

Das Bild zeigt einen Teil des Interferometers von „Jiuzhang 2.0“, dem neuen Prototyp eines photonischen Quantencomputers.

Jian-Wei Pan

QUANTENCOMPUTING

Die leuchtende Zukunft optischer Quantencomputer

Photonen sind eine vielversprechende Möglichkeit, um Qubits zu realisieren.

Emma Lomonte, Carsten Schuck und Wolfram Pernice

Photonen besitzen herausragende Kohärenzeigenschaften und breiten sich mit Lichtgeschwindigkeit aus. Damit eignen sie sich prinzipiell gut zur Realisierung eines Quantencomputers. Doch die geringe gegenseitige Wechselwirkung schränkt die Berechnungsmöglichkeiten ein. Inzwischen gibt es aber erste vielversprechende photonische Quantenprozessoren.

Die Idee des Quantencomputings geht auf Richard Feynman zurück, der im Mai 1981 einen Computer ganz anderer Art vorschlug. Sein Argument war einfach: Es ist schwierig, Vielkörper-Quantenprobleme mit klassischen Rechenverfahren zu lösen, weil die Rechenzeit exponentiell mit der Systemgröße steigt. Stattdessen hielt er die Entwicklung eines Quantencomputers für die natürliche Wahl, nicht ohne bei vielen Kollegen, die mit dem Konzept von Dekohärenz und der Empfindlichkeit von Quantenzuständen vertraut waren, Skepsis hervorzurufen. Die Idee gewann erst an Popularität, als der britische Physiker David

Deutsch erkannte, dass Quantencomputer auch klassische Probleme potenziell viel schneller lösen könnten als herkömmliche Rechner.

Parallele Entwicklungen zu Frequenzstandards und Spektroskopie führten zu technologischem Fortschritt bei Ionenfallen [1]. Diese lieferten den Startschuss für die experimentelle Realisierung von Quantencomputern. Seit Ende des 20. Jahrhunderts gibt es viele unterschiedliche Ansätze, um einen vollwertigen Quantencomputer zu realisieren. Neben Ionenfallen sind insbesondere supraleitende elektrische Schaltkreise vielversprechend.

Photonen spielten zunächst eine untergeordnete Rolle, obwohl sie sich mit Lichtgeschwindigkeit ausbreiten und dank ihrer fehlenden Wechselwirkung mit der Umgebung eine sehr lange Kohärenzzeit besitzen. So bleibt photonische Quanteninformation 11,5 Milliarden Jahre gegenüber thermischer Dekohärenz stabil [2]. Doch die geringe gegenseitige Wechselwirkung beschränkt die Berechnungsmöglichkeiten drastisch. Bekannte Materialien besitzen so

geringe optische Nichtlinearitäten, dass deterministische Quantenversionen des klassischen XOR-Gatters, als grundlegender Baustein der Informationsverarbeitung, unpraktisch werden. Erforderlich für universelle Quantenlogik sind Zwei-Qubit-Gatter, die nicht-klassische Korrelationen (Verschränkung) erzeugen können. Dies gelingt mit dem kontrollierten NOT-Gatter (CNOT), das den Bit-Wert eines Ziel-Qubits abhängig vom Bit-Wert eines Kontroll-Qubits invertiert. Zusammen mit elementaren Ein-Qubit-Rotationsoperatoren bildet das CNOT-Gatter eine universelle Gatterklasse, aus der sich jede andere Quantenlogik-Operation erzeugen lässt. Für die deterministische Implementierung eines CNOT-Gatters waren jedoch zunächst Nichtlinearitäten auf Einzelphotonenebene erforderlich.

Zwei Varianten der Implementierung

Licht als Medium für die skalierbare Quanteninformationsverarbeitung erregte erst 2001 Aufmerksamkeit, als zwei unabhängige Arbeiten zeigten, dass der Bau eines fehlertoleranten universellen photonischen Quantencomputers auch ohne optische Nichtlinearitäten auf Einzelphotonen-Ebene möglich ist. Zum Einsatz kommen hier Einzelphotonenquellen, lineare optische Elemente wie Strahlteiler und Phasenschieber sowie Einzelphotonendetektoren. Bei der Informationsverarbeitung mit Qubits gibt es zwei Hauptaufgaben: die Vorbereitung des anfänglichen Quantenzustands und die Implementierung einer logischen Schaltung, die diesen Zustand durch Anwendung von Quantengattern verarbeitet, die auf einzelne oder mehrere Qubits wirken.

In der ersten Variante – dem Schaltkreismodell der Quantenberechnung [3]– ist die Vorbereitung des Zustands „einfach“, da sie nur aus der Erzeugung unkorrelierter Eingangs-Qubits besteht, d. h. einzelnen Photonen. Die Realisierung der logischen Schaltung ist „schwierig“. Hilfsphotonen, sog. Ancillas, helfen hier, ein CNOT-Gatter probabilistisch zu implementieren. Ein solches Schema nutzt nichtklassische Interferenz, um eine Phasenverschiebung zu erzeugen, die das Zielqubit logisch invertiert. Die Phasenverschiebung ist bezogen auf die Photonenzahl nichtlinear und hängt davon ab, in welchen optischen Moden die Photonen am Ausgang des Interferometers gemessen wurden. Dieses probabilistische CNOT-Gatter wird so oft wiederholt, bis es erfolgreich funktioniert hat. Das Ergebnis eines erfolgreichen Gatters lässt sich mithilfe geeigneter Bell-Messungen auf die logischen Qubits teleportieren. Durch viele verkettete Schritte und Ancilla-Photonen wandeln sich probabilistische Gatter in deterministische um.

Bei der zweiten Variante – dem messungsbasierten bzw. One-way-Quantencomputing [4] – ist die Zustandsvorbereitung „schwierig“ und die logische Schaltung „einfach“. In diesem Fall ist der Ausgangszustand ein Cluster-Zustand, also ein stark verschränkter Multiphotonen-Zustand, der durch Iteration nicht-deterministischer Wechselwirkungen entsteht. Diese erzeugen die gewünschte Verschränkung zwischen benachbarten Qubits, die den Cluster bilden. Die Berechnung erfolgt durch deterministische Ein-Qubit-Operationen und -Messungen, wobei das Messergebnis die Grundlage für die Messung am nächsten Qubit

bildet. Damit kann die Berechnung bereits beginnen, während der Clusterzustand noch wächst. Im Idealfall kann die Berechnung zeitlich unbegrenzt fortlaufen, wenn immer mehr Lichtquantenzustände vorbereitet und dem Cluster kontinuierlich hinzugefügt werden.

Zu Beginn des 21. Jahrhunderts waren Photonen die einzige Art von Qubit, die bei Raumtemperatur und nahezu rauschfrei funktioniert und einen außergewöhnlich hohen Kohärenzgrad aufweist. Photonen lassen sich zudem mit Lichtgeschwindigkeit über makroskopische Distanzen verteilen. Viele Forschungseinrichtungen und Unternehmen machen sich daher diese Eigenschaften für das Quantencomputing zunutze. Herausforderungen bestehen insbesondere in der Skalierung, also der Implementierung von Systemen mit vielen Freiheitsgraden, aber auch in der Optimierung der Bausteine photonischer Quantenrechner.

Ein solcher Quantenrechner könnte, unabhängig davon, ob er auf einem Ansatz mit diskreten Variablen (DV) wie im Schaltkreismodell oder kontinuierlichen Variablen (CV) wie im One-way-Quantencomputing basiert, einen enormen Gewinn an Geschwindigkeit und Rechenleistung für bestimmte Algorithmen aufweisen. Beim DV-Quantencomputing ist der Informationsträger das Qubit, und die Information wird in einem von mehreren verfügbaren Freiheitsgraden kodiert, etwa der Polarisation, der Zeit oder dem Pfad, wobei nur eine Reihe endlicher und diskreter Eigenzustände verfügbar ist.

Festkörper-Einzelphotonen-Emitter und messverkündete (heralded) Photonquellen auf Basis nichtlinearer optischer Prozesse sind heute etabliert, um hochreine und ununterscheidbare Photonen zu erzeugen. Die Einzelphotonenerzeugung durch Messung eines Photons aus einem gemeinsamen Paar erfolgt zufällig und nur selten aufgrund der geringen optischen Nichtlinearität. Der Heralding-Schritt besteht in der probabilistischen Messung eines der Photonen des Paares, wodurch sich auf die Anwesenheit des zweiten Photons schließen lässt. Dadurch dient das erste Photon als Herold für das zweite.

Supraleitende Nanodraht-Einzelphotonen-Detektoren (SNSPD) sind derzeit die Technologie der Wahl, um Photonen hocheffizient, rauscharm und mit hoher zeitlicher Präzision nachzuweisen. Im Gegensatz dazu ist beim CV-Quantencomputing der verfügbare Hilbert-Raum unendlich, und die Information ist in den Quadraturen des quantisierten elektromagnetischen Feldes kodiert. Nichtklassische Zustände des Lichts liegen in Form gequetschter Zustände vor – oder in exotischeren Versionen davon wie den robusteren Gottesman-Kitaev-Preskill-Zuständen.

Solche rauscharmen Quantenzustände des Lichts sind attraktive Informationsträger. Ihre elektrischen Feldstärken besitzen für einige spezifische Phasen eine Quantenunsicherheit, die sogar kleiner als die des Vakuumzustands sein kann. Die Bausteine eines CV-Quantencomputers sind die Eingangs-Quantenmoden oder Qumoden (gequetschte Lichtzustände, die durch optische Wechselwirkungen in nichtlinearen Materialien entstehen), homodyne Detektoren und Photonenzahl-auflösende Detektoren (PNR), um die nicht-Gaußschen Eigenschaften einzelner Photonen zu erfassen, die durch gequetschtes Licht ersetzt sind.

Auf dem Weg zur Realisierung

Obwohl das Ziel fehlertoleranten photonischen Quantencomputings noch nicht erreicht ist, bestätigen zahlreiche Experimente, dass die Photonik den Weg in die Ära der rauschbehafteten Quantencomputer mittlerer Skalierung (NISQ) weisen kann – und möglicherweise darüber hinaus. NISQ impliziert, dass der Quantenrechner signifikante Fehlerraten aufweist und nur über eine begrenzte Anzahl von Qubits verfügt. Mehrere Experimente zeigten unter Verwendung von Photonen einen Quantenvorteil bei bestimmten Algorithmen wie dem Gaußschen Bosonen-Sampling (GBS). Dieses Berechnungsprotokoll hängt nicht von der Systemgröße ab und ist mit klassischen Computern nicht effizient lösbar [5]. Dabei waren die Quantencomputer etablierten Algorithmen auf den schnellsten verfügbaren klassischen Supercomputern der Welt überlegen, allerdings bei einer speziellen, eng definierten Aufgabe.

2021 realisierte das Team von Jian-Wei Pan an der University of Science and Technology of China das System Jiuzhang 2.0, das beim GBS etwa 10^{24} schneller war als moderne Supercomputer [6]. Das System basiert auf einem verlustarmen und phasenstabilisierten 144-Moden-Interferometer mit vollständiger Konnektivität und Zufallsmatrix. 50 ununterscheidbare gequetschte Einzelmodenzustände dienen als Eingangszustände und 144 Einzelphotonendetektoren erfassen das hochgradig Pfad-verschränkte Licht (**Abb. 1**). Diese beeindruckende Performance war jedoch weder skalierbar noch programmierbar, d. h. nach dem Aufbau ließ sich die Struktur des Rechners nicht mehr ändern.

2022 demonstrierte das kanadische Unternehmen Xanadu mit einem programmierbaren System ebenfalls einen Quantenvorteil bei Berechnungen mit Licht [7]. Der Rechner besteht aus einer geschickten Anordnung von durchstimmbaren Strahlteilern, rekonfigurierbaren Phasenschiebern, stabilisierten Faserverzögerungsleitungen,

die als „Pufferspeicher“ für Lichtzustände fungieren, und einem Multiplexing-Schema, mit dem sich die 16 verwendeten PNR-Detektoren einzeln auswählen lassen. Damit ist das in der Cloud installierte, faseroptische System Borealis mit 216 gequetschten Eingangszuständen der größte jemals gebaute photonische Quantencomputer und der erste öffentlich zugängliche.

Indem sehr helle Laserpulse durch einen speziellen nichtlinearen Kristall in einen optischen Resonator und dann in ein Interferometer gelangen, das aus drei verketteten und dynamisch programmierbaren Interferometerschleifen besteht, entstehen gequetschte Lichtzustände. Wenn ein Puls am Strahlteiler-Gate der schleifenbasierten Interferometer ankommt, kann das Gatter ihn entweder in der optischen Faser speichern, den Puls aus der Schleife entnehmen (oder analog dazu aus dem Speicher abrufen) oder ein Verschränkungs-Gatter zwischen dem Puls und dem nächsten ankommenden Puls durchführen. Die Länge dieser Faserschleifen ist so gewählt, dass Verschränkung zwischen Qubits auftritt, die zu unterschiedlichen Zeiten emittiert werden. Somit entsteht ein zeitlich gemultiplexer 3D-Cluster-Zustand, der mit einer rein räumlichen Architektur nur schwer zu erzeugen wäre.

Die Detektionsereignisse von Borealis erfordern als einziges Teil des Systems eine kryogene Arbeitstemperatur. Im Gegensatz zu SNSPDs, die Zählraten im GHz-Bereich bieten, zeichnen sich die hier verwendeten „Transition Edge Detectors“ durch eine hohe Photonenauflösung, aber eher geringe Geschwindigkeit aus. Mit einem 1×16 -Demultiplexer gelang es dem Xanadu-Team, die Taktrate gegenüber einem einzelnen Detektorkanal um den Faktor 16 zu erhöhen. Auch dieser Demonstrator zeigte seinen Quantenvorteil anhand des Gaußschen Bosonen-Samplings. Der leistungsstärkste Supercomputer der Welt würde im Durchschnitt 9000 Jahre für ein einziges Ergebnis benötigen, Borealis nur 36 Mikrosekunden.

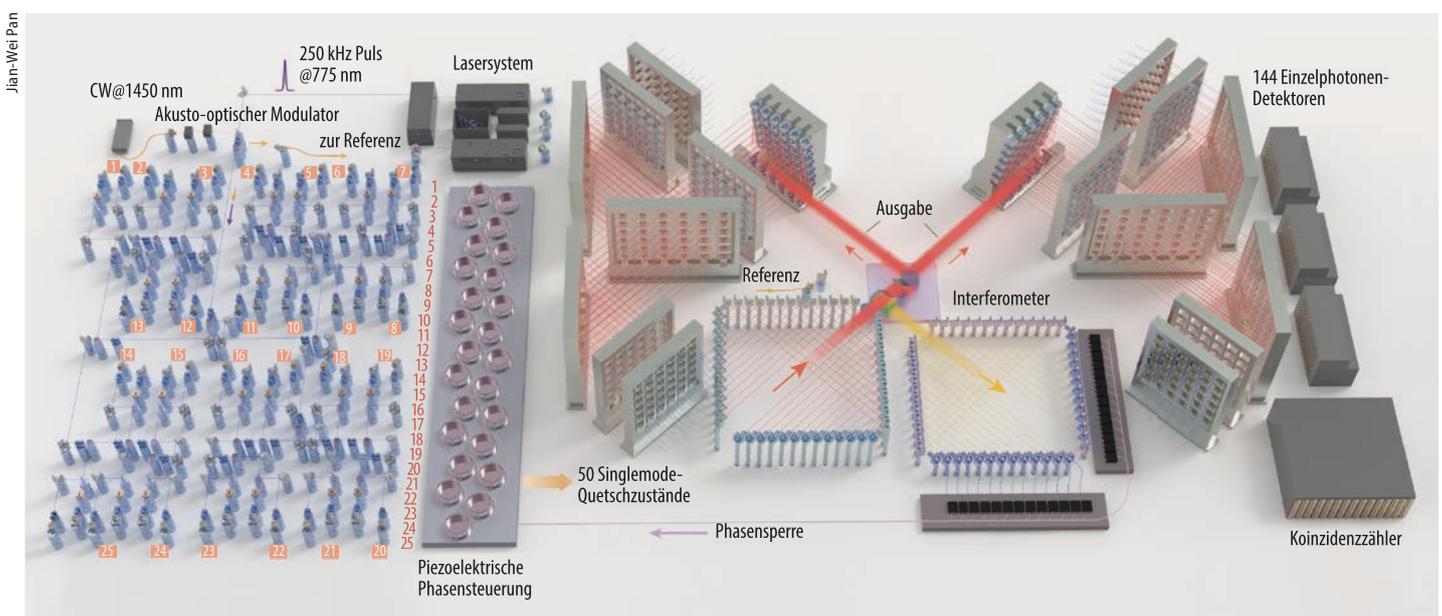


Abb. 1 Im Freistrahl-optischen Quantencomputer „Jiuzhang“ erfolgt die Erzeugung des Eingangszustands (linke Seite) durch optische nichtlineare Elemente. Die Berechnung geschieht interferometrisch in der Mitte, während das Rechenergebnis rechts durch Einzelphotonendetektion ermittelt wird.

Beide Demonstratoren beruhen jedoch auf sperrigen Komponenten, die ganze optische Tische belegen. Optische Quantencomputer werden vermutlich erst vollständig skalierbar und kommerziell attraktiv sein, wenn sie die durch integrierte Photonik mögliche Miniaturisierung nutzen [8]. Dies würde es erlauben, hunderte oder gar tausende von Komponenten auf einem photonischen Chip zu integrieren, der kleiner als eine Fingerspitze ist. Optische Strahlen können sich in verlustarmen rekonfigurierbaren optischen Schaltkreisen ausbreiten, die aus Wellenleitern im Mikrometerbereich mit Biegeradien von nur einigen zehn Mikrometern bestehen. Zudem bietet die integrierte Photonik Phasenstabilität, eine bessere Effizienz nichtlinearer Prozesse zur Erzeugung und Modulation nichtklassischer Lichtzustände und eine verbesserte Genauigkeit von Quantenoperationen.

Fortschrittliche Beispiele

Unter den vielen Realisierungen stechen zwei Beispiele hervor: Die niederländische Firma Quix Quantum vertreibt erste kommerzielle Quantenprozessoren. Darin ermöglicht ein voll programmierbares universelles 20-Moden-Interferometer in einem kompakten Gehäuse beliebige und benutzerdefinierte Quanteninterferenz zwischen verschiedenen quantenoptischen Feldern (Abb. 2). Die Gruppe von A. Laing an der Universität Bristol hat einen Quantensimulator implementiert und gezeigt, dass sich der photonische Chip wie ein programmierbares Molekül verhält [9]. Dazu nutzten die Forschenden die natürliche Korrespondenz zwischen Schwingungen in Molekülen und Photonen in Wellenleitern aus, die durch ihre gleiche bosonische Natur begründet ist. Mit diesem Quantensimulator gelang es, quantendynamische Eigenschaften von Molekülen wie H_2CS und H_2O zu simulieren.

Für diese Demonstrationen kamen ausgereifte Nanofabrikationsverfahren für hochwertige photonische integrierte Bauelemente zum Einsatz. CMOS-Foundries weltweit bieten heute verschiedene photonische Plattformen an – von der etablierten Silicon-On-Insulator-Plattform und dem extrem verlustarmen Siliziumnitrid bis zu anspruchsvolleren Plattformen mit geeigneter Nichtlinearität wie Lithiumniobat, die für die Umsetzung der schnellen reinphasigen Modulation von Licht erforderlich sind.

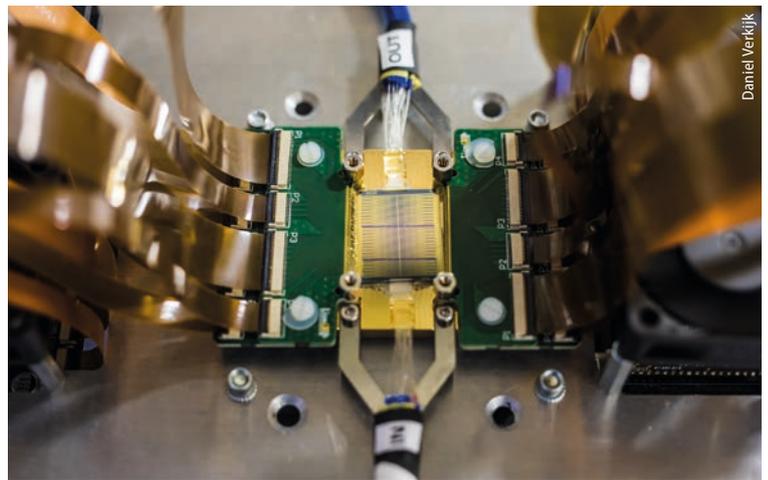


Abb. 2 Photonischer 20-Moden-Quantenprozessor von Quix Quantum

Damit ein optischer Quantencomputer sein volles Potenzial entfalten und nützliche Anwendungen in der Praxis finden kann, müssen die Qualität der Einzelphotonenquellen und die Effizienz der Detektoren besser werden. Zudem gilt es, den Photonenverlust zu minimieren, um Interferometer-Anordnungen mit mehr Komponenten zu realisieren und die Rechensysteme zu vergrößern.

Auch wenn noch ein langer Weg vor uns liegt, tragen die derzeitige rasante Entwicklung im Technologiesektor sowie die lebhaftere NISQ-Ära dazu bei, effizientere Hardware zu bauen, die Performance der Kontrollsysteme der Quantenrechner zu steigern und die Quanteninformation durch raffiniertere Quanten-Fehlerkorrekturcodes besser gegen Rauschen zu schützen.

Literatur

- [1] M. G. Raizen et al., Phys. Rev. A **45**, 6493 (1992)
- [2] T. Rudolph, APL Photonics **2**, 030901 (2017)
- [3] E. Knill et al., Nature **409**, 46 (2001)
- [4] R. Raussendorf et al., Phys. Rev. Lett. **86**, 5188 (2001)
- [5] S. Aaronson et al., Theory of Computing **9**, 143(2013); C. S. Hamilton et al., Phys. Rev. Lett. **119**, 170501 (2017)
- [6] H.-S. Zhong et al., Phys. Rev. Lett. **127**, 180502 (2021)
- [7] L. S. Madsen et al., Nature **606**, 75 (2022)
- [8] G. Moody et al., J. Phys. Photonics **4**, 012501 (2022)
- [9] C. Sparrow et al., Nature **557**, 660 (2018)

Die Autor:innen



Emma Lomonte promovierte dieses Jahr an der WWU Münster und ist seit Mai 2023 als Photonics Engineer bei Xanadu in Ontario, Kanada, tätig.

Carsten Schuck (FV Quantenoptik und Photonik) promovierte an der Polytechnic



wie Halbleiterphysik) promovierte an der University of Oxford und war danach als

University of Catalonia Barcelona in Spanien und ist seit 2016 Juniorprofessor an der WWU Münster.

Wolfram Pernice (FV Quantenoptik und Photonik so-



Physik der U Heidelberg berufen.

Postdoc an der Yale University und am Karlsruher Institut für Technologie tätig. Nach einer Professur an der WWU Münster wurde er 2021 an das Kirchhoff-Institut für

Emma Lomonte und Prof. Dr. Carsten Schuck, Universität Münster, Physikalisches Institut, Heisenbergstraße 11, 48149 Münster, Prof. Dr. Wolfram Pernice, Kirchhoff-Institut für Physik, Im Neuenheimer Feld 227, 69120 Heidelberg