

Lokales Quantennetzwerk für Alice und Bob

Vom wissenschaftlichen Nischenthema zum international anerkannten Forschungsfeld: **Quantenmikrowellen** eröffnen viele Anwendungsperspektiven, für die sich auch die Industrie interessiert.

Von **Frank Deppe**,
Kirill G. Fedorov und
Achim Marx

Die Quantenzustände des Lichts und ihre Wechselwirkung mit Materie werden seit den 1970er Jahren erforscht. In zahlreichen Experimenten wurden die quantenmechanischen Eigenschaften von Licht und mikroskopischer Materie – also einzelnen Atome oder Ionen – bestätigt, d. h. Überlagerungszustände, Verschränkung und das Heisenberg-Prinzip. Seit etwa 20 Jahren liegt der Fokus bei der Untersuchung von Quantenressourcen zunehmend auf dem Ziel, Quantentechnologien zu entwickeln, also konkrete Anwendungen. Diese lassen sich in vier Bereiche unterteilen: Quantencomputing, Quantensimulation, Quantenkommunikation und Quantenmetrologie/-sensorik. In allen diesen Bereichen wird ein Vorteil des quantenmechanischen Ansatzes gegenüber seinem herkömmlichen Pendant vorhergesagt.

In diesem Zusammenhang haben sich zusätzlich zu mikroskopischen, atomaren Systemen auch aus zahlreichen Atomen

bestehende, festkörperbasierte Quantensysteme wie Halbleiter oder Supraleiter als wichtige Materialsysteme etabliert. Unter ihnen stechen besonders die supraleitenden Schaltkreise heraus, sie sind die derzeit am weitesten fortgeschrittene Materialplattform im Quantencomputing. Es gibt bereits supraleitende Quantenprozessoren mit zweidimensionalen Gittern von 50 oder mehr einzeln ansteuerbaren Elementen – den Quantenbits (Qubits). Unter anderem wurde in diesem Zusammenhang gezeigt, dass so ein Quantenprozessor für eine spezielle Problemstellung bereits heute leistungsfähiger als ein herkömmlicher Supercomputer ist.

Forschungsfeld Quantenkommunikation

Weltweit wird intensiv daran gearbeitet, die Anzahl der supraleitenden Qubits auf einem Chip weiter zu erhöhen. Zunehmend wird es aber auch wichtig, sich mit der Vernetzung von Quantenprozessoren

und der damit einhergehenden Übertragung von Quantenzuständen zwischen ihnen zu beschäftigen. Die dazu relevanten Prozesse werden in der Quantenkommunikation erforscht. Traditionell beschäftigt man sich dort intensiv mit dem etwas einfacheren Problem der Nutzung von Quantenressourcen zur abhörsicheren Übertragung klassischer Nachrichten mittels Quantenschlüsselverteilung. Hierbei erscheint die Überwindung großer Distanzen mittels optischer Signale bei ca. 200 THz über Glasfaserleitungen oder Satellitenverbindungen ausgesprochen vielversprechend. Dieser Ansatz führt aber im Fall der Übertragung „echter“ Quantenzustände zwischen supraleitenden Quantenprozessoren zu unerwartet großen Problemen: Hier liegt die natürliche Frequenzskala der supraleitenden Qubits nämlich bei einigen Gigahertz, also im Mikrowellenbereich, wie er auch aus der klassischen Computer-, Netzwerk- und Mobilfunktechnologie bekannt ist. Obwohl Mikrowellen



„Mikrowellen sind die derzeit vielversprechendste Technologie zur Vernetzung supraleitender Quantenprozessoren.“

Frank Deppe (o.r.) und ein Kollege arbeiten im WMI-Labor am Q-LAN-Aufbau.

– wie sichtbares Licht – elektromagnetische Wellen sind, ist eine Konversion der fragilen Quantenzustände über fünf Größenordnungen zu optischen Frequenzen und wieder zurück technologisch äußerst herausfordernd. Selbst nach jahrelanger Forschung liegen die erreichten Quanteneffizienzen hier im Bereich von 10^{-5} oder schlechter. Als offensichtliche Alternative bietet sich an, die Quantenressourcen bei Mikrowellenfrequenzen direkt zur Kommunikation zu nutzen.

Quantenmikrowellenforschung am Walther-Meißner-Institut

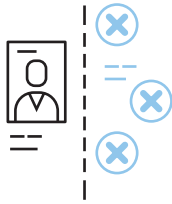
Die Entwicklung solcher Quantenmikrowellen und der damit verbundenen Technologien wurde am Walther-Meißner-Institut (WMI) der BADW vor etwa zehn Jahren als wissenschaftliche Pionierleistung begonnen. Diese umfasste zunächst den Nachweis, dass sich an propagierenden Mikrowellensignalen Quanteneigenschaften beobachten lassen. Dazu mussten

wegen der geringen Signalenergie von Quantenmikrowellen zunächst geeignete Messverfahren entwickelt werden, mit denen dann propagierende gequetschte Zustände nachgewiesen werden konnten. Bei diesen ist eine der beiden Feldquadraturen – diese repräsentieren anschaulich gesprochen den elektrischen und den magnetischen Anteil der Welle – besser lokalisiert als im quantenmechanischen Grundzustand, dem Vakuum. Sie ist also in diesem Sinn unter den Wert der Vakuumfluktuationen gequetscht. Um das Heisenberg-Prinzip nicht zu verletzen, ist die zweite Feldquadratur entsprechend stärker verschmiert. Verteilt man die Quetschung zwischen zwei Signalen, die entlang unterschiedlicher Pfade propagieren, erhält man einen quantenmechanisch verschränkten Zustand. Mittlerweile gehört das WMI auf diesem Gebiet zur Weltspitze, was sich unter anderem in der Koordination des europaweiten Forschungsprojekts „Quantum Microwaves for Communication and Sensing“ (QMICS)



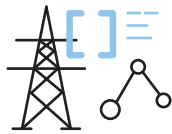
Zusammenbau eines Mikrowellen-Q-LAN-Kabels.

Quantenkryptografie und -kommunikation: zukünftige Anwendungen



Wahrung der Privatsphäre

Persönliche Daten sind abhörsicher und nicht manipulierbar



Nationale Sicherheit und kritische Infrastrukturen

Keine Manipulation oder Fremdsteuerung, etwa von autonomen Autos, Atomkraftwerken oder Stromnetzen



Sicherer Handel

Absolute Sicherheit bei der Datenübertragung, etwa bei Bankgeschäften

im Rahmen des Quantenflaggschiff-Programms der Europäischen Union äußert. Hier wurden kürzlich zwei grundlegende Quantenkommunikationsprotokolle implementiert. Beim ersten handelt es sich um die gezielte Präparation eines Quantenzustands an einem entfernten Ort. Dazu wird zwischen zwei Partnern „Alice“ und „Bob“ zunächst ein verschränkter Zustand verteilt. Durch eine geeignete lokale Messung von Alice an ihrem Teil des verschränkten Zustands, die klassische Übermittlung des Messergebnisses an Bob und eine entsprechende lokale Operation von Bob an seinem Teil des verschränkten Zustands erzeugt Alice bei Bob einen Quantenzustand ihrer Wahl. Dabei ist zu beachten, dass der klassische Kommunikationskanal zwischen Alice und Bob für sich allein genommen keinen Rückschluss auf den von Alice gewählten Quantenzustand zulässt. Dieser Sicherheitsaspekt konnte mit einer quantenmechanischen Interpretation des bekannten Einmalschlüsselverfahrens experimentell quantifiziert werden, wobei Alice und Bob 36 cm voneinander entfernt waren. Kürzlich konnte darüber hinaus am WMI erstmals das Phänomen der Quantenteleportation von frei propagierenden Mikrowellenzuständen über eine Distanz von 42 cm erfolgreich umgesetzt werden. Hierbei transferiert Alice einen ihr nicht notwendigerweise bekannten Quantenzustand unter Ausnutzung eines gemeinsamen verschränkten Zustands und klassischer Kommunikation intrinsisch abhörsicher zu Bob.

Supraleitende Quantenschaltkreise müssen bei Temperaturen von wenigen Hundertstel Grad über dem absoluten Nullpunkt betrieben werden. Der Grund ist die geringe Energie eines einzelnen Mikrowellenphotons, die die charakteristische Energieskala für Quantenmikrowellenzustände darstellt. So erfordern Signale von 6 GHz, dass die Arbeitstemperatur wesentlich kleiner als 3 Zehntel Grad über dem absoluten Nullpunkt ist. Zum Glück lässt sich diese Anforderung heute mit kommerziell erhältlichen Kryostaten leicht realisieren. Supraleitende Quantenprozessoren werden standardmäßig in solche Apparaturen eingebaut. Auch eine entsprechend kalte Verbindung zwischen zwei solchen Kryostaten über mehrere Meter wurde kürzlich

von einem Industriepartner des WMI im Projekt QMiCS entwickelt. Supraleitende Kabel haben in einer solchen Umgebung ähnlich geringe Leitungsverluste für Mikrowellen wie Glasfasern für optische Signale. Entsprechend ist die Schaffung eines lokalen Netzwerks aus supraleitenden Quantenprozessoren („Q-LAN“) eine wichtige Vorstufe hin zu einem Internet aus Quantencomputern. Konsequenterweise fortgeführt, lässt sich so auch von Quantensupercomputern träumen, bei denen Quantencomputer aus vielen einzelnen, standardisierten Modulen zusammengesetzt werden. Selbstverständlich lässt sich im Prinzip auch sichere Kommunikation klassischer Information mittels Quantenschlüsselverteilung im Mikrowellenbereich realisieren.

Abschließend sei noch erwähnt, dass die Quantenmetrologie/-sensorik eine weitere Anwendungsperspektive bereithält, bei der Quantenmikrowellen die natürliche Frequenzkala bilden: die berührungsfreie Fernerkundung (Radar). Ein Quantenradar verspricht einen Quantenvorteil im Signal-Rausch-Verhältnis gegenüber herkömmlichem Radar. Im Mikrowellenbereich steht der experimentelle Nachweis eines solchen Vorteils aber noch aus. Daher hat das WMI kürzlich zusammen mit Partnern das vom BMBF geförderte Projekt „QUANTENRADARTEAM“ (QUARATE) begonnen. Grundlage sind auch hier gequetschte Mikrowellenzustände.

PD Dr. Frank Deppe und Dr. Kirill G. Fedorov

sind wissenschaftliche Mitarbeiter am Walther-Meißner-Institut für Tieftemperaturforschung der BAdW, lehren an der TU München und sind Mitglieder des Exzellenzclusters Munich Center for Quantum Science and Technology (MCQST).

Dr. Achim Marx

ist Technischer Direktor des Walther-Meißner-Instituts.