quantennetzwerk, oder gar einem Quanteninternet, eine zentrale Rolle in dieser Quantenrevolution spielen [1].

Ein solches Quantennetzwerk (Abbildung 1) würde dabei – genau wie das klassische Internet – aus stationären Quantensystemen bestehen, die durch Lichtleiter über große Distanzen miteinander verbunden sind. Potenziell dafür geeignete Hardware wird aktuell von vielen Forschungsgruppen untersucht. So konnte diese Forschung bereits grundlegende Funktionen wie die Verschränkung von zwei entfernten Netzwerkknoten demonstrieren, sowie den Transfer von Quantenzuständen über große Distanzen in unterschiedlichen Systemen [2, 3]. Um das volle Potenzial von Quantennetzwerken auszuschöpfen, ist es jedoch erforderlich, diese Prototypen zu erweitern, sodass mehr Knoten über größere Distanzen verschränkt werden können. In diesem Artikel beschreibe ich, wie dies durch effiziente Licht-Materie-Schnittstellen gelingen kann, an denen auch wir am Max-Planck-Institut für Quantenoptik und der Technischen Universität München in Garching forschen.

„Hilbert space is a big place“

Dieser berühmte Spruch von Carlton Caves, heute emeritierter Professor für Physik und Astronomie der University of New Mexico in Albuquerque, bringt auf den Punkt, warum Quanteninformationsverarbeitung so attraktiv ist. Quantensysteme unterscheiden sich grundlegend von klassischen Systemen. Dies wird deutlich, wenn man die Information vergleicht, die nötig ist, um den Zustand eines digitalen Systems zu beschreiben. Als Beispiel kann ein System aus zwei Schaltern dienen, dessen Zustand durch zwei Bits, also Binärwerte $a_1, a_2 \in \{-1, 1\}$, vollständig charakterisiert ist.

Für n Schalter benötigt man entsprechend n Bits a_i . Betrachtet man hingegen ein System aus zwei Quantenbits, realisiert zum Beispiel durch das magnetische Moment zweier Elektronen, ändert sich die Situation: Man benötigt nun 2^2 Koeffizienten b , um den Zustand der Qubits im Hilbert-Raum zu beschreiben:

$$|\Psi\rangle = b_1|00\rangle + b_2|01\rangle + b_3|10\rangle + b_4|11\rangle.$$

Im Allgemeinen können die Koeffizienten hierbei beliebige Werte annehmen. Zum direkten Vergleich mit klassischen Systemen kann man sie jedoch auch digitalisieren, mit dem Resultat $b_i \in \{-1,1\} / \sqrt{n}$. Dabei sorgt der Faktor \sqrt{n} für die korrekte Normierung. Wenn man nun ein System aus n Qubits beschreibt, benötigt man entsprechend 2^n Binärwerte b_i . Daraus folgt, dass die erforderliche Information exponentiell mit der Zahl der Qubits zunimmt. Um 170 digitalisierte Qubits zu beschreiben, benötigt man $2^{170} \approx 10^{51}$ klassische Bits – dies ist mehr als die Gesamtzahl der Atome der Erde.

Aus dieser einfachen Überlegung ergibt sich unmittelbar, dass es nicht möglich ist, quantenmechanische Systeme selbst moderater Größe ohne zusätzliche, vereinfachende Annahmen auf klassischen Computern zu simulieren. Umgekehrt folgt daraus, dass Quantencomputer bei bestimmten Aufgaben ihren klassischen Pendanten fundamental überlegen sind.

Möchte man nun Quantencomputer zu einem Netzwerk verbinden oder modulare Quantenrechner sowie Quantensimulatoren durch das Zusammenschalten kleinerer Einheiten realisieren [4], ist schon durch die Menge der zu übertragenden Information klar, dass dies nicht über klassische Netzwerke möglich ist. Man benötigt dafür Quantennetzwerke, die Qubits übertragen können.

Verschränkung als Ressource

Quantennetzwerke unterscheiden sich von klassischen Netzwerken auch dadurch, dass sie in der Lage sein müssen, Verschränkung zwischen entfernten Netzwerkknoten herzustellen. Diese Verschränkung kann wiederum genutzt werden, um Zufallszahlen zu erzeugen, die nur von zwei Partnern geteilt werden – eine unschätzbare Ressource für abhörsichere Kommunikation und verwandte Aufgaben, etwa geheime Wahlen, Authentifizierung oder Verifizierung [1].

Das zugrundeliegende Prinzip ist, dass quantenmechanische Observablen nicht unabhängig von einer Messung existieren, was durch die ersten schlupflochfreien Tests der Bellschen Ungleichung in elementaren Quantennetzwerken [5] zweifelsfrei nachgewiesen wurde (siehe auch Physik in unserer Zeit 2015, 46(6), 288). Was nicht existiert, kann natürlich auch nicht von einem potenziellen Angreifer ausspioniert werden. Daher bieten Quantennetzwerke einen fundamentalen Vorteil gegenüber klassischen Verfahren zur Verschlüsselung über einen öffentlichen Kanal [6] (siehe Physik in unserer Zeit 2016, 47(1), 20).

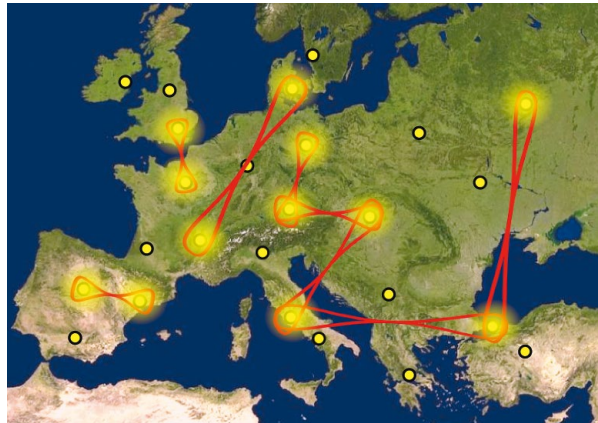


Abb. 1 In einem solchen kontinentalen Quantennetzwerk wären Quantensysteme als Netzwerkknoten in unterschiedlichen Städten positioniert. Für den Austausch von Quanteninformation würden die an einer Verbindung beteiligten Knoten quantenmechanisch miteinander verschränkt werden (rote Linien).

Doch die Quantenkryptographie ist nicht die einzige Anwendung von Verschränkung. Auch die Tatsache, dass bestimmte verschränkte Zustände besonders sensibel auf Umwelteinflüsse reagieren, kann für die Realisierung von Sensoren bisher unerreichter Präzision genutzt werden [7]. In einem Quantennetzwerk ließen sich solche Sensoren nun vernetzen, um verteilte Messgrößen genauer zu erfassen. Besonders interessant erscheint aus heutiger Sicht die Synchronisation von Atomuhren [8] und die Realisierung von optischen Teleskopen mit drastisch erhöhter Auflösung durch Zusammenschalten weit entfernter Einzelteleskope [9].

Große optische Quantennetzwerke

Schon heute ist also eine große Zahl potenzieller, relevanter Anwendungen von Quantennetzwerken bekannt. Deren Implementierung erfordert die verlustarme Übertragung von Quanteninformation über größere Strecken. Wie in klassischen Netzwerken können dazu elektromagnetische Wellen verwendet werden, die allerdings sehr geringe Intensität aufweisen und typischerweise nur aus einzelnen Lichtteilchen bestehen. Um nicht durch thermisches Rauschen limitiert zu sein, sollte die Energie dieser Photonen groß gegenüber der thermischen Energie sein. Dies erfordert Frequenzen $f \gg kT/h$, diese Skala ist also durch das Verhältnis von Boltzmann- und Planck-Konstante bestimmt: $k/h \approx 2 \cdot 10^{10} \text{ Hz} \cdot \text{K}^{-1}$. Bei Raumtemperatur ($T \approx 300 \text{ K}$) sind daher Frequenzen $f \gtrsim 10^{14} \text{ Hz}$, entsprechend nahinfrarotem Licht, erforderlich.

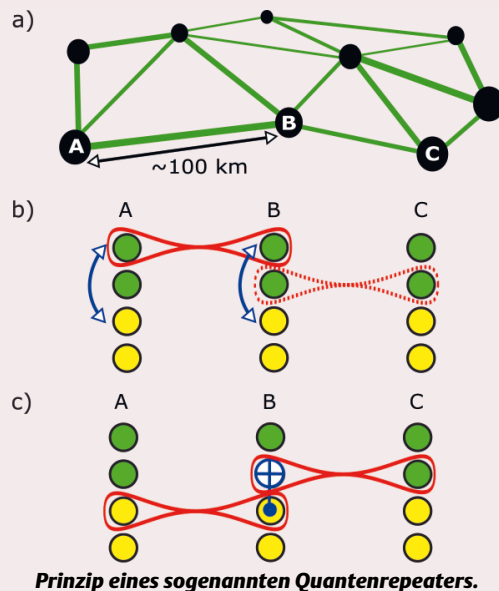
Im Prinzip kann dieses Licht mit Freistrahloptiken und gegebenenfalls Satelliten über große Distanzen, mehr als 1000 km [10], übertragen werden. In diesem Fall ist man jedoch auf gute Wetterverhältnisse und geringe Verunreinigungen in der Atmosphäre angewiesen, um die Verluste in tolerierbaren Grenzen zu halten. Eine zuverlässigere

Alternative ist es, das Licht in optischen Fasern zu übertragen. Dies hat auch den Vorteil, dass die dazu erforderliche Infrastruktur bereits flächendeckend für klassische Netzwerke vorhanden ist. Allerdings gilt es dabei, die exponentiellen Verluste in Glasfaserkabeln zu beachten. Diese entstehen dadurch, dass die Fasern aus einzelnen Atomen bestehen, was zu Rayleigh-Streuung führt, und diese Atome relativ zueinander schwingen und dabei infrarotes Licht absorbieren können. Wegen dieser grundlegenden Limitierungen ist seit etwa fünfzig Jahren keine weitere Verringerung der Verluste in optischen Fasern gelungen.

Aktuelle Glasfasern weisen eine Absorption von circa 0,2 dB/km im Telekommunikationsfenster um 1550 nm

auf. Dies bedeutet, dass man einzelne Photonen über 100 km mit etwa 1% Erfolgswahrscheinlichkeit übertragen kann. Innerhalb von Metropolregionen ist somit bei noch akzeptabler Reduktion der Datenrate eine abhörsichere Quantenkommunikation möglich – über größere Distanzen allerdings nicht mehr. Ein technisch einfacher, aber nicht unbedingt zufriedenstellender Ansatz ist es, bei größeren Strecken „Trusted Nodes“, also vertrauenswürdige Knoten zu verwenden. Mit diesem Ansatz wurden kürzlich in China 4600 km überbrückt [10]. Dabei wird die Information nur auf dem Weg zwischen den Knoten quantenmechanisch verschlüsselt, nicht aber in den Knoten selbst. Dies hat zwei Nachteile: Erstens sind die Knoten damit nicht mehr inhärent abhörsicher; zweitens lässt sich das System nur noch für quantenkryptografische Anwendungen nutzen, nicht aber für die Vernetzung von Quantencomputern.

QUANTEN-NETZWERKARCHITEKTUR



In einem Quantennetzwerk (Abbildung a) sollen Qubits in stationären Netzwerkknoten (schwarz), auch Quantenrepeater-Knoten genannt, über große Distanzen verschränkt werden. Dazu werden Glasfasern (grün) genutzt, um Photonen als fliegende Kommunikationsqubits auszutauschen. Heute gelingt dies nur über eine begrenzte Distanz von etwa 100 km mit hinreichender Effizienz.

Um Qubits über größere Strecken, zum Beispiel zwischen den Knoten A und C, zu verschränken, wird die Strecke in kleinere Segmente AB und BC unterteilt (Abbildung b). Jeder Knoten verfügt über mehrere Kommunikationsqubits (grün), die sich in langlebige, stationäre Speicherqubits (gelb) übertragen lassen (blau). Es wird nun so lange versucht, Verschränkung zwischen den Kommunikationsqubits A-B und B-C herzustellen (rot gepunktet), bis ein Messsignal einen erfolgreichen Versuch signalisiert. Sind mehrere benachbarte Verbindungen verschränkt (rot) (Abbildung c), kann man durch lokale Qubit-Wechselwirkungen (blau) und Messungen deterministisch einen verschränkten Zustand erzeugen, der weiter entfernte Knoten mit einbezieht.

Hybride Netzwerkarchitektur

Um Verschränkung zwischen entfernten Quantenbits als Ressource nutzen zu können und so Quantencomputer miteinander zu verbinden, sind die bisher beschriebenen, rein photonischen Systeme daher nicht geeignet. Stattdessen benötigt man eine hybride Netzwerkarchitektur, die aus photonischen und stationären Qubits besteht, wie in „Quanten-Netzwerkarchitektur“ auf dieser Seite dargestellt. Mit dieser kann man deterministisch, also zuverlässig, Verschränkung vieler Qubits erzeugen, selbst wenn die Kanäle große Verluste aufweisen. Voraussetzung ist dabei gar nicht eine verlustfreie Verschränkung benachbarter Knoten, was bei optischen Fasern unmöglich wäre, sondern lediglich der zerstörungsfreie Nachweis der Verschränkung. Dieser ist tatsächlich durch Messung von Photonen nach einem Strahlteiler [5, 11] oder nach einem Spin-Photon-Quantengatter [2] möglich. Quantengatter sind das Äquivalent zu klassischen logischen Gatteroperationen (siehe Physik in unserer Zeit 2020, 51(4), 168).

In beiden Fällen benötigt man zur Synchronisation des Systems sogenannte Quantenspeicher. Das sind stationäre Qubits, welche die Verschränkung, die erfolgreich über eine Teilstrecke hergestellt wurde, aufrechterhalten, während diese auf einer anderen Teilstrecke generiert wird. Sobald erfolgreich Verschränkung innerhalb aller einzelnen Teilstrecken hergestellt wurde, gilt es, diese so zu verknüpfen, dass ein verschränkter Zustand über größere Distanz entsteht. Dies erfolgt über Quantengatter und Messungen an den Speicherqubits, die sich wiederum deterministisch implementieren lassen. Das geht am einfachsten, wenn die Speicherqubits aus einzelnen Atomen bestehen.

Einzelne Atome in Quantennetzwerkknoten

Damit einzelne Atome mit der erforderlichen Genauigkeit kontrolliert werden können, müssen sie gefangen und auf ausreichend niedrige Temperaturen gekühlt werden. Dies kann beispielsweise mit elektromagnetischen Feldern und Laserlicht in einer Ultrahochvakuumkammer erfolgen. In diesem Fall sind die Quantenbits sehr gut von der Umge-

bung isoliert und können daher sehr lange Speicherzeiten erreichen. Leider bringt das aber eine gewisse Komplexität des erforderlichen Aufbaus mit sich.

Eine technisch einfachere Alternative ist es, die Atome statt im Vakuum als Dotieratome in einem Wirtskristall gefangen zu halten, und die erforderliche Kühlung durch eine Kältemaschine zu implementieren. Auch in diesem Fall lassen sich bei geeigneter Wahl des Materials und der experimentellen Bedingungen lange Speicherzeiten erreichen, wobei der aktuelle Rekord bei circa sechs Stunden liegt [12].

Bei der Wahl der Emittent ist die Kohärenzzeit und deren Temperaturabhängigkeit jedoch nicht das einzige Kriterium. Zusätzlich müssen die Qubits auch stabile optische Übergangsfrequenzen aufweisen und in einem eng umfassten Wellenlängenbereich emittieren. Idealerweise liegt dieser im Telekommunikationsfenster, wo der Verlust in optischen Fasern minimal ist. Abbildung 2 zeigt die aktuell am besten untersuchten Emittent über der Kurve des Absorptionsverlusts in Glasfasern: Rubidium-Atome im Vakuum (grün), Farbzentren (NV-Zentren) in Diamant (blau) und Seltenerd-Dotieratome am Beispiel von Erbium (rot). Es stellt sich heraus, dass nur letztere einen kohärenten optischen Übergang [13] im optimalen Frequenzbereich aufweisen. Alle anderen Qubits erfordern über größere Distanzen hinweg den Einsatz von optischer Frequenzkonversion, also eine Umwandlung der Wellenlänge einzelner Photonen durch nichtlineare Optik in die geeignete Telekommunikationswellenlänge.

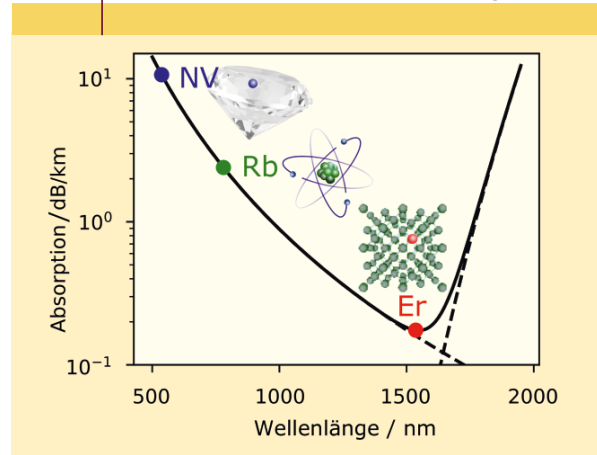
Effiziente Licht-Materie-Schnittstellen

Unabhängig davon, welche Speicherqubits man verwendet, sollten diese eine möglichst effiziente Kopplung an die photonischen Kanäle aufweisen. Dies ist allerdings nicht einfach zu erreichen, da der Absorptionsquerschnitt eines einzelnen Emittent im freien Raum, $\sigma_a \approx \lambda^2/2$, kaum größer ist als das beugungslimitierte Lichtfeld eines Photons der Wellenlänge λ [2]. Wenn die Emittent noch mehrere Zerfallskanäle aufweisen, wie es bei fast allen Atomen und Farbzentren der Fall ist, werden optische Verbindungen derart ineffizient, dass die Herstellung von Verschränkung über Kilometerdistanzen nur wenige Male pro Stunde erfolgreich ist [5]. Dies verhindert bislang eine Skalierung von Quantennetzwerken zu vielen Knoten und globalen Distanzen.

Um die Effizienz der Atom-Photon-Wechselwirkung zu verbessern gibt es unterschiedliche Ansätze. Zum einen kann man statt einzelner Emittent auch Atom-Ensembles verwenden. Dies erhöht den Wirkungsquerschnitt proportional zur Atomzahl, hat jedoch den Nachteil, dass sich Anregungen, die sich auf viele Atome verteilen, nur schwierig kontrolliert zur Wechselwirkung bringen lassen. Das erschwert die effiziente Verknüpfung verschränkter Qubits in den einzelnen Netzwerkknoten (siehe „Quanten-Netzwerkarchitektur“).

Eine weitere Alternative besteht darin, das Lichtfeld auf ein Volumen zu konzentrieren, das kleiner als das Beugungslimit ist. Das ist mit nanophotonischen Strukturen möglich.

ABB. 2 | GLASFASERN UND STATIONÄRE QUBITS



Die Kurve zeigt den Absorptionsverlust in Glasfasern in Abhängigkeit von der Lichtwellenlänge. Passend zu ihrer Emissionswellenlänge sind potenzielle stationäre Qubits für künftige Quantennetzwerke eingezeichnet: NV-Zentren in Diamant (blau), Rb-Atome im Vakuum (grün) und Erbium-Dotieratome (rot).

In diesem Ansatz ist es allerdings unvermeidlich, Qubits in der Nähe von Oberflächen anzuordnen. Dabei stören jedoch deren ungesättigte Bindungen, sowie absorbierte Fremdatome, die Kohärenz der Qubits oft empfindlich.

Aus diesem Grund verwenden die meisten aktuellen Experimente, darunter auch unsere am Max-Planck-Institut für Quantenoptik und an der Technischen Universität München, einen anderen Ansatz: Anstatt das Lichtfeld nur einmal mit den Emittent wechselwirken zu lassen, reflektiert man es in einem Resonator viele Male hin und her. Bei jedem Umlauf hat das Lichtfeld die Möglichkeit, mit dem Qubit in Wechselwirkung zu treten. Ist die Zahl der Reflektionen groß genug, so führt dies zu einer deterministischen Wechselwirkung. Die Effizienz der Licht-Materie-Wechselwirkung ist dann nur durch die optischen Verluste und die Modenanpassung des Resonators limitiert. In aktuellen Experimenten werden dabei über 70% Effizienz erreicht [2].

Optische Resonatoren

Die Qualität von optischen Resonatoren bezüglich der Licht-Materie-Wechselwirkung ist bestimmt durch den sogenannten Purcell-Faktor F_p , manchmal auch Kooperativität genannt. Dieser quantifiziert die Wahrscheinlichkeit, dass ein von einem Einzelatom emittiertes Photon erfolgreich aufgesammelt werden kann. Es gilt:

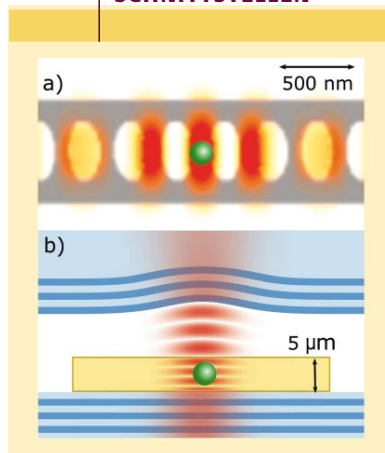
$$F_p = \xi \frac{3}{4\pi^2} \frac{Q}{V}$$

Dabei quantifiziert ξ die relative Stärke des Strahlungsübergangs zwischen den Qubit-Zuständen und V das Volumen des Lichtfelds im Resonator, gemessen in Einheiten der Wellenlänge in dessen Material. Der Gütefaktor Q ist wiederum proportional zur Zeitdauer, die das Lichtfeld im Resonator gespeichert bleibt.

Um eine effiziente Licht-Materie-Wechselwirkung, das heißt $F_p \gg 1$, herzustellen, muss man also ähnlich vorgehen, wie wenn man einen effizienten Informationsaustausch zwischen zwei Personen erreichen möchte: Man muss die beiden im selben Raum zusammenbringen – je kleiner, desto besser – und dafür sorgen, dass sie dort lange bleiben – je länger, desto besser. Wird der Raum jedoch zu eng, ist dies einem geordneten Informationsaustausch nicht förderlich. Im Quantensystem entspricht das wie bereits beschrieben einer Nähe zu Oberflächen, welche die Kohärenz der Qubits stören können.

Wenn man Qubits verwendet, die eine geringe Empfindlichkeit gegenüber elektrischen und magnetischen Störfeldern aufweisen [3], ist es dennoch möglich, nanophotonische Resonatoren zu nutzen (Abbildung 3a). Dabei verbleibt das Lichtfeld des Photons (rot) aufgrund von Totalreflexion innerhalb eines Wellenleiters (grau), der an der dicksten Stelle ungefähr 1/100 eines menschlichen Haars dünn ist. Eine periodische Modulation des Brechungsindex, die man üblicherweise durch nanostrukturierte Löcher implementiert, bildet einen Bragg-Reflektor entlang der Wellenleiterachse, sodass das Lichtfeld im Resonatormaterial gefangen bleibt und nur mit einer geringen, einstellbaren Rate in den Wellenleiter entweichen kann. Auf diese Weise werden Modenvolumina von $V \approx 1$ erreicht, was bereits bei moderatem Q einen hohen Purcell-Faktor und damit eine effiziente Licht-Materie-Wechselwirkung ermöglicht. Allerdings setzt dies voraus, dass sich die stationären Quantenbits im Material des Resonators oder zumindest in dessen evaneszentem Feld, also direkt an der Oberfläche, befinden.

ABB. 3 | LICHT-MATERIE-SCHNITTSTELLEN



Licht-Materie-Schnittstellen mit einem einzelnen Emitter (grün) im optischen Feld (rot) a) eines nanophotonischen oder b) Fabry-Perot-Resonators.

Eine Alternative, die unabhängig von den Eigenschaften der jeweiligen stationären Qubits funktioniert, ist die Verwendung von Fabry-Perot-Resonatoren hoher Güte (Abbildung 3b). Dabei wird das Lichtfeld (rot) von zwei gegenüberliegenden Spiegeln eingeschlossen, die üblicherweise als Bragg-Reflektoren ausgeführt sind (dunkelblau). Das dabei erreichte Modenvolumen ist um einen typischen Faktor von 10^3 bis 10^6 größer als in nanophotonischen Resonatoren. Entsprechend benötigt man einen höheren Gütefaktor, $Q \gtrsim 10^7$, um eine effiziente Licht-Materie-Schnittstelle zu implementieren. Dies wurde sowohl mit Atomen im Vakuum [2] als auch kürzlich in unserer Gruppe mit Erbium-Dotieratomen [13] demonstriert.

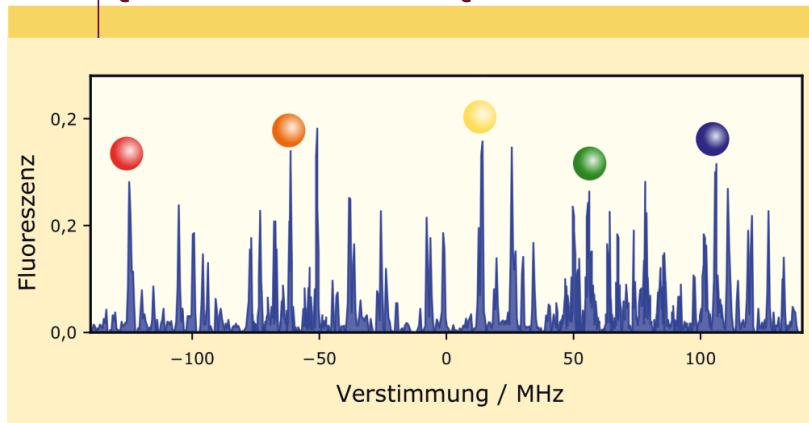
Qubit-Multiplexing

Neben effizienten Licht-Materie-Schnittstellen gibt es noch eine weitere Herausforderung bei der Realisierung von globalen Quantennetzwerken: Wenn nur einzelne Quantenbits in jedem Netzwerkknotten verfügbar sind, wird die Verschränkungsrate begrenzt durch die Zeit, die das Licht benötigt, um von einem Knotten zum anderen zu gelangen. Für Distanzen von 100 km sind das etwa 0,5 ms. In optischen Fasern treten dabei wie schon erwähnt Verluste von circa 99% auf – die erreichbare Rate beträgt deshalb bestenfalls 20 Hz. Dies ist zu wenig für praktische Anwendungen.

Man kann dies aber verbessern, indem man viele Quantenbits pro Netzwerkknotten kontrolliert – je mehr, desto besser – um entsprechend viele verschränkte Qubits gleichzeitig versenden zu können. Die einfachste, aber auch aufwendigste Möglichkeit ist es dabei, viele Resonatoren zu verwenden. Dies gelingt nur, wenn die einzelnen Resonatoren kompakt, robust und kostengünstig sind. Am besten kann man das mit nanophotonischen Strukturen erreichen, auch wenn dabei oft die erreichbare Kohärenz reduziert wird. Erste Schritte wurden diesbezüglich durch die Integration von bis zu 128 Farbzentren in optische Schaltkreise aus Aluminiumnitrid demonstriert [14].

Eine kürzlich von uns realisierte Alternative verfolgt einen anderen Ansatz. Dabei bringen wir viele Atome als stationäre Qubits in den gleichen Resonator ein. Eine räumliche Auflösung der Emitter ist dabei zwar nicht mehr möglich, was eine direkte, räumliche Adressierung und damit Kontrolle eines einzelnen Qubits verhindert. Allerdings emittieren diese Dotieratome bei leicht unterschiedlicher Frequenz, da sie mechanische Spannungen im Wirtskristall erzeugen, die sich von Ort zu Ort unterscheiden. Wir setzen dazu Erbium-Dotieratome in einer dünnen Kristallscheibe aus Yttrium-Orthosilikat (YSO) ein, der Aufbau

ABB. 4 | QUBIT-MULTIPLEXING IM FREQUENZRAUM



Jedes Erbium-Dotieratom im Kristall (farbige Kugeln) zeigt Fluoreszenz bei einer anderen, leicht verstimmt Frequenz.

entspricht im Prinzip Abbildung 3b – nur muss man sich nun mehrere Dotieratome in dem Kristall denken. Abbildung 4 zeigt das Resultat [13]. Man beobachtet nur bei bestimmten Verstimmungen der anregenden Laserpulse ein Fluoreszenzsignal – nämlich immer dann, wenn man resonant ein einzelnes Dotieratom anregt; diese Atome sind in Abbildung 4 symbolisiert durch Kugeln unterschiedlicher Farbe.

Da Erbium besonders schmalbandige Übergänge aufweist, ist es in diesem System somit möglich, mehrere hundert Dotieratome selektiv zu adressieren und ihren Quantenzustand über die individuelle Frequenz zu kontrollieren [13, 15]. Gelingt es in der Zukunft, zwischen den Qubits innerhalb desselben Resonators noch eine an- und abschaltbare Wechselwirkung zu etablieren, dann verspricht dies, Verschränkung über große Distanzen und mit hoher Rate zu erzeugen.

Wie lange wird es noch dauern?

Die Vielzahl aktuell untersuchter experimenteller Systeme zeigt, dass es bis zur Realisierung globaler Quantennetzwerke noch ein weiter Weg ist. Noch ist nicht einmal klar, welche Hardware sich am besten eignet. Durch die Implementierung effizienter Licht-Materie-Schnittstellen und gegebenenfalls effizienter Frequenzkonversion wird es jedoch bereits in wenigen Jahren möglich sein, Verschränkung über Abstände von 100 km mit akzeptabler Rate zu erreichen.

Um globale Distanzen zu überbrücken und viele Knoten miteinander zu verschränken, ist es jedoch auch erforderlich, dass alle Operationen eine geringe Wahrscheinlichkeit für Fehler aufweisen. Nur wenn die Fehlerrate nahe null liegt, wird es möglich, trotzdem auftretende Fehler effizient zu korrigieren. In allen bisher durchgeführten Experimenten, in denen Qubits über große Distanzen verschränkt wurden, war die Fehlerwahrscheinlichkeit noch viel zu groß, um dieses Ziel zu erreichen. Folglich sind in diesem Bereich weitere, grundlegende Forschungsarbeiten nötig.

Darüber hinaus wird es ein Quanteninternet erfordern, Geräte zu entwickeln, die eine exzellente Kontrolle über eine große Zahl von Quantenbits ermöglichen. Dies wird wahrscheinlich erst durch die Integration von elektronischen und photonischen Schaltkreisen zu erreichen sein, die daher in den kommenden Jahren zunehmend in den Fokus der Forschung rücken werden.

Zusammenfassung

Quantennetzwerke ermöglichen eine Vielzahl interessanter Anwendungen und sind daher Gegenstand intensiver Grundlagenforschung. Grundsätzlich benötigen sie für die Kommunikation fliegende Quantenbits, wofür sich Photonen am besten eignen. Eine freie Übertragung durch die Atmosphäre,

auch via Satellit, funktioniert zwar über große Distanzen, hängt aber zum Beispiel vom Wetter ab. Glasfasernetze bieten eine attraktive Alternative. Allerdings ermöglichen die Verluste in ihnen eine Übertragung über maximal 100 km. Die Lösung bieten Netzwerk-Knoten mit stationären Quantenbits in Form von einzelnen Atomen. Das Grundprinzip ist bereits im Labor demonstriert. Ein Beispiel sind Erbium-Dotieratome in Silizium- oder Silikatkristallen, die als stationäre Quantenbits über ihre individuelle Frequenz einzeln adressierbar sind. Der Einbau eines solchen Kristalls in einen Fabry-Perot-Resonator erhöht die Effizienz der Licht-Materie-Wechselwirkung. Bis mit solchen Netzwerkknoten ein globales Quanteninternet realisiert werden kann, sind allerdings noch große Hürden zu überwinden.

Stichwörter

Quanteninternet, Licht-Materie-Schnittstelle, Quanteninformationsverarbeitung, Quantencomputer, Quantenkommunikation.

Danksagung

Open Access Veröffentlichung ermöglicht und organisiert durch Projekt DEAL.

Literatur

- [1] S. Wehner, D. Elkouss, R. Hanson, *Science* **2018**, 362, 1.
- [2] A. Reiserer, G. Rempe, *Rev. Mod. Phys.* **2015**, 87, 1379.
- [3] M. Ruf et al., *J. Appl. Phys.* **2021**, 130, 070901.
- [4] C. Monroe, J. Kim, *Science* **2013**, 339, 1164.
- [5] B. Hensen et al., *Nature* **2015**, 526, 682.
- [6] A. Ekert, R. Renner, *Nature* **2014**, 507, 443.
- [7] C. L. Degen, F. Reinhard, P. Cappellaro, *Rev. Mod. Phys.* **2017**, 89, 035002.
- [8] P. Kómár, *Nat. Phys.* **2014**, 10, 582.
- [9] D. Gottesman, T. Jennewein, S. Croke, *Phys. Rev. Lett.* **2012**, 109, 070503.
- [10] Y.-A. Chen et al., *Nature* **2021**, 589, 214.
- [11] W. Rosenfeld et al., *Phys. Rev. Lett.* **2017**, 119, 010402.
- [12] M. Zhong et al., *Nature* **2015**, 517, 177.
- [13] A. Ulanowski, B. Merkel, A. Reiserer, *Science Advances*. **2022**, 8, eabo4538.
- [14] N. H. Wan et al., *Nature* **2020**, 583, 226.
- [15] S. Chen et al., *Science* **2020**, 370, 592.

Der Autor



Andreas Reiserer studierte Physik an der Universität Würzburg. Nach seiner Promotion am MPI für Quantenoptik in Garching wechselte er für einen zweijährigen Forschungsaufenthalt an die Universität Delft. Seit 2016 leitet er die Otto-Hahn-Gruppe Quantennetzwerke am MPI für Quantenoptik. Seit 2022 ist er Professor für Quantennetzwerke an der TU München.

Anschrift

Dr. Andreas Reiserer, Professur für Quantennetzwerke, Technische Universität München, James-Frank-Str. 1, 85748 Garching, Deutschland. andreas.reiserer@tum.de