Presseinformation

Volle Kontrolle über 2.000 schwebende Rydberg-Atome

Für einen Quantencomputer, der aktuell am 5. Physikalischen Institut der Universität Stuttgart entsteht, hat das Fraunhofer ILT in Aachen ein höchst komplexes laseroptisches System entwickelt. Damit lassen sich 2.000 Rydberg-Atome sub-µm-genau in der sehr kompakten Vakuumkammer des Rechners positionieren. Dafür projiziert das System ein Array aus 2.000 jeweils einzeln ansteuerbaren Laserstrahlen in die Kammer. Sie dienen als optische Pinzetten und halten die schwebenden Rydberg-Atome präzise in dem Abstand zueinander, in dem sie miteinander wechselwirken. Auf diesen Wechselwirkungen basieren die quantenlogischen Prozesse des Rechners.

Die Aufgabenstellung hatte es in sich: Gefragt war ein System, das 2.000 schwebende Strontium-Atome jeweils mit optischen Pinzetten ansteuern und sie auf weniger als 100 Nanometer (nm) genau in der Vakuumkammer eines Rydberg-Quantencomputers positionieren kann. Die Vakuumkammer ist die Prozessoreinheit des Rechners, in der jeweils zwei benachbarte Atome durch Laser-Anregung in einen Zustand gebracht werden, in dem sie miteinander wechselwirken. Die Wechselwirkungen sind kontrollier- und messbar: Wissenschaftler sprechen von logischen Zwei-Qubit-Gattern. Sie sind die Grundbausteine des quantenlogischen Gatters eines Rydberg-Quantencomputers.

Rydberg-Atome eignen sich besonders für das Quantencomputing. Im laserangeregten Zustand sind sie mehr als einen Mikrometer (µm) groß, weil ihr äußeres Elektron infolge der Anregung für kurze Zeit auf ein weit vom Atomkern entferntes Orbital gelangt, in dem es aber dennoch gebunden bleibt. Wegen der schwachen Bindung ist das Atom allerdings sehr sensitiv für elektrische Störeinflüsse, die auch vom benachbarten Atom ausgehen können. Das machen sich die Wissenschaftler für die hochpräzise elektromagnetische Kontrolle der Quantenoperationen zunutze.

Patentierter Qubit-Ansatz

Ein Team des 5. Physikalischen Instituts der Universität Stuttgart um Dr. Florian Meinert und Prof. Tilman Pfau arbeitet an einem universellen Quantencomputer mit Rydberg-Atomen, in dem es einen patentierten Feinstruktur-Qubit-Ansatz realisiert, welcher auf der magischen Wellenlänge von 592 nm basiert [1]. Bei dieser Wellenlänge werden beide Zustände des Qubits und der Rydberg-Zustand gleich stark in den optischen Pinzetten gehalten, was das System besonders robust macht. Versucht man ein Pärchen an Qubits gleichzeitig mit Lasern in den Rydberg-Zustand anzuregen, unterliegt eines der Atome wegen der starken Wechselwirkung zwischen ihnen einer Anregungsblockade. Das ist die Grundlage der Rechenoperationen des Demonstrators, den das Team aktuell in Stuttgart aufbaut und erprobt. Die eingangs beschriebene Aufgabenstellung dient der Skalierung des Rechners: Das gefragte optische

System soll die Atome mit 2.000 Laserstrahlen fixieren und es dem Team zudem ermöglichen, das aus 20 x 100 Laserfoki gebildete Array und die daran angedockten Qubits in laufenden Rechenprozessen neu anzuordnen. Für die optimale Wechselwirkung mit den Nachbar-Atomen im Array werden diese auf exakt 3,5 µm Abstand zueinander gebracht.

Hochkomplexer laseroptischer Systemaufbau

Jeder der 2.000 Laserstrahlen muss dafür im Sinne einer effizienten Fehlerkorrektur im Quantengatter individuell ansteuerbar sein. Dies darf jedoch keinesfalls zulasten der Präzision gehen: Denn für schnelle, verlässlich schaltbare Wechselwirkungen der angeregten Atome sind die Abstände der Laserfoki auf <100 nm genau definiert.

Das Fraunhofer-Institut für Lasertechnik ILT in Aachen hat sich der Aufgabenstellung des Stuttgarter Forschungsteams angenommen und das entsprechende laseroptische System auf Basis umfassender Simulationen entwickelt und konstruiert [2,3]. Der Montage folgte vor der Auslieferung eine umfassende Erprobung. Bei der Inbetriebnahme war dann kein Nachjustieren mehr erforderlich. Im Gesamtaufbau des Quantencomputers war für das Optiksystem mit über 150 optischen Komponenten nur ein Quadratmeter vorgesehen. Auch diese Anforderung konnte das Aachener Team erfüllen – und das kompakte System mittlerweile vor Ort erfolgreich in Betrieb nehmen.

Tatsächlich ist es gelungen, das Array aus 20 Reihen mit je 100 einzeln ansteuerbaren Laserfoki im geforderten Abstand von jeweils 3,5 µm zueinander zu realisieren. Dafür teilt der Aufbau aus kaskadierenden Strahlteilern, akusto-optischen Deflektoren, Linsen und Spiegeln vier ursprünglich eingehende Laserstrahlen schrittweise in die benötigten 2.000 individuell ansteuerbaren Strahlen. Dabei entsteht ein Zwischenbild des Arrays, das über Spiegel in eine Relay-Einheit gelenkt wird. Diese bildet das Zwischenbild 50-fach verkleinert in der Vakuumkammer ab, worin die 2.000 Foki als optische Pinzetten dienen. Hintergrund: Fokussiertes Licht übt Anziehungskraft auf die Atome aus. Wird der Fokus bewegt, wandern sie mit. Für ihre Beiträge zur Erfindung solcher optischen Pinzetten erhielten die US-Forscher Arthur Ashkin und Steven Chu jeweils den Nobelpreis für Physik.

Aus eingangs vier Laserstrahlen werden 2.000

»Eine Herausforderung bestand darin, die vier eingehenden, kollimierten Laserstrahlen mit 20 W Gesamtleistung in 2.000 einzeln ansteuerbare, leistungsgleiche Strahlen zu teilen«, berichtet Dr. Martin Traub, Gruppenleiter Optikdesign und Diodenlaser am Fraunhofer ILT. Dafür passiere jeder Strahl zunächst so genannte Strahlteilerwürfel. Diese lenken im ersten Schritt 20 Prozent des Lichts im 90°-Winkel ab und lassen die restlichen 80 Prozent zu einem weiteren Würfel durch, wo der Strahl abermals geteilt wird. Der Vorgang wiederholt sich je Laserstrahl fünfmal, was in 20 parallelen Strahlen gleicher Leistung resultiert. Diese durchlaufen dann akusto-optische Deflektoren (AOD), wo sie durch Beugung in einem akustisch angeregten Kristall aufgeteilt und abgelenkt werden. »Die Schallwellen sorgen für eine periodische Modulation des Brechungsindex im Kristall«, erläutert er.

So entsteht ein steuerbares optisches Gitter, in dem sich über die Schallfrequenz der Ablenkwinkel austretender Laserstrahlen und über die Amplitude der Leistungsanteil ändern lasse. Bei 100 unterschiedlichen Frequenzen ergeben sich so 100 verschiedene Ablenkwinkel; jeder einzelne der 20 eingehenden Laserstrahlen wird von den AODs in 100 Teilstrahlen aufgespalten, die zudem individuell ansteuerbar sind.

Ein eigens angefertigter, extrem präziser Treppenspiegel

Der Schritt von den 100 Teilstrahlen hin zu den einzeln ansteuerbaren Laserfoki führt über eine Reihe weiterer optischer Elemente. Zunächst wandelt eine Fourierlinse die Strahlen in ein telezentrisches Punktemuster. Dieses wäre wegen der Baugröße der Strahlteilerwürfel und AODs jedoch viel zu groß, um in der Vakuumkammer einzelne Atome im geforderten 3,5-µm-Abstand zu positionieren. Es bedarf weiterer optischer Kniffe: Die 2.000 Laserstrahlen werden auf einen Treppenspiegel mit kaskadierenden Spiegelflächen gelenkt, die immer kleiner werden und schließlich nur noch einige hundert Mikrometer messen. In dieser Kaskade wird der Abstand der Spots auf weniger als 200 µm verkleinert. Doch auch das genügt nicht: eine weitere 50-fache Verkleinerung ist notwendig.

»Diese erreichen wir, indem wir das Zwischenbild über einen Periskop-Spiegel auf eine zweite Ebene lenken, wo eine zweistufige telezentrische Relay-Einheit es verkleinert in die Vakuumkammer projiziert«, erklärt Traub. Um die im Array geforderten einstelligen µm-Abstände zu realisieren, sei geballtes Know-how in die Systemauslegung, Fertigung der optischen Komponenten sowie in die Montage und Justage eingeflossen. Zum Ausrichten der Spiegel mit der nötigen Genauigkeit war ein Hexapod-System mit sechs Aktuatoren im Einsatz. Dieses kann die Spiegel in je drei Raumrichtungen und Winkeln frei justieren. Die Akribie war notwendig, da minimale Abweichungen beim Ausrichten der optischen Komponenten fehlerhafte Abstände im Array zur Folge hätten. Das ginge direkt zulasten der Rechenperformance, weil falsch positionierte Qubits ihre logische Funktion nicht mehr erfüllen können. Doch genau darauf kommt es an: Denn mit jedem logischen Qubit wächst das Potential von Quantencomputern exponentiell.

Langjährige Expertise des Fraunhofer ILT trägt maßgeblich zur Lösung bei

»Die erfolgreiche Konzeptionierung und Umsetzung des Systems war nur mithilfe der umfassenden Expertise möglich, die das Fraunhofer ILT in seiner 40-jährigen Geschichte aufgebaut hat«, berichtet Traub. Es belege, wie zentral Laser und Optiken als Building Blocks und Enabler für das Zukunftsfeld Quantentechnologie sind. »Das gilt auch für unsere nahezu rauschfreien Quantenfrequenzkonverter, einen kürzlich in Aachen in Betrieb genommenen Netzwerkknoten für das Quanteninternet der Zukunft oder auch für einen im SLE (Selective Laser-induced Etching) Verfahren aus Quarzglas gefertigten Ionenfallen-Chip für einen Quantenprozessor, die unser Institut bereits realisiert hat«, ergänzt Dr. Bernd Jungbluth, der Leiter der Strategic Mission Quantentechnology am Fraunhofer ILT. Ebenso wie Ryberg-Atome haben Ionen den Vorteil, dass sie per se keine Herstellungsvarianzen oder langen Kohärenzzeit aufzuweisen, was Ionenfallen- und Rydberg-Quantencomputern zunehmende Aufmerksamkeit in der Quantentech-Community verschaffe. Laser und optische Technologien bilden bei beiden Ansätzen das Fundament.

Referenzen

[1] Quantum computing device, use, and method; F. Meinert, T. Pfau, C. Hölzl, EU Patent Application No. EP20214187.5, US Patent App. 18/267,066

[2] Apparatus and method for producing optical tweezers; F. Meinert, P. Ilzhöfer, T. Pfau, M. Traub, M. Adams, H.-D. Hoffmann, EU Patent Application No. EP22211813.5, US Patent App. 18/530,288

[3] Optical setup for a two-dimensional tweezer array with independently adjustable columns for neutral atom quantum computing; M. Adams, M. Traub, H.-D. Hoffmann, F. Meinert, P. Ilzhöfer, T. Westphalen, K. Ludwig, J. Zhao, A. Scholz, G. Unnikrishnan, R. Gupta, T. Pfau, C. L. Haefner, Proc. SPIE 12911, Quantum Computing, Communication, and Simulation IV, 129110L (2024)

Bild 1: Im Array aus 20 Reihen mit je 100 einzeln ansteuerbaren Laserfoki lassen sich Rydberg-Atome im geforderten Abstand von 3,5 µm zueinander positionieren. Dafür teilt der Aufbau aus kaskadierenden Strahlteilern, akusto-optischen Deflektoren, Linsen und Spiegeln vier initial eingehende Laserstrahlen in 2.000 individuell ansteuerbare Strahlen.
© Fraunhofer ILT, Aachen / Ralf Baumgarten.

Bild 2: Die Laserstrahlen werden auf einen Treppenspiegel mit immer kleineren Stufen gelenkt. Die Spiegel der letzten Stufen messen nur noch einige hundert Mikrometer. In dieser Kaskade wird der Abstand der 2.000 Spots auf weniger als 200 µm verkleinert. Auch das genügt noch nicht: eine weitere 50-fache Verkleinerung ist erforderlich.
© Fraunhofer ILT, Aachen / Ralf Baumgarten.

Bild 3: Zum Ausrichten der Spiegel mit der nötigen Genauigkeit war ein Hexapod-System mit sechs Aktuatoren im Einsatz. Dieses kann die Spiegel in je drei Raumrichtungen und Winkeln frei justieren.
© Fraunhofer ILT, Aachen / Ralf Baumgarten.

Kontakt

Fachliche Ansprechpersonen

Dr. Martin Traub
Fraunhofer-Institut für Lasertechnik ILT
Leiter der Gruppe Optikdesign und Diodenlaser
Tel. +49 241 8906-342
martin.traub@ilt.fraunhofer.de

Dr. Bernd Jungbluth
Fraunhofer-Institut für Lasertechnik ILT
Leiter Strategic Mission Initiative Quantentechnology
Leiter der Gruppe NLO und abstimmbare Laser
Tel. +49 241 8906-41
bernd.jungbluth@ilt.fraunhofer.de

Pressekontakt

Petra Nolis
Fraunhofer-Institut für Lasertechnik ILT
Kommunikation
Gruppenleitung
Tel. +49 1714115001
petra.nolis@ilt.fraunhofer.de

www.ilt.fraunhofer.de

Fachlicher Kontakt (extern)

Dr. Florian Meinert
Prof. Tilman Pfau
5. Physikalisches Institut
Universität Stuttgart
www.pi5.uni-stuttgart.de

Die Fraunhofer-Gesellschaft mit Sitz in Deutschland ist eine der führenden Organisationen für anwendungsorientierte Forschung. Im Innovationsprozess spielt sie eine zentrale Rolle – mit Forschungsschwerpunkten in zukunftsrelevanten Schlüsseltechnologien und dem Transfer von Forschungsergebnissen in die Industrie zur Stärkung unseres Wirtschaftsstandorts und zum Wohle unserer Gesellschaft. Seit ihrer Gründung als gemeinnütziger Verein im Jahr 1949 nimmt sie eine einzigartige Position im Wissenschafts- und Innovationssystem ein.
Mehr als 30 000 Mitarbeitende an 74 Instituten und selbstständigen Forschungseinrichtungen in Deutschland erarbeiten das jährliche Finanzvolumen von 3,6 Mrd. €. Davon entfallen 3,2 Mrd. € auf das zentrale Geschäftsmodell von Fraunhofer, die Vertragsforschung.