

Gute Verbindung: Das Team um Gerhard Rempe setzt auf Glasfasern als Übertragungsweg für Quanteninformation. Die bunten Kabel am Experimentiertisch leiten Licht, die schwarzen Strom für Laser- und Messgeräte.

DIE ARCHITEKTUR DES QUANTENINTERNETS

TEXT: ROLAND WENGENMAYR

Die Attacken von Hackern dürften durch neue Techniken immer grössere Schäden anrichten. Doch zumindest die Übertragung von Daten könnte sicherer werden – durch Quantenkommunikation. Daher arbeiten Forschende weltweit an den physikalischen Grundlagen und technischen Modulen. Das Team von Gerhard Rempe am Max-Planck-Institut für Quantenoptik in Garching will noch mehr: Quantencomputer vernetzen.

Die zwei hellen Flecke auf dem Bild könnten die Zukunft des Quanteninternets symbolisieren. „Das sind zwei leuchtende Rubidiumatome, aufgenommen von einer hochauflösenden Spezialekamera“, erklärt Stephan Welte, Postdoktorand in Gerhard Rempes Abteilung am Max-Planck-Institut für Quantenoptik in Garching. Die Atome, wenige zehntel Nanometer (milliardstel Meter) winzig, schwebten während der Aufnahme im Vakuum, in einem etwa einen halben Millimeter breiten Hohlraum. Das ist ein optischer Resonanzkörper, gebildet aus zwei nahezu perfekten Spiegeln, die einander gegenüberste-

hen. Wozu das gut ist, erklärt Weltes Kollege Emanuele Distante: „Wenn man ein Photon, also ein Lichtquant, auf ein winziges Atom schickt, ist es sehr unwahrscheinlich, dass beide miteinander ‚reden!‘“ Genau dies aber müssen sie für eine funktionierende Quantenkommunikation tun. Rempes Gruppe will nämlich Quanteninformation per Photonenpost zwischen Sendern und Empfängern verschicken, die aus Atomen oder anderen Teilchen bestehen und diese Information speichern können. Bei Rempes Ansatz sollen solche Spiegelkabinette das Kommunikationshindernis beseitigen. Dazu reflektieren die zwei Spiegel ein abzuschickendes oder zu empfangendes Photon in dem Resonator vielfach hin und her, wie einen Pingpongball – „in unserem Fall ungefähr zwanzigtausendmal“, erläutert Welte: „Das ergibt eine sehr hohe Chance, dass das Photon mit dem Atom wechselwirkt.“

Diesen Spiegeltrick hat Gerhard Rempe mit seinen Forschungsteams im Lauf von zwei Jahrzehnten so perfektioniert, dass die Garchinger aus den Resonatoren nun Bausteine für zu-

künftige Quantennetzwerke entwickeln. Das Forschungsgebiet verspricht zweierlei: enorm leistungsfähige Quantencomputer und garantiert abhörsichere Kommunikation. Letzteres wäre im Alltag sofort willkommen, zum Beispiel beim Onlinebanking. Mit Quantencomputern hingegen würden wir im Alltag kaum direkt zu tun haben, indirekt jedoch könnten sie unsere Lebenswelt stark verändern. Sie könnten zum Beispiel das „Problem des Handlungsreisenden“ lösen, der zu vielen verschiedenen Zielen reisen soll und den kürzesten Weg sucht. Es gibt eine Menge derartiger Optimierungsprobleme in Wissenschaft, Technik, Wirtschaft oder Finanzwelt, an denen herkömmliche Computer scheitern.

Da Quantencomputer aufwendig zu bauen sind, wird man sie wohl weniger wie Rechenzentren konzipieren, sondern zukünftig eher als weltweite Quantencloud. Dies zumindest ist Gerhard Rempes Zukunftsvision, und diese benötigt ein Quanteninternet. Allerdings könnten Quantencomputer auch schnell Verschlüsselungen knacken, die für die Datenübertragung

69

→

verwendet werden und heute als sicher gelten. Hier liefert die Quantenphysik jedoch das Gegenmittel in Form der Quantenkryptografie: Im Quantenkanal, mit dem der geheime Schlüssel zwischen Sender und Empfänger verteilt wird, würde sich ein Lauscher unweigerlich verraten.

Entsprechend hoch ist das Interesse von Unternehmen wie Google oder IBM an Quanteninformationstechniken; bei der Entwicklung des Quantencomputers liegen sie ziemlich weit vorn. Überdies gibt es auf staatlicher Ebene vor allem zwischen China, den USA und Europa ein Wettrennen. Der US-Kongress hat 2018 den National Quantum Initiative Act gebilligt, der die vielfältigen Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten in den USA mit einem jährlich wachsenden Budget unterstützen und bündeln soll. Für 2021 sind knapp 800 Millionen US-Dollar eingeplant. Die Bundesregierung will Quantentechnologien in den kommenden Jahren mit zwei Milliarden Euro fördern und der bayerische Staat den Münchner Raum mit 300 Millionen Euro zum Munich Quantum Valley ertüchtigen. Es sollen neue Forschungsmöglichkeiten und Studiengänge sowie Start-ups in der Münchner Region entstehen.

70

Große internationale Konkurrenz

Wenn es um starke mediale Botschaften geht, ist China derzeit vorne. Chinesische Physiker haben 2017 den ersten Satelliten für Experimente zur abhörsicheren Quantenkommunikation ins All gebracht. Und auf der Erde haben sie mit 4600 Kilometern Gesamtlänge das bislang größte Glasfasernetzwerk für dieses Ziel aufgebaut. Auf die Frage, wie er die internationale Konkurrenzsituation in der Physik derzeit einschätzt, bringt Gerhard Rempe den kulturellen Hintergrund ins Spiel. „Die physikalischen Gesetze sind überall gleich, aber in den USA zum Beispiel ist man sehr pragmatisch und kreativ“, sagt er. Auch

die Grundlagenforschung in Europa sieht er konkurrenzfähig aufgestellt, mit unterschiedlichen Stärken in verschiedenen Ländern. In Deutschland gibt es sehr gute Forschungsteams, insbesondere zu Quantennetzwerken und Quantensimulatoren. Lediglich beim Bau eines frei programmierbaren, universellen Quantencomputers hinkt Deutschland hinterher – auch mangels ausreichender Förderung in der Vergangenheit. Den chinesischen Erfolg würdigt Rempe als beeindruckende Leistung in puncto Management und technischer Umsetzung. „Konzeptionell finde ich diese Arbeiten jedoch weniger spannend“, sagt er. Seiner Einschätzung nach befindet sich die chinesische Forschung manchmal noch im Kopiermodus. Zum chinesischen Glasfasernetzwerk meint er: „In den Teilabschnitten ist das etablierte Technik, die man kommerziell kaufen kann – aber das Gesamtsystem spielt schon in der Oberliga.“

Vor allem versteht Rempe unter dem Begriff Quanteninternet etwas wesentlich Radikaleres als einfache Punkt-zu-Punkt-Verbindungen, wie sie heute realisiert sind. In so einem Netzwerk sollen nicht mehr menschliche Akteure über mehr oder weniger lange Quantenkanäle kommunizieren. Menschen gehören zur Welt des Großen, in der die klassische Physik regiert und in der keine empfindliche Quanteninformation überlebt. Rempe will echte Quantensysteme miteinander über größere Distanzen kommunizieren lassen, eines Tages sogar Quantencomputer – in einer Quantencloud. „Das ist die Champions League“, sagt er. Erste Ansätze funktionieren schon in seinen Garching Labors, und alle diese Module basieren auf den Spiegelkabinetten.

Um als Laie erahnen zu können, worum es geht, muss man allerdings kurz in die Welt der Quantenphysik eintauchen. Und die ist höchst merkwürdig. Quanteninformation ist immer an ihren physikalischen Träger gebunden, zum Beispiel ein Lichtquant. Solche Photonen transportieren Quantenbits,

Sendungsverfolgung für Quantenpost: In zwei gekreuzten Resonatoren, die jeweils von zwei Glasfasern gebildet werden, fangen Max-Planck-Physiker ein Atom. Damit können sie ein photonisches Qubit nachweisen, ohne die Quanteninformation zu zerstören.



kurz Qubits, als Quantenfernpost – sei es durch die Atmosphäre ins All zu einem Satelliten oder durch eine Glasfaser zu einem Empfänger. Dabei kann man sich die im Photon codierte Information als kleinen Zeiger vorstellen, der von einem Kugelmittelpunkt auf die Kugeloberfläche weist. Nord- und Südpol dieser Kugel entsprechen 0 und 1 bei einem klassischen Bit der heutigen Computertechnik. Alle anderen Punkte entsprechen einer Überlagerung dieser beiden Zustände. Dieses Mehr an Möglichkeiten begründet die Rechen- und Speichermacht der Quanteninformation. Wichtig ist zudem, dass jegliche Messung am Photon die ursprüngliche Überlagerung aller erlaubten Zustände in einen der beiden

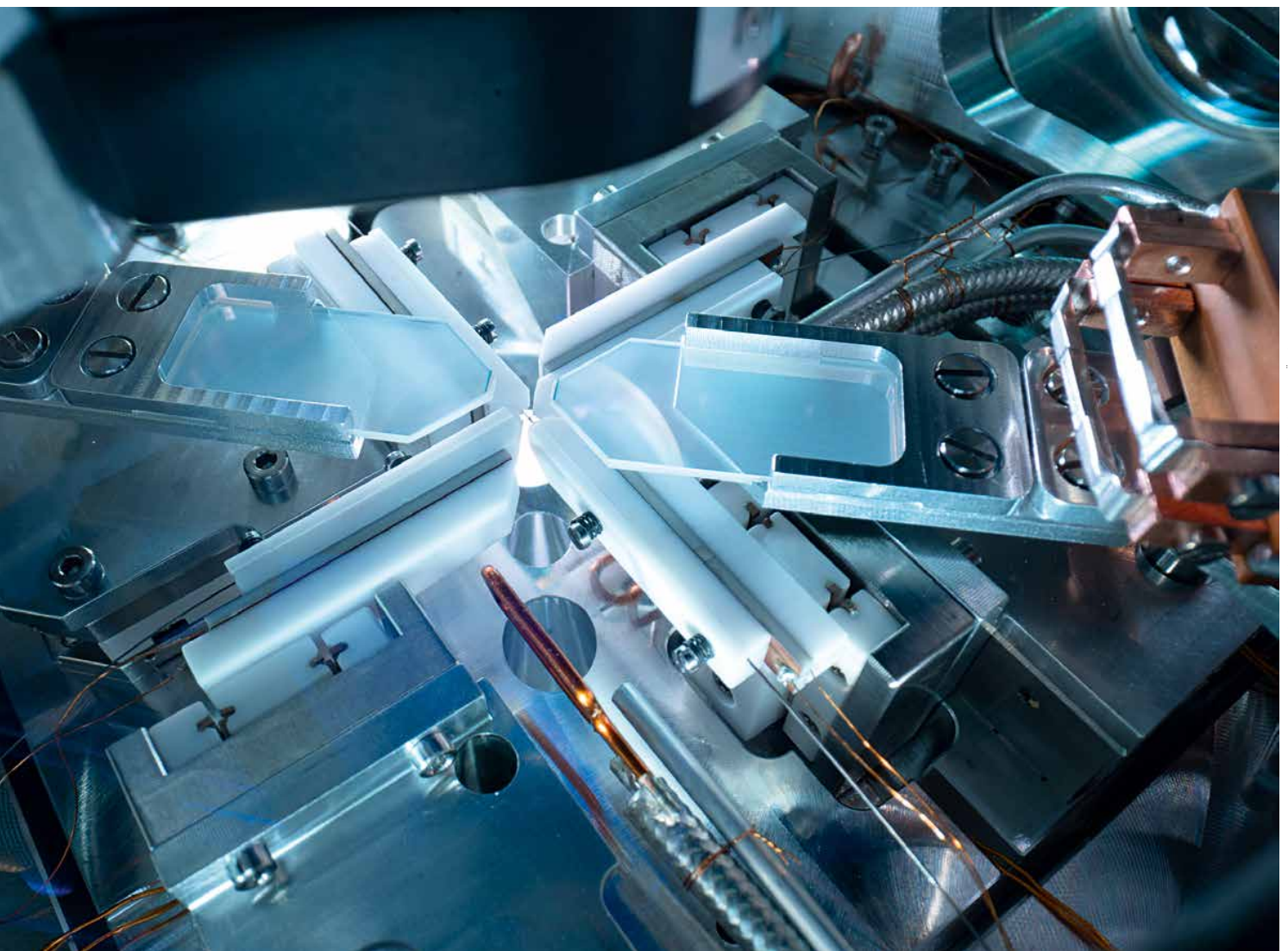


FOTO: CHRISTOPH HOHMANN (MCQST / LMU MÜNCHEN)

Zustände 0 oder 1 abbildet. Dies geschieht nach den Wahrscheinlichkeitsregeln der Quantenmechanik. Darauf ist zurückzuführen, dass jeder Versuch eines Lauschers, heimlich die Quanteninformation in einem vorbeifliegenden Photon zu lesen, unweigerlich auffliegt. Denn der Leseversuch stellt eine Messung dar, die die eingespeicherte Überlagerung als eigentliche Post zerstört. Der Lauscher kann die Quanteninformation auch nicht einfach auf ein zweites Photon kopieren, um sie dort unbemerkt zu lesen. Denn Quanteninformation ist grundsätzlich nicht kopierbar – das nennt sich No-Cloning-Theorem. Die Information ist nur übertragbar, zum Beispiel vom Photon auf ein Atom als Speichermedium. Auf dem

fundamentalen No-Cloning-Theorem beruht die Quantenkryptografie, wie sie auch in den einzelnen Streckenabschnitten des chinesischen Netzwerks eingesetzt wird. Das Problem ist der wachsende Verlust von Photonen mit zunehmender Glasfaserlänge. Aus diesem Grund müssen vertrauenswürdige Knoten zwischengeschaltet werden – im chinesischen Netz gibt es davon derzeit 32. In diesen Knoten sitzen – noch – der klassischen Physik unterworfenen Systeme, mit denen die einzelnen Quantenteilstrecken verknüpft werden. „Abhörer im Sinne der Quantenphysik ist das nicht“, erläutert Gerhard Rempe, „denn ein Lauscher könnte ja herausfinden, was an den Knotenstellen passiert.“

Mit einer anderen Eigenschaft von Quantensystemen wollen die Physiker in dieser Hinsicht weiterkommen. Es geht um die Verschränkung, die es erlaubt, weit voneinander entfernte Quantensysteme zu einem Quantenobjekt zu fusionieren. Um dafür ein Gefühl zu bekommen, stellen wir uns vor, dass eine Alice in München und ein Bob in Toronto zwei Quantenwürfel besitzen. Beide bekommen die Fleißaufgabe, tausendmal zu würfeln und die gewürfelte Zahlenfolge zu notieren. Diese Zahlenfolge wird bei beiden, für sich genommen, völlig zufällig aussehen. Doch sobald sie ihre Listen etwa per Videochat vergleichen, werden sie etwas Merkwürdiges feststellen: Immer wenn Alice eine Sechs gewürfelt hat, erzielte Bob



eine Eins – und umgekehrt. Und wenn es nicht Eins-Sechs war, dann war es Zwei-Fünf oder Drei-Vier. Der Grund: Beide Würfel waren über Tausende Kilometer hinweg miteinander verschränkt.

Albert Einstein sah diese „spukhafte Fernwirkung“, wie er es nannte, als Beweis für die Unvollständigkeit der Quantenmechanik. Doch er irrte, denn die Natur erlaubt genau das, und inzwischen sind tatsächlich Verschränkungsexperimente über viele Kilometer hinweg gelungen. Diese Verschränkung machen sich die derzeit entstehenden Quanteninformationstechniken als zentrale Ressource zunutze. Die Übertragung von Quantenschlüsseln, die Quantenkryptografie, setzt in ihrer fortgeschrittenen Form dabei wiederum auf die extreme Empfindlichkeit der Verschränkung gegen jeden äußeren Einfluss. Sobald ein Lauscher sich in den Quantenkanal einschalten will, verrät er sich über den unmittelbaren Kollaps der Verschränkung. In einem zukünftigen Quanteninternet, wie Gerhard Rempe es sich vorstellt, sollen Quantenmodule miteinander über Photonen als fliegende Qubits verschränkbar sein. Die Module übernehmen das Zwischenspeichern der Quanteninformation – in Zukunft könnten dies sogar komplette Quantencomputer sein. Bei Rempes Team bestehen diese Speichermodule aus den Atomen in den Spiegelkabinetten.

Quantenrepeater für weite Strecken

Für den Max-Planck-Direktor ist klar, dass ein zukünftiges Quanteninternet auf einem Glasfasernetz basieren wird. Die Satellitenübertragung wird schwierig, sobald es um größere Datenmengen geht, denn auch in der Atmosphäre verschwindet ein kostbares Photon gerne mal, oder der Satellit befindet sich hinterm Horizont. Um die Verluste in den Glasfasern zu kompensieren, braucht ein größeres Quantennetzwerk eine Art Zwischen-

verstärker, analog zu den Repeatern in konventionellen Glasfasernetzen. Doch diese Quantenrepeater fehlen noch, obwohl einige Gruppen weltweit seit 20 Jahren daran forschen.

AUF DEN PUNKT GEBRACHT

Das Quanteninternet könnte die Datenübertragung abhörsicher machen, selbst wenn der Quantencomputer künftig die heute gebräuchlichen Verschlüsselungen knackt. Zudem könnte es voneinander entfernte Quantencomputer zu leistungsfähigeren Einheiten zusammenschalten.

Die USA, China, aber auch Deutschland und die EU liefern sich einen Wettlauf bei der Entwicklung der Quantenkommunikation. In China wurde dafür etwa ein Glasfasernetz von 4600 Kilometern Länge aufgebaut. Dieses arbeitet aber auch noch mit klassischen und daher angreifbaren Knoten.

Gerhard Rempes Team möchte Information auch über lange Strecken rein quantenmechanisch übertragen. Die Forschenden setzen dabei auf Photonen als mobile Träger der Quanteninformation und einzelne Atome in Resonatoren als stationäre Elemente etwa als Sender oder Empfänger. Sie entwickeln unter anderem einen Quantenrepeater.

Die Schwierigkeit besteht darin, dass ein Quantenrepeater eben kein Verstärker sein darf. Ein herkömmlicher Repeater empfängt im Prinzip das abgeschwächte Laserlicht und prägt das transportierte Signal auf stärkeres Laserlicht zum Weiterschicken auf. Das wäre ein in der Quantenphysik verbotener Kopiervorgang: Die Quantenpost würde vorzeitig geöffnet und wertlos. Folglich muss der Quantenrepeater in der Lage sein,

den hochempfindlichen verschränkten Zustand von Alice bis zum weit entfernten Bob durchzuschalten, ohne ihn zu lesen. Präziser gesagt, wird ein Quantenzustand über eine von Alice zu Bob durchgeschaltete Verschränkung gesendet. Quantenteleportation heißt dieser Prozess, wobei dieser von *Star Trek* inspirierte Name häufig zu Missverständnissen führt: Anders als in der Science-Fiction-Serie lässt sich so keine Materie, also auch kein Mr. Spock in voller Lebensgröße, durch die Welt beamen. Das funktioniert nur mit nichtmateriellen Quantenzuständen, also Quanteninformation.

Tatsächlich ist Gerhard Rempes Team im Labor jüngst das bisher erfolgreichste Quantenrepeater-Experiment weltweit gelungen. Als Repeater wirkt ein Spiegelmodul, in dem sich zwei Atome befinden. Dieses Ensemble sitzt in der Glasfaserstrecke zwischen Alice als Sender und Bob als Empfänger. Dazu schickt eines der beiden Atome im Spiegelmodul wiederholt ein mit dem Atom verschränktes Photon an Alice, und zwar so lange, bis eins ankommt. Parallel dazu und unabhängig davon baut das andere Atom eine Verbindung mit Bob auf. Sobald auch diese steht, werden beide Atome im Spiegelmodul einer „magischen Messung“, so Rempe, unterworfen. Diese überträgt die Verschränkung auf den beiden Teilstrecken auf eine zwischen Alice und Bob durchgeschaltete Verschränkung.

Da an den beiden Teilstrecken vor diesem letzten Schritt parallel gearbeitet wird, erhöht sich von einer gewissen Streckenlänge an die Übertragungsraten im Vergleich zur einfachen Verbindung ohne Repeater. Diese Streckenlänge hat das Experiment bislang noch nicht erreicht. Derzeit entspricht die Fernverbindung im Labor zwei Kilometern Glasfaserstrecke. Die Messergebnisse zeigen bereits, dass der Garching-Quantenrepeater ab sieben Kilometern der Übertragung von Photonen ohne Repeater überlegen wäre. Allerdings ist der Weg bis zu diesem Durchbruch noch

steinig. Einfaches Verlängern reiche nicht, erklärt Gerhard Rempe, dazu müssten die Garchingler vorab noch einige Probleme lösen, insbesondere müssten sie Verluste bei der magischen Messung verringern. In einem Quantenglasfasernetz müsste dann alle paar Kilometer ein Quantenrepeater sitzen.

Ein anderes wichtiges Werkzeug, das die Garchingler entwickelt haben, übernimmt die Aufgabe eines Herolds. Dieser Herold gibt ein Erfolgssignal, wenn in einem Netzwerk mit Quantenrepeatern auf den einzelnen Streckenabschnitten die Verschränkung steht, bevor sie mit der letzten magischen Messung durchgeschaltet wird. Die Herausforderung: Der Herold darf dabei selbst keine echte Messung durchführen. Bildlich gesprochen, muss er nur durch Lauschen, ohne die Tür zu öffnen, herausfinden, ob jemand in einem Zimmer ist. Zur Realisierung eines Herolds hat sich das

Garchingler Team ein pfiffiges Arrangement aus zwei gekreuzten Resonatoren ausgedacht. Der Hauptresonator in Richtung der eigentlichen Nachrichtenleitung dient als Netzwerknoten mit Speicherfunktion. Der dazu senkrechte Nebenresonator checkt als Herold vorsichtig, ob das Atom in dem Resonator das ankommende Qubit gespeichert hat.

Netz aus Quantenprozessoren

Die Garchingler können mit ihrer Herold-Technik zudem prüfen, ob ein Photon bis zur Position der gekreuzten Resonatoren in einer Glasfaser durchgekommen ist. Das ist wichtig, um so früh wie möglich herauszufinden, ob die Quantenpost unterwegs verloren gegangen ist. Auch hier besteht die Kunst darin, das Photon gewissermaßen zu erspüren, ohne

es direkt zu messen. Denn das würde die im Photon abgespeicherte Information zerstören. Solche Herolde gehören zum Werkzeugkasten, mit dessen Hilfe dann auch mehrere Quantencomputer über ein Quantennetzwerk zusammenschaltbar wären. Denn mit über das Quantennetzwerk verteilten Herolden lässt sich sehr schnell erkennen, ob ein Photon noch vorhanden oder bereits verloren gegangen ist, sodass gegebenenfalls ein neuer Übertragungsversuch gestartet werden kann.

Ein wichtiger Schritt auf dem Weg zu einem Quantennetzwerk gelang Gerhard Rempes Team kürzlich mit einem Experiment, bei dem Alice und Bob bereits zwei Quantenprozessoren waren. Bei diesem Experiment waren zwei 60 Meter voneinander entfernte Module, die aus Atomen in Spiegelresonatoren bestanden, über eine Glasfaser miteinander verbunden. Über ein einzelnes durch diese Faser

→

73

Philip Thomas, Olivier Morin, Gerhard Rempe und Leonardo Ruscio (von links) haben sich um den Tisch versammelt, der die Vakuumkammer für Experimente mit einzelnen Atomen trägt. Auf dem Tisch links sind die dafür nötigen Laser aufgebaut.

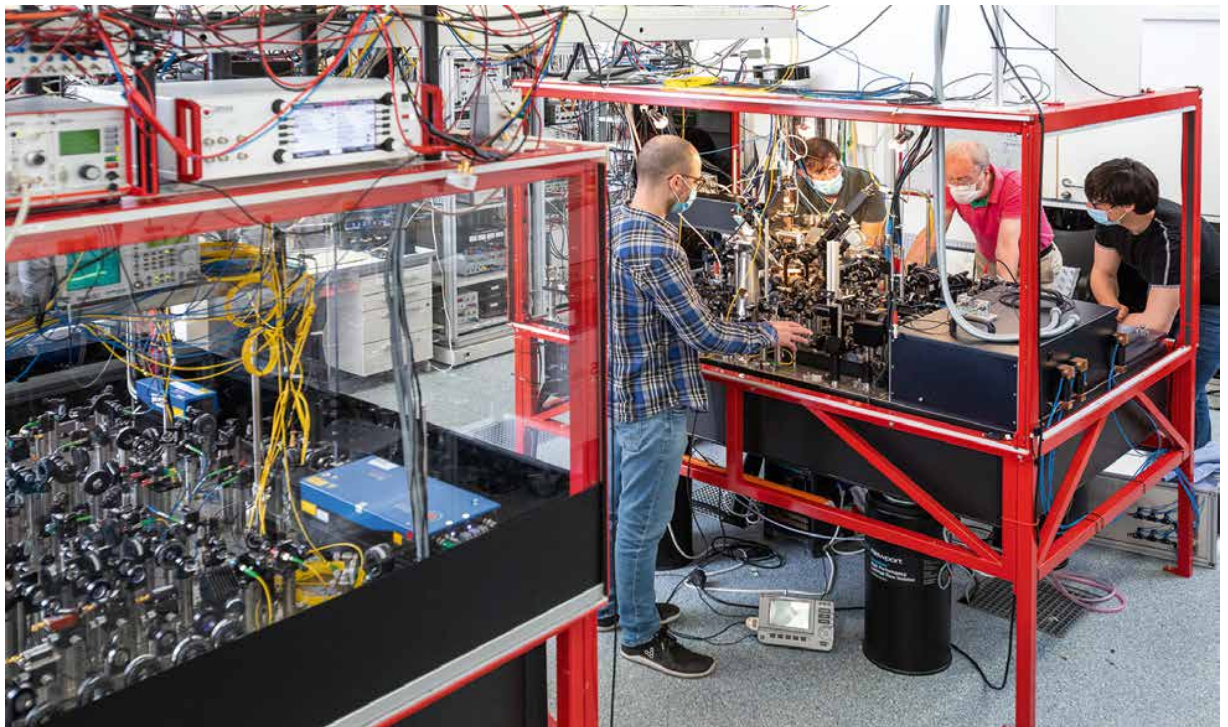
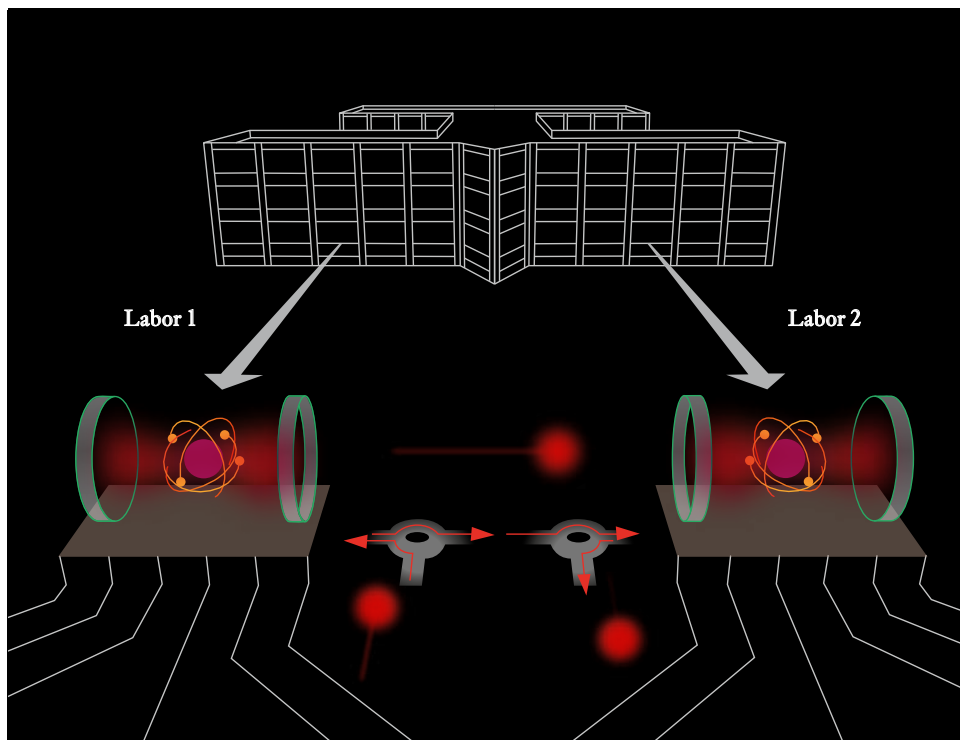


FOTO: AXEL GRIESCH



Verteiltes Rechnen: Zwei Atome zwischen Spiegelpaaren, die sich in verschiedenen Laboren befinden, führen gemeinsam eine Quantenrechnung aus. Als Vermittler dient ein Photon anstelle des elektrischen Signals im herkömmlichen Computer.

74

stück, die beiden Atome in den Modulen zu einem quantenlogischen Gatter mit einem Herold zu verschalten. Das Quantengatter kann man sich als Analogon zu den Logikgattern der herkömmlichen Elektronik vorstellen, allerdings mit Glasfasern für Photonen anstelle elektronischer Leiterbahnen. Solche verteilten Quantenprozessoren könnten ein Kernproblem von Quantencomputern überwinden, in denen die Qubits dicht beieinandersitzen und sich deshalb auch auf unerwünschte Weise gegenseitig stören können. Das würde ein Quantennetzwerk mit verteilten Prozessoren verhindern. Zudem sind lokale Quantennetzwerke mit einer solchen Funktion innerhalb von Gebäuden zunächst viel leichter zu realisieren als etwa ein globales Quanteninternet und wären damit ein erstes Anwendungsgebiet.

Vor Kurzem gelang den Garchinger Physikerinnen und Physikern mit zwei Atomen im Spiegelkabinett auch ein erster sogenannter wahlfreier Arbeitsspeicher für Quanteninformation. Bei herkömmlichen Computern kennt man dies als Random Access Memory. Ein solcher Speicher erlaubt

einen freien Zugriff auf jede Speicherzelle, und bei Gerhard Rempes Team sind diese Zellen jeweils die beiden Atome.

So entwickeln die Forschenden Stück für Stück Module der Quantenkommunikation. Da verwundert Gerhard Rempes Zuversicht nicht: Er glaubt, dass wir in diesem Jahrhundert die Etablierung einer echten Quantentechnik erleben werden. Seinen Optimismus begründet der Wissenschaftler auch mit der Geschichte: Große Entdeckungen der Physik wie zum Beispiel Optik und Mechanik, Thermodynamik, Elektrodynamik und Quantenphysik hätten sich immer im darauffolgenden Jahrhundert als Wirtschaftsmotoren erwiesen. Ihnen haben wir zahlreiche technische Durchbrüche vom Handel über die Massenproduktion bis zur Automatisierung zu verdanken.

„Vor dem Hintergrund, dass uns die Quantenphysik mit Transistoren und Lasern schon viele großartige Durchbrüche gebracht hat, stelle ich mir vor, dass das 21. Jahrhundert das Jahrhundert der Quanteninformation werden wird.“



GLOSSAR

QUANTENINFORMATION nutzt als kleinste Einheit ein Qubit, das nicht nur 0 oder 1 codieren kann, sondern auch Zustände dazwischen. Das soll Quantencomputer viel leistungsfähiger machen als herkömmliche Rechner. Die Gesetze der Quantenphysik verbieten es zudem, Quanteninformation zu kopieren. So können sie Kommunikation abhörsicher machen.

QUANTENREPEATER sollen die Übertragung der fragilen Quanteninformation über weite Strecken ermöglichen und nutzen dafür die Verschränkung.

VERSCHRÄNKUNG macht aus mehreren, auch räumlich getrennten Quantensystemen wie etwa Photonen und Atomen in Resonatoren ein einziges ausgedehntes Quantensystem.

Sie müssen auf Englisch schreiben oder vortragen? Sie fragen sich, wie deutsche Wendungen, z.B. „aus Platzgründen muss ... ausgeklammert werden“ oder „... sei zunächst angemerkt, dass ...“ korrekt und geschliffen ins Englische übertragen werden? Oder Sie suchen nach Formulierungsalternativen?

Das „**Wörterbuch der allgemeinen Wissenschaftssprache / Wörter, Wendungen und Mustertexte**“ von Dirk Siepmann bietet Ihnen in komprimierter Form zahlreiche griffige und direkt umsetzbare Beispiele.



Gebundene Ausgabe, 352 Seiten, 34,90 Euro (D) inkl. Porto, für DHV-Mitglieder zum Sonderpreis von 29,90 Euro inkl. Porto. **Zu bestellen über:** Deutscher Hochschulverband, Rheinallee 18-20, 53173 Bonn, Tel. 0228 9026666, Fax 0228 9026680 oder per Mail: dhv@hochschulverband.de

Dirk Siepmann ist Professor für Fachdidaktik des Englischen an der Universität Osnabrück. Er verfügt über eine jahrzehntelange Erfahrung in Fremdsprachendidaktik, Übersetzungswissenschaft und Lexikographie.

**DEUTSCHER
HOCHSCHUL
VERBAND**