

Projekte im Quantum Transitional Call

Beteiligung von SNI-Mitgliedern

In der zweiten Hälfte des Jahres 2023 starteten vier Projekte in der Quantenforschung mit Beteiligung von SNI-Mitgliedern, die im «Quantum Transitional Call» des Schweizerischen Nationalfonds ausgeschrieben worden waren. Für die Forschenden des Departements Physik der Universität Basel ermöglicht diese Unterstützung eine Fortführung ihrer unterschiedlichen Forschungsansätze, die teilweise vorher durch EU-Förderprogramme unterstützt worden waren. Zwar ist die Förderung kein Ersatz für die Teilnahme an europäischen Förderprogrammen, sie mildert jedoch die Konsequenzen des Ausschlusses Schweizer Forschungsgruppen teilweise ab.

Auf dem Weg zu Quantennetzwerken

Quantennetzwerke werden weltweit von zahlreichen Forschungsgruppen untersucht, da sie vielfältige Anwendungen versprechen wie die Verknüpfung von Quantencomputern oder Quantensensoren, die abhörsichere Quantenkommunikation oder auch die Untersuchung von Vielteilchensystemen. Der Aufbau von komplexen Quantennetzwerken ist jedoch eine grosse technologische Herausforderung, die bisher noch nicht gemeistert wurde.

Verknüpfung der Expertise

Eine Plattform zur Entwicklung derartiger Quantennetzwerke planen Forschende um die Basler Professoren Philipp Treutlein und Richard Warburton zusammen mit Kolleginnen und Kollegen vom CSEM Neuchâtel aufzubauen.

Die Forschenden setzen dabei auf eine Plattform, deren Hochskalierung aus technologischer Sicht machbar erscheint. So verknüpfen sie für jeden Knotenpunkt des Netzwerks eine Quelle für einzelne Photonen, die Information transportieren, mit einem Photonen-Speicher. Die Photonen werden in eine quantenmechanische Überlagerung gebracht, deren einer Teil gespeichert wird, während der andere Teil die Information an die nächsten Knotenpunkte weiterleitet, um Verschränkung im Netzwerk zu erzeugen.

Quantenpunkte und atomare Dampfzellen

Die Gruppe von Richard Warburton hat bereits gezeigt, dass Halbleiter-Quantenpunkte einzelne Photonen in einer hohen Rate und mit einer exzellenten spektralen Reinheit aussenden können. In dem im September 2023 gestarteten Projekt «SQnet» werden die Forschenden nun neuartige Quantenpunkte verwenden, die Photonen einer bestimmten Wellenlänge aussenden, die mit Rubidium-Atomen kompatibel ist. Als Speicher verwenden die Forschenden die im Treutlein-Team entwickelten atomaren Dampfzellen. «Das sind mit Rubidium-Gas gefüllte Glaskolben, die im Gegensatz zu anderen Quantenspeichern auch bei Raumtemperatur arbeiten und nicht in einem Kryostaten stark heruntergekühlt werden müssen – was für die Hochskalierung auf ein komplexes Netzwerk wichtig ist», erklärt Philipp Treutlein.

Die Forschenden konnten bereits anhand eines Quantenspeichers zeigen, dass das Prinzip funktioniert. Für ein komplexeres Netzwerk ist jedoch eine Miniaturisierung erforderlich. Die bisher verwendeten Glaszylinder sind jeweils einige Zentimeter gross und werden einzeln von einem Glasbläser hergestellt. Dank der Expertise in Miniaturisierung, Nanofabrikation und Nanophotonik der beteiligten Kolleginnen und Kollegen vom CSEM können die Quantenspeicher nun deutlich verkleinert und ihre Herstellung automatisiert werden.

Hintergrundinformation

In dem internationalen Forschungsprogramm Horizon Europe gilt die Schweiz zurzeit als nicht-assoziiertes Drittland. Forschende von Schweizer Forschungsinstitutionen sind damit von vielen Forschungsprogrammen der EU ausgeschlossen worden. Das Schweizer Staatssekretariat für Bildung, Forschung und Innovation hat daraufhin den Schweizer Nationalfond beauftragt, eine Übergangslösung zu erarbeiten. Im Jahr 2022 wurde

daher der Quantum Transitional Call ausgeschrieben, um Forschenden, die an Programmen zur Quantenforschung von Horizon Europe beteiligt waren, eine Fortführung ihrer Forschungsprojekte zu ermöglichen. Fünf SNI-Mitglieder vom Department Physik der Universität Basel sind an erfolgreichen Projekten beteiligt, die in der zweiten Hälfte des Jahres 2023 starteten und Förderung über einen Zeitraum von vier Jahren erhalten.

Weitere Informationen:

Interview mit den erfolgreichen Professor:innen der Universität Basel

<https://www.unibas.ch/de/Universitaet/Administration-Services/Vizektorat-Forschung/Grants-Office/Grants-Office-News/Grants-Office-Newsletter-2023-7/Quantum.html>

Forschungsgruppe Philipp Treutlein

<https://atom.physik.unibas.ch/en/research/>

Forschungsgruppe Richard Warburton

<https://nano-photonics.unibas.ch>

Beitrag Physics World

<https://physicsworld.com/a/rubidium-vapour-makes-a-good-quantum-memory/>

Forschungsgruppe Martino Poggio

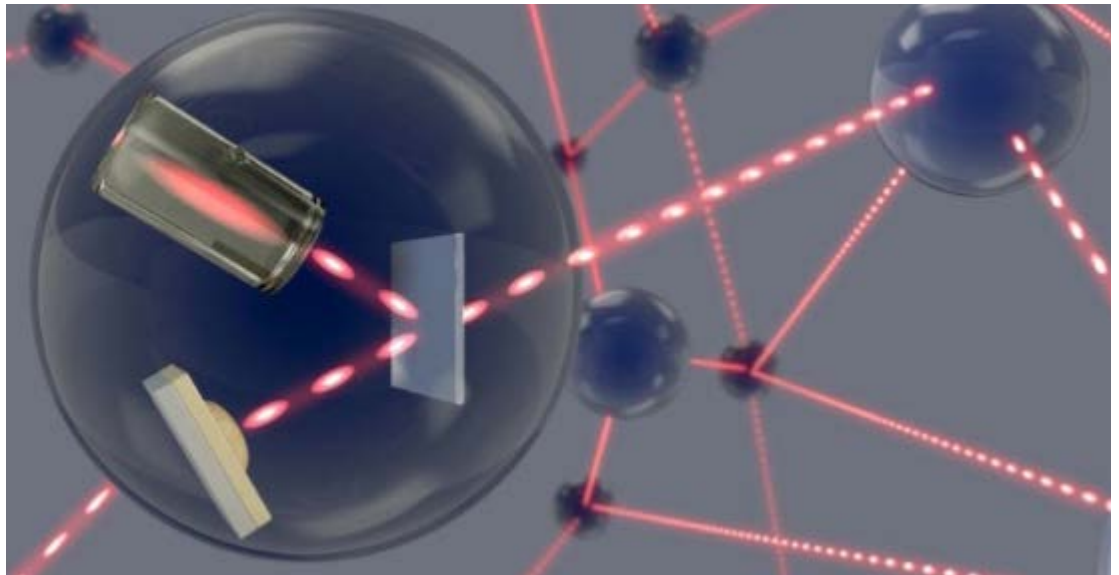
<https://poggiolab.unibas.ch>

Forschungsgruppe Patrick Maletinsky

<https://quantum-sensing.physik.unibas.ch/en/>

Forschungsgruppe Andrea Hofmann

<https://hofmannlab.physik.unibas.ch/en/>



In jedem Knotenpunkt des Quantennetzwerk soll eine Photonenquelle mit einem Quantenspeicher verknüpft werden. Verschränkte Photonen sorgen dann für die Übermittlung der Information. (Abbildung: Departement Physik, Universität Basel)

«Siebenhundert dieser Dampfzellen konnten unsere Partner am CSEM bereits auf einem Wafer produzieren», berichtet Philipp Treutlein. «Wenn wir diese winzigen Quantenspeicher verwenden, werden die einzelnen Knoten des Netzwerks deutlich kleiner und wir können so theoretisch grössere Netzwerke aufbauen. Denkbar ist ebenfalls, einzelne Knoten mit mehreren Dampfzellen auszustatten und so die zu verarbeitende Datenmenge zu vergrössern. Allerdings gibt es noch eine Menge zu untersuchen, bevor wir soweit sind.» Am Departement Physik werden zwei Doktorierende und ein Postdoc diese Arbeiten vorantreiben.

Anpassung der Wellenlänge

Eine weitere Herausforderung für die Forschenden sind die verwendeten Glasfasern, welche die Knoten verbinden. Wenn die Übertragung der Daten über grössere Distanzen erfolgen soll, muss sich die Wellenlänge der Photonen in dem Bereich bewegen, der von existierenden Telekom-Fasern verwendet wird. Die bisher untersuchten Spektrallinien besitzen jedoch nicht die geforderten Wellenlängen. In dem skalierbaren System müssen die Forschenden daher noch einen photonischen Chip integrieren, der eine Konvertierung der Wellenlänge ermöglicht. So werden die roten Photonen des existierenden Systems dann mit einem infraroten Pumpplaser kombiniert, damit sie Photonen generieren, die für die Telekom-Netze geeignet sind – und dies so, dass jedes einzelne Photon in genau ein Photon der geforderten Wellenlänge umgewandelt wird.

Sensoren für supraleitende Quantenbits

Für die Gruppe von Prof. Dr. Martino Poggio erlaubt die erhaltene Förderung die Fortsetzung der Forschung auf dem Gebiet von Quantensensoren für supraleitende Quantenbits. Zwei Doktorierende und ein Postdoc treiben ab Dezember 2023 die vielversprechenden Forschungsarbeiten des Poggio Labs auf dem Gebiet der rastersondenmikroskopischen Bildgebung voran.

Die Forschenden werden in dem Projekt «SuperSQUID» supraleitende Qubits untersuchen, da diese als vielversprechende Plattform für die Realisierung eines Quantencomputers von grossen Unternehmen wie Google und IBM verwendet werden. Es gibt bereits funktionierende Designs mit bis zu hundert Qubits. Jedoch erfordert die Verwendung einer weit grösseren Zahl, wie sie für einen funktionierenden Quantencomputer erforderlich ist, ein besseres Verständnis von Defekten und Schwachstellen – sowohl im Material wie auch im Design der supraleitenden Schaltkreise.

Defekten auf der Spur

Die im Poggio-Team untersuchten supraleitenden Qubits werden zu einem grossen Teil von Kolleginnen und Kollegen der ETH Zürich aus dünnen Lagen von Aluminium und Niobium oder Tantal hergestellt. Das Poggio-Team nutzt die hochempfindliche Rastersonden-Bildgebung mit supraleitenden Quanteninterferenzgeräten (SQUIDs) an der Spitze der Sonde um auftretende Probleme, die bei der Hochskalierung der Anzahl von Qubits entstehen, zu identifizieren, zu lokalisieren und schliesslich zur deren Lösung beizutragen.

Zurzeit sind die Forschenden vom Departement Physik in der Lage Untersuchungen der Qubits im Kryostaten bei 300 Millikelvin durchzuführen. «Mithilfe des SuperSQUID-Projekts werden wir unser Kühlsystem aufrüsten können, sodass wir bis zu Temperaturen von 10 Millikelvin herunterkühlen können», berichtet Dr. Floris Braakman, der im Poggio-Team für das Projekt verantwortlich ist. «Die supraleitenden Qubits arbeiten normalerweise bei diesen tiefen Temperaturen. Daher ist es für uns wichtig, mit unserem Raster-SQUID-Mikroskop auch bei diesen Bedingungen arbeiten zu können», fügt er hinzu. Zudem planen die Forschenden ein Hochgeschwindigkeits-Mikroskop zu realisieren, mit dem sich schnelle Änderungen erfassen lassen.

Die Forschenden werden auf diese Weise im Laufe der nächsten vier Jahre räumliche Karten der Materialdefekte erstellen, magnetische Felder und den Stromfluss sowie Verluste in den supraleitenden Schaltkreisen abbilden. Die Daten werden helfen die Mechanismen des Verlusts der Quanteneigenschaften, der sogenannten Dekohärenz, besser zu verstehen und Empfehlungen für verbessertes Design der Schaltkreise sowie des Herstellungsprozesses der Quantenbits zu geben.

Mit Diamanten Rotation und Temperatur messen

Winzige Diamanten mit Fehlstellen (Stickstoff-Vakanzzentren) haben sich über die letzten Jahre als hochempfindliche, leistungsstarke Quantensensoren für elektrische und magnetische Felder etabliert. Mithilfe des Spins einzelner Elektronen, die in den Vakanzzentren kreisen, lassen sich auch Temperaturen präzise bestimmen. Die Analyse des Drehimpulses der Atomkerne dagegen kann zur Messung von Rotationen hinzugezogen werden.

In dem Projekt ensQsens werden Forschende von der Universität Basel, dem Swiss Center for Electronics and Microtechnology in Neuchatel (CSEM) und dem Laboratoire des Sciences des Procédés et des Matériaux (CNRS, Villetaneuse, Frankreich) derartige Quantenthermometer und Rotationssensoren entwickeln und ihre Miniaturisierung und Integration in zentimetergrosse Gehäuse anstossen. Die Anwendbarkeit und Verbreitung dieser Quantensensoren werden mit dem Projekt, das im Oktober 2023 startete, weiter vorangetrieben.

In der Gruppe von Professor Dr. Patrick Maletinsky vom Departement Physik, der das Projekt leitet, werden zwei Doktorierende und ein Postdoc daran arbeiten. Im Team mit dem CSEM und CNRS werden die Forschenden die Verwendung von Ensembles von Stickstoff-Vakanzzentren (NV-Zentren) zur Sensorik in sich ergänzenden Richtungen verfolgen. Zum einen entwickeln sie auf Grundlage von Kernspin-Ensembles in Diamanten ein neuartiges Rotationsmessgerät, das in tragbaren Navigationsgeräten eingesetzt werden könnte und präziser sowie robuster als bisherige Rotationssensoren arbeiten könnte. Zum anderen zielt ihre Forschung auf die Herstellung eines winzigen Thermometers, das auf Elektronenspin-Ensembles basiert und beispielsweise in der Elektronik Anwendung finden könnte.

Nutzung von Elektronen- und Kernspins

Die Spins in Diamanten erscheinen den Forschenden besonders vielversprechend, da sie bei Raumtemperatur arbeiten und sich bereits als robuste Sensoren erwiesen haben. In den NV-Zentren kreisen je sechs Elektronen, deren Eigendrehimpulse (Spin) sehr empfindlich auf elektrische und magnetische Felder in der Umgebung reagiert und die sich gemeinsam wie ein winziger Magnet verhalten. Die Elektronen werden angeregt und senden dann einzelne Photonen aus, die Information über den Zustand des Spins und damit über die elektrischen und magnetischen Felder liefern.

Für die geplante Temperaturmessung planen die Forschenden Rastersonden mit einer konischen Diamantspitze zu verwenden, deren Durchmesser am Ende nur etwa 10 Nanometer beträgt und die an der Basis zahlreiche NV-Zentren enthält. Da Diamant Wärme sehr gut leitet, hat die mit der winzigen Spitze «ertastete» Temperatur einen Einfluss auf die Wechselwirkungen zwischen den Elektronen der NV-Zentren. Für jedes einzelne NV-Zentrum spielen diese Wechselwirkungen keine besonders grosse Rolle – was sie bei anderen Anwendungen so robust macht. Wenn jedoch zahlreiche dieser NV-Zentren vereint sind, lässt sich diese thermische Ausdehnung des Diamantkristalls zur Temperaturbestimmung verwenden. Die Forschenden erwarten, dass sie mit dem geplanten Setup eine örtliche Auflösung im Bereich von 10 bis 20 nm erzielen können.

Um Rotationen präzise zu erfassen, eignen sich Elektronenspins nur bedingt, da sie zu empfindlich auf magnetische Felder reagieren. Die Spins der Atomkerne (Kernspins) sind jedoch besser geeignet. Sie sind weniger empfindlich gegenüber äusseren Magnetfeldern, lassen sich jedoch auch optisch adressieren, wie Maletinsky Gruppe letztes Jahr zum ersten Mal zeigen konnte. Daher untersucht das Team zusammen mit den Projektpartnern in einem anderen Teilbereich des Projekts den Einsatz von Kernspins in Diamanten als Rotationssensoren. Diese sollen zusammen mit den Projektpartnern am CSEM in ein kompaktes Gehäuse integriert werden und könnten so in Zukunft in der Navigation und Stabilisierung von selbstfahrenden Fahrzeugen oder Drohnen eingesetzt werden.

Qubits aus Graphen

In einem weiteren Projekt war Prof. Dr. Andrea Hofmann als Co-Antragstellerin erfolgreich. In dem von Prof. Dr. Thomas Ihn (ETH Zürich) geleiteten Projekt «GraQuaDotQb» wird sie mit ihrer Gruppe untersuchen, wie sich Quantenpunkte in gekoppelten Graphenschichten bilden lassen. In Zusammenarbeit mit den Forschenden der ETH Zürich erforscht das Hofmann-Team dann die zweischichtigen Graphen-Quantenpunkte als Träger für Spin-, Valley- oder Spin-Valley-Qubits.

Zurzeit spielt bei Andrea Hofmann jedoch ein noch spannenderes Projekt eine zentrale Rolle. Andrea ist Mitte Oktober nämlich Mutter geworden. Wir gratulieren ganz herzlich und wünschen ihr und der kleinen Familie alles Gute!