

QUANTENTECHNOLOGIEN

IN NORDRHEIN-WESTFALEN

Die Quantenforschung in Nordrhein-Westfalen geht unterschiedliche Wege, um die leistungsfähigsten frei programmierbaren Quantencomputer zu entwickeln. Zahlreiche Hochschulen und Forschungsinstitute sind daran beteiligt.



Foto: Shutterstock/ metamorworks

MEHR ALS 1 UND 0

VORREITER IN DER QUANTENCOMPUTING-FORSCHUNG

Quantencomputing ist die zukunftsweisende Technologie, die revolutionäre Veränderungen unseres Alltags in Aussicht stellt. In Nordrhein-Westfalen forscht bereits eine Reihe von Hochschulen und Instituten an der Entwicklung und Umsetzung.

Quantencomputer und Quantentechnologien versprechen durch ihre neuartige Architektur Lösungen für bis dato nicht effizient lösbare Probleme, an denen bislang auch die stärksten Hochleistungsrechner scheitern. Es ist zu erwarten, dass die wissenschaftlichen Entwicklungen der kommenden Jahre völlig neue Möglichkeiten im Bereich des High-Performance-Computing und seinen Anwendungen in der Wirtschaft erzeugen werden. Insbesondere in den Bereichen Energieversorgung (z.B. agiles Netzmanagement), Digitalisierung (z.B. Künstliche Intelligenz), Pharmazie (z.B. Wirkstoffentwicklung), Chemie (z.B. Katalysatorentwicklung), Verkehr/Logistik (z.B. Routenoptimierung) und Werkstoffinnovationen (z.B. Materialdesign) werden Sprunginnovationen mit hoher wirtschaftlicher und gesellschaftlicher Relevanz erwartet. Eine interdisziplinäre und fokussierte Erforschung und Weiterentwicklung der vorhandenen Konzepte ist nötig, damit Deutschland zu einem der führenden Länder in ihrer Entwicklung und Anwendung wird und diese Position langfristig sichert.

Großes Marktpotential

Das wirtschaftliche Potential im Bereich Quantencomputing wird in repräsentativen Studien der Boston Consulting Group (BCG) auf insgesamt über 50 Mrd. Dollar bis 2035 geschätzt; ab 2040 rechnen Untersuchungen sogar mit einem jährlichen Marktpotential von bis zu 80 Mrd. Dollar. In NRW ist die Exzellenz zum Thema Quantencomputing an mehr als einem Dutzend Standorten angesiedelt, deren Bündelung nicht nur die Grundlagenforschung signifikant stärkt und fördert, sondern auch die Wertschöpfungskette bis zur Anwendung in der Großindustrie erweitert. Das bietet dem

Standort Nordrhein-Westfalen das Potential, zu einem Technologieführer im Bereich Quantencomputing zu werden. Durch einen frühen Markteintritt lassen sich eigene technische Standards etablieren, die nicht nur Deutschland langfristig weltweite Marktanteile sichern, sondern auch die technische Souveränität Deutschlands im Bereich der Quantentechnologien und ihrer Anwendungen sichert. Hierfür bedarf es nicht allein der Spitzenforschung, sondern darüber hinaus eines effektiven Wissens- und Technologietransfers in die Wirtschaft. Um dies möglichst wirkungsvoll zu gestalten, treiben die Forschungsstandorte in NRW ihre Vernetzung untereinander, national und mit strategischen Partnern insbesondere im europäischen Raum intensiv voran.

Fast alle Technologien, die unsere moderne Welt geprägt haben – von der Mikroelektronik über Photonik, medizinische Sensorik, Chemie, Materialwissenschaft, Computertechnik und vieles mehr – sind letztlich das Ergebnis der Nutzung der Quantenphysik. Heute wird diese Entwicklung erste Quantenrevolution genannt. Grundlage dafür war die Entwicklung der Quantenmechanik im 20. Jahrhundert, die es Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern ermöglicht hat, die Eigenschaften der Materie in allen Größenordnungen zu erklären.

Zweite Quantenrevolution

Seit den 2000er-Jahren erleben wir jedoch eine zweite Quantenrevolution, die diesmal auf der Steuerung einzelner Quantenobjekte beruht und zur Entwicklung von Quantentechnologien geführt hat. Diese Steuerung von Quantenobjekten galt lange als unmöglich, was auch in der Feststellung des Nobelpreisträgers Erwin Schrödinger aus den 1920er-Jahren zum Ausdruck kommt: „... wir experimentieren niemals mit nur einem Elektron oder Atom ...“. Der Ursprung der Quantenphysik liegt mehr als 100 Jahre zurück, und ihr Erfolg in der quantitativen Beschreibung und Vorhersage von Phänomenen, die in Experimenten beobachtet werden können, ist überwältigend. In zahlreichen Experimenten wurden die

Vorhersagen der Quantenphysik mit sonst in kaum einer anderen Wissenschaftsdisziplin zu erreichenden Genauigkeit bestätigt. Es mag zunächst überraschen, wie ein so gut etabliertes Forschungsgebiet heute wieder zu vollkommen neuen Technologien führt, mit dem Potential, unsere technischen Möglichkeiten der Informationsverarbeitung zu revolutionieren.

Im letzten Viertel des 20. Jahrhunderts gelangen jedoch die ersten Experimente, in welchen einzelne Quantensysteme deterministisch, das heißt in genau gewünschten Zuständen, präpariert und untersucht wurden. Peter Toschek, Werner Neuhauser, Hans Dehmelt und weitere Kollegen betreten vollkommen neues wissenschaftliches Terrain, als sie 1979 in Heidelberg zum ersten Mal in der Menschheitsgeschichte tatsächlich ein einzelnes Atom – ein Barium-Ion – speicherten und für das menschliche Auge sichtbar machten. Wolfgang Paul hatte die damals wie heute zur Speicherung der Ionen genutzte Methode zuvor in Bonn entwickelt. Er und Hans Dehmelt wurden 1989 für diese bahnbrechenden Leistungen mit dem Nobelpreis für Physik ausgezeichnet. 2012 schließlich wurde der Nobelpreis für Physik an Serge Haroche und David Wineland verliehen – „für bahnbrechende experimentelle Methoden, welche die Messung und Manipulation von einzelnen Quantensystemen ermöglichen.“

Große experimentelle Herausforderungen

Mittlerweile gehört die umfassende Steuerung von einzelnen Quantensystemen – zum Beispiel Ionen, Photonen, Halbleiter und Supraleiter – zur Routine unter Physikern. Zu neuen Anwendungen, die so ermöglicht werden, zählen die sichere Kommunikation auf der Grundlage der Quantenschlüsselverteilung, der Einsatz von Quantensensoren für den Nachweis kleinster Felder und Kräfte, die Simulation komplexer Quanten-Systeme und – noch ehrgeiziger – frei programmierbare Quantencomputer. Die Quantenkommunikation ist heute wohl der anwendungstechnisch am weitesten fortgeschrittenen dieser Teilbereiche, und kommerzielle Systeme sind bereits verfügbar. Aber auch in diesem Forschungsfeld stehen noch große experimentelle Herausforderungen an. Hierzu gehört etwa die Entwicklung und der Einsatz eines Quantenrepeaters, welcher für die sichere Kommunikation über große Distanzen notwendig ist.

Quantensensoren bergen das Potential, die bestehenden Sensoren in vielerlei Hinsicht zu übertreffen (Größe, Betriebsumgebung, Empfindlichkeit, Spezifität, Unsicherheit, Rückverfolgbarkeit, Kalibrierungsintervalle, Lebensdauer, Stromverbrauch, Zuverlässigkeit, Sicherheit) und eine Fülle neuartiger Anwendungen wie hochempfindliche medizinische Diagnostik oder hochpräzise Satellitennavigation zu ermöglichen – ein entscheidender Schritt für die autonomen Autos der Zukunft.

Hinter dem ehrgeizigen Ziel des frei programmierbaren Quantencomputers steckt die Vision, eine neue Art von Prozessoren zu entwickeln, die, auf einem völlig anderen Rechenmodell als herkömmliche Prozessoren basieren und somit einen Quantenvorteil in der Rechengeschwindigkeit mit sich bringen. Denn anders als im klassischen Computer beruht die Berechnung nicht auf einem binären System – also 1 oder 0. Ein Quantenbit (Qubit) kann sich in einem Überlagerungszustand aus 1 und 0 gleichzeitig befinden. „Die Grundidee des Quantencomputers besteht darin, das Konzept

von Überlagerungszuständen auf Computer anzuwenden“, erklärt David Gross, Professor für Quanteninformationstheorie an der Universität zu Köln. „Man möchte eine Überlagerung aller möglichen Rechenwege erzeugen, um so in nur wenigen Schritten Informationen über die gesamte Lösungsmenge ausnutzen zu können“.

Qualität der Qubits entscheidend

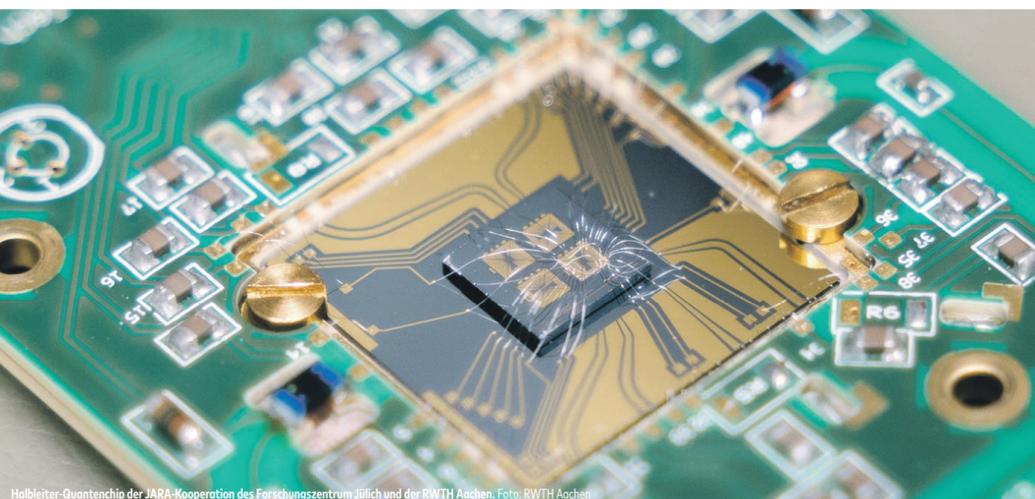
So verfügt ein Quantencomputer mit etwa 50 nahezu voll funktionsfähigen Qubits beispielsweise über eine Rechenleistung, die an die der leistungsstärksten Supercomputer von heute heranreicht. Jüngste Experimente, darunter mehrere in Europa, den USA und China, haben gezeigt, dass Quantengeräte in Bereichen arbeiten, die selbst auf einem großen Supercomputer nicht modelliert werden können. Die Zahl der in einem Quantencomputer verfügbaren Qubits sagt allerdings wenig über dessen wahre Leistungsfähigkeit aus. Die Qualität der Qubits und die Kontrolle ihrer Eigenschaften und Wechselwirkungen wird für zukünftige Quantencomputer entscheidend sein. Dies unterstreicht auch Rami Barends, zuvor einer der führenden Köpfe im Quantencomputing-Team von Google und inzwischen Direktor des Instituts für Funktionale Quantensysteme am Forschungszentrum Jülich: „Die von Google, IBM und weiteren vorangetriebene Skalierung auf Basis der Qubit-Technologie der ersten Generation ist langfristig nicht ausreichend. Wir müssen zunächst die Fehleranfälligkeit der Qubits verbessern“.

„Die deterministische Kontrolle einzelner Quantensysteme führt zu einem neuen Paradigma in der Verarbeitung von Information.“

**PROF. DR. CHRISTOF WUNDERLICH,
UNIVERSITÄT SIEGEN**

Das Ziel ist es also, einen Prozessor mit so vielen fehlerarmen Qubits zu entwickeln, dass er Aufgaben lösen kann, die in der realen Welt von Nutzen sind. Hierfür wird eine Vielzahl von physikalischen Plattformen parallel erforscht. Noch ist nicht klar, welche von ihnen sich am besten auf die erforderlichen großen Maschinengrößen im nächsten Jahrzehnt skalieren lässt.

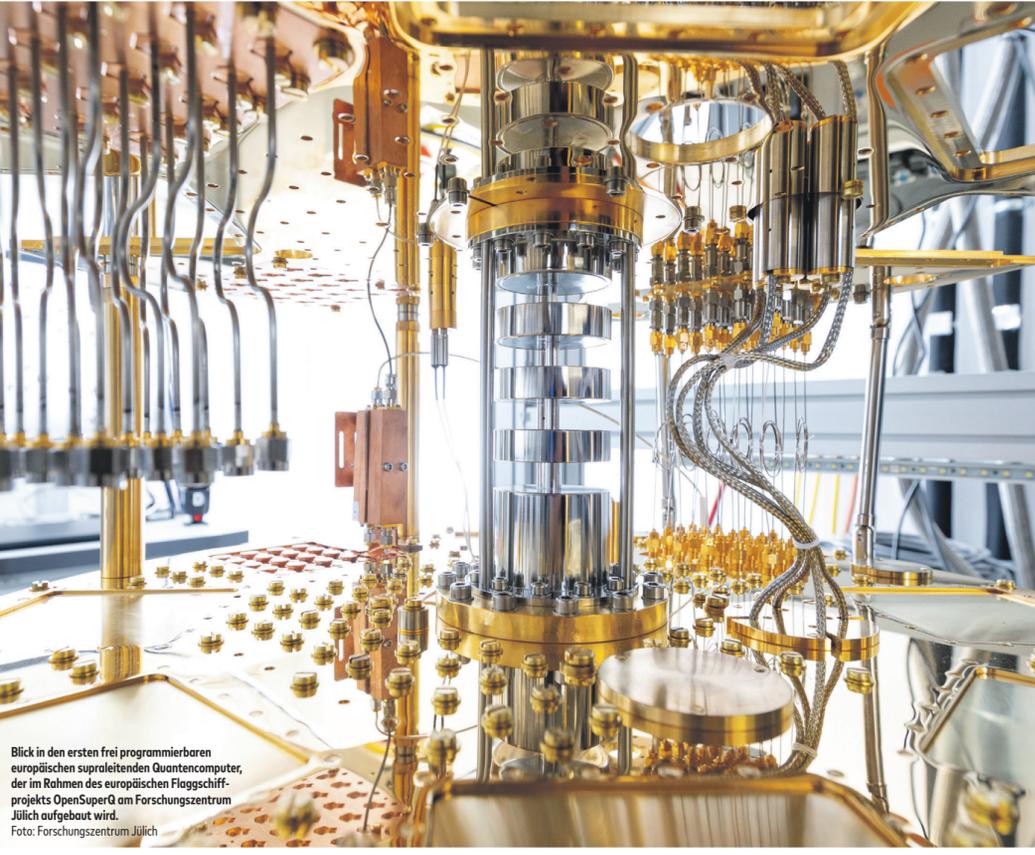
Die Verbesserung der Qubit-Qualität ist eine der Herausforderungen der Zukunft. Dementsprechend gibt es noch viel Raum für die Entfaltung neuer Ideen. Viele davon werden in NRW auf höchstem Niveau erforscht und weiterentwickelt. Auch viele Fragen im Bereich der Quantensoftware sind weiterhin offen und werden intensiv untersucht. Daran beteiligt sind auch Forscherinnen und Forscher aus NRW. Einige herausragende Projekte, auch aus komplementären Gebieten wie der Photonik, Hochfrequenz- und Kryotechnik, werden im Folgenden vorgestellt.



Halbleiter-Quantenchip der JARA-Kooperation des Forschungszentrum Jülich und der RWTH Aachen. Foto: RWTH Aachen

HARDWARE

QUANTENCOMPUTER UND IHRE PHYSIKALISCHEN PLATTFORMEN



Blick in den ersten frei programmierbaren europäischen supraleitenden Quantencomputer, der im Rahmen des europäischen Flaggschiffprojekts OpenSuperQ am Forschungszentrum Jülich aufgebaut wird.
Foto: Forschungszentrum Jülich

Die leistungsfähigsten frei programmierbaren Quantencomputer basieren heute auf supraleitenden Qubits oder auf gespeicherten Ionen. Halbleiter-basierte Qubits und Photonen gelten ebenfalls als aussichtsreiche Kandidaten für skalierbare Quantencomputer.

Der größte Teil des Umsatzes mit Quantencomputing wird voraussichtlich mit Anwendungen gemacht werden. „Ohne die entsprechende Hardware bringt das jedoch alles nichts. Diese Hardware zu entwickeln ist derzeit der entscheidende limitierende Faktor. Wer die am besten funktionierende und gleichzeitig wirtschaftliche Lösung findet und dieses Know-how geschickt nutzt, dem winken hohe Gewinnmargen und eine sehr komfortable Marktstellung“, erklärt Tommaso Calarco, Direktor des Instituts für Quantum Control/Peter Grünberg Institut am Forschungszentrum Jülich und Mitinitiator des milliardenschweren EU-Flaggschiffprogramms zum Quantencomputing.

Vor gut 25 Jahren wurden zunächst die ersten Qubits demonstriert. Dann wurde damit begonnen, kleine Quantencomputer zu entwickeln. Das derzeit große Interesse am Quantencomputing beruht zu großem Teil darauf, dass mit Hilfe von gut kontrollierten Quantensystemen Berechnungen in greifbare Nähe gerückt sind, die eine spezifische, für klassische Computer nicht lösbare Fragestellung adressieren.

Google demonstrierte dies kürzlich eindrucksvoll anhand eines Quantenalgorithmus, ausgeführt mit 53 Qubits. Für das gelöste Problem gibt es keine praktischen Anwendungen. Aber es lieferte den ersten Beleg, dass ein Quantencomputer einem herkömmlichen Rechner überlegen sein kann. Kristel Michielsen, Professorin am Jülich Supercomputing Center des Forschungszentrums Jülich, trug mit Simulationen auf verschiedenen Superrechnern zu diesem Beweis bei. Michielsens Software zur Simulation von Quantencomputern ist weltweit führend und hat zu einer Reihe von Rekorden in der Größe der simulierbaren Systeme bis knapp unter 53 Qubits geführt.

Bei der Hardware für das Quantencomputing sind einerseits supraleitende elektrische Schaltkreise und andererseits gespeicherte atomare Ionen führend. Mit beiden Systemen werden bereits heute frei programmierbare Quantencomputer betrieben. Vielversprechend sind ebenfalls Halbleiter-Qubits. Diese können in industriellen CMOS-Produktionslinien (Complementary semi-oxide-semiconductor, also Halbleiter) hergestellt werden. Diesen Vorteil teilen sie mit photonischen Quantencomputing. Letzteres ist zudem bei Zimmertemperatur möglich, aber nur für bestimmte Probleme geeignet.

Quantencomputer mit gespeicherten Ionen

Das Deutsche Museum Bonn beherbergt die Apparatur, mit welcher erstmals einzelne Atome sichtbar gemacht wurden. Nur etwa 60 Kilometer Luftlinie entfernt steht heute in Siegen der erste deutsche Quantencomputer – mit einzelnen Ionen als Qubits. Solche Atome als Qubits zu nutzen, ist durchaus naheliegend: Im Punkt Miniaturisierung sind sie kaum zu übertreffen, und die Physik ist hervorragend verstanden. Ionen-Qubits werden von der Natur selbst in gleichbleibend perfekter Qualität zur Verfügung gestellt. „Quanteninformation bleibt für lange Zeit erhalten und Quantenoperationen können verlässlich, also mit hoher Güte ausgeführt werden – die besten Atomuhren der Welt beruhen auf ebendiesen Tatsachen“, erklärt Prof. Christof Wunderlich, Inhaber des Lehrstuhls für Quantenoptik von der Universität Siegen.

QUBITS

Ein Bit, die kleinste Schalteinheit in einem Computer, die den Gesetzen der klassischen Physik gehorcht, kennt zwei Zustände, die mit 1 oder 0 bezeichnet werden. Im Quantencomputer kann die kleinste Schalteinheit, genannt Qubit, dagegen zwei Zustände gleichzeitig einnehmen – also 1 und 0. Darüber hinaus können diese quantenmechanischen Systeme beschrieben durch Wellenfunktionen miteinander interferieren, so wie dies auch z.B. Wasserwellen in einem Teich tun. Wie für den klassischen Rechner auch, gibt es im Quantencomputer elementare Operationen (Gatter), die zu beliebig komplexen Algorithmen zusammengesetzt werden können.

Über Jahrzehnte hinweg wurde ausschließlich Laserlicht zur Steuerung von Ionen-Qubits eingesetzt. Die hierfür benötigten Laserstrahlen müssen mit höchster räumlicher und zeitlicher Präzision und Stabilität erzeugt werden. Dies ist eine immense Herausforderung, insbesondere im Hinblick auf die Skalierung eines Quantencomputers auf Tausende oder gar Millionen von Qubits.

Das Team des Physikers Wunderlich an der Universität Siegen, der interdisziplinär ausgerichteten Forschungsuniversität in Südwestfalen, hat erfolgreich neue Konzepte für Quantencomputer mit gespeicherten Ionen erforscht und umgesetzt. Wunderlich verdeutlicht dies: „Wir benutzen zur Steuerung unserer Qubits keine Laser wie oft üblich, sondern Hochfrequenzfelder. Die notwendige Technologie ist seit langem etabliert, verlässlich und miniaturisierbar, sie findet sich bereits in kostengünstiger Consumer-Elektronik, zum Beispiel in Mobiltelefonen. Die apparative Komplexität wird so entscheidend reduziert und die Skalierung von Quantencomputern erleichtert.“

Neben den niedrigeren technischen Hürden hat diese Technologie jedoch auch in anderen Hinsichten die Nase vorn. Mit Hochfrequenzfeldern können Operationen an einzelnen Ionen mit ansonsten unerreichter Güte durchgeführt werden: In nur einem von ca. einer Million Fällen schlägt eine solche Operation fehl. Rekorde konnten auch bei der Unterdrückung von Fehlern beim Ionen-Transport oder dem sogenannten Übersprechen durch die Siegerner Gruppe erzielt werden.

Die Forschergruppe ist mittlerweile bereits einige Schritte weiter: Bei der Implementierung von Quantenalgorithmen zum maschinellen Lernen wurde eine Rechentiefe erreicht, die für andere physikalische Plattformen noch schwer zu erreichen ist. Zudem bringt eine besondere Eigenschaft der Ionen – die hohe Vernetzung der Qubits – mit sich, dass alle Qubits in einem Register miteinander kommunizieren, nicht nur die direkt benachbarten. Dies ermöglicht drastisch schnellere Quantenalgorithmen. Die Ergebnisse am mittlerweile bereits seit neun Jahren im Betrieb befindlichen Quantenrechner erzeugen durchaus Aufsehen. Die Technologie ist so erfolgversprechend, dass der Siegerner Ansatz derzeit in großen Forschungsprojekten intensiv verfolgt wird – zum Beispiel im von Siegen koordinierten Projekt MIQRO, in dem ein Quantenkernmodul mit bis zu 32 Qubits entwickelt wird. Dieses und das Projekt ATIQ werden vom Bundesministerium für Bildung und Forschung mit insgesamt etwa 54 Mio. Euro gefördert, um auf 1000 Qubits skalierbare Systeme sowie erste Industrieanwendungen in greifbare Nähe zu rücken. Im Zentrum von ATIQ stehen drei Quantencomputer-Demonstratoren: in Hannover, Mainz und Siegen.

Während die Grundlagenforschung an solchen Apparaturen in einem universitären Umfeld sehr gut verfolgt werden kann, fehlen für eine Entwicklung zu mehr Anwendernähe, Produktreife und Vermarktung hier jedoch die notwendigen Organisationsinstrumente. Daher hat Prof. Wunderlich gemeinsam mit Dr. Michael Johanning und erfahrenen Partnerinnen und Partnern aus der Wirtschaft 2020 das erste deutsche Start-up für die Entwicklung von Quantencomputer-Hardware gegründet: die eleQtron GmbH. Dabei werden über die Rechenzeit auf Quantencomputern hinaus auch Dienstleistungen angeboten, die sich von der Hilfestellung bei der optimalen Implementierung auf den Rechenmaschinen bis hin zur Output-Analyse erstrecken. Investoren sind bereits eingestiegen – und gute Kontakte zur Industrie sind ebenfalls geknüpft. Der CTO der eleQtron GmbH, Dr. Michael Johanning, umreißt dies folgendermaßen: „Unser Ziel ist es, zeitnah Rechenzeit auf unseren Maschinen anzubieten. Kommende Generationen unserer Hardware werden dafür nicht nur bisher unerreichbar viele Qubits hoher Qualität aufweisen, sondern auch die besonderen Möglichkeiten unseres technischen Ansatzes bestmöglich auszunutzen. Schon bald werden unsere ersten Maschinen für Industrieanwendungen zur Verfügung stehen. Die Synergien mit der Universität erlauben uns dabei, auf bestehende Infrastruktur zurückzugreifen und einen Blitzstart hinzulegen.“

Die zweite führende Plattform sind supraleitende Qubits. Nicht nur Google, IBM und Intel arbeiten an dieser Technologie. Auch in NRW werden diese Systeme intensiv verfolgt, insbesondere am Forschungszentrum Jülich. Die Einrichtung der Helmholtz-Gemeinschaft zählt mit ihren 6400 Mitarbeiterinnen und Mitar-

Supraleitende Qubits

Die zweite führende Plattform sind supraleitende Qubits. Nicht nur Google, IBM und Intel arbeiten an dieser Technologie. Auch in NRW werden diese Systeme intensiv verfolgt, insbesondere am Forschungszentrum Jülich. Die Einrichtung der Helmholtz-Gemeinschaft zählt mit ihren 6400 Mitarbeiterinnen und Mitar-

beitern zu den großen Forschungseinrichtungen Europas. Seit 2018 entsteht dort im Rahmen des europäischen Quanten-Flaggschiffprojekts OpenSuperQ der erste europäische Quantencomputer auf Basis supraleitender Qubits.

Diese bestehen aus elektrischen Schaltkreisen, die bei Temperaturen von gerade mal zwei hundertstel Grad über dem absoluten Nullpunkt betrieben werden. Dadurch werden sie supraleitend, d.h. der elektrische Widerstand verschwindet, und es können langlebige Quantenzustände realisiert werden. „Ein Vorteil gegenüber Ionen liegt darin, dass sie rein elektrisch kontrolliert und ausgelesen werden können und dass ihre Eigenschaften im Herstellungsprozess maßgeschneidert werden. Zudem lassen sich ähnliche Fertigungsmethoden wie in der Halbleitertechnologie einsetzen“, erklärt Professor Frank Wilhelm-Mauch vom Forschungszentrum Jülich, der OpenSuperQ koordiniert.

Im Projekt QSolid, das 2022 startete und vom BMBF mit rund 70 Millionen Euro gefördert wird, soll zudem ein supraleitender Quantenrechner „made in Germany“ geschaffen werden. Das Vorhaben, welches seinen Schwerpunkt ebenfalls am Forschungszentrum Jülich hat, bindet bundesweit führende Einrichtungen inklusive zahlreicher Firmen ein. „QSolid wird ein zentraler Baustein zukunftsreicher digitaler Souveränität für Deutschland“, sagt Projekt-Koordinator Frank Wilhelm-Mauch.

Neue und etablierte Unternehmen unterschiedlicher Größe sind an der umfassenden deutschen Lieferkette beteiligt. Ziel ist ein nationaler Quantencomputer, der das Potential hat, die leistungsfähigsten Supercomputer der Welt zu übertreffen. Um die Kommerzialisierung zu beschleunigen, soll das System an Superrechner des Forschungszentrums angeschlossen werden. Nutzern wird so ein breiter Zugang gewährt und hybride Anwendungen werden möglich, die teilweise auf dem Quantenrechner und teilweise auf dem Supercomputer ausgeführt werden.

Halbleiter-Qubits
Großes Zukunftspotential besitzt auch ein anderer Ansatz, der auf sogenannten Halbleiter-Spin-Qubits beruht. Die Information wird dabei im Eigendrehimpuls einzelner Elektronen gespeichert. Professor Hendrik Bluhm erforscht die Technologie am Forschungszentrum Jülich sowie an der RWTH Aachen im JARA-Institut für Quanteninformation. Er erklärt: „Halbleiter-Qubits haben den großen Vorteil, dass sie sich in industriellen CMOS-Produktionslinien herstellen lassen. Daran arbeiten wir gerade in dem BMBF-geförderten Projekt QUASAR zusammen mit Infineon Dresden und weiteren im Bereich der Halbleitertechnologie ausgewiesenen Instituten.“

„Wenn unsere Quantensysteme in der Praxis angekommen sind, werden sie die Kommunikations- und Informationstechnologie grundlegend verändern.“

PROF. DR. CHRISTINE SILBERHORN, UNIVERSITÄT PADERBORN

Die Güte dieser Qubits hat mittlerweile das Niveau der schon länger verfolgten Ansätze erreicht, und sie sind deutlich weniger anfällig für Störeinflüsse. „Dies dürfte gerade für die Hochskalierung ein enormer Vorteil sein. Große Qubitanzahlen kostengünstig herstellen zu können, das ist das große Versprechen von Halbleiter-qubits“, so Bluhm. Viele Anwendungen von Quantencomputern sind nach heutigem Erkenntnisstand auf Millionen von Qubits angewiesen. Ein Ende der Entwicklung ist nicht abzusehen. Schließlich ist auch die Weiterentwicklung klassischer Computer ein über Jahrzehnte fortlaufender Prozess.

„Ein Kernelement unseres Ansatzes ist eine besondere, von uns vor kurzem patentierte Architektur zur Kopplung der Qubits: ein Shuttle, das Elektronen über den Chip hin- und herbewegt. Wir müssen jedoch noch zeigen, dass dies auch gut genug funktioniert. Das ist nicht ohne Risiko, aber wenn es uns gelingt, könnte es einen Durchbruch für das gesamte Feld des Quantencomputings bedeuten und uns zusammen mit unseren Partnern an die Spitze des Felds katapultieren.“ Das wäre dann auch eine sehr

gute Grundlage für eine Ausgründung“, sagt Bluhm. Die Grundlagen für diese mittlerweile sehr anwendungsorientierte Aktivität wurden im Rahmen des Exzellenzclusters ML4Q gelegt.

Dass die Forschung zum Next Generation Computing an der Exzellenzuniversität RWTH Aachen und am Forschungszentrum Jülich weitere Schwerpunkte wie das neuromorphe Computing umfasst, sieht er dabei als essentiellen Vorteil. „So können wir bereits Kompetenz in der Systementwicklung aufbauen, ohne uns auf eine einzige Technologie beschränken zu müssen. Das lokale Forschungsumfeld bietet einzigartige Möglichkeiten, solch einen ganzheitlichen Ansatz zu verfolgen“ erläutert er. „So haben wir zum Beispiel durch die Zusammenarbeit mit Elektrotechnikern der RWTH auch viel über moderne Halbleitertechnik gelernt und wie diese zur Qubitherstellung verwendet werden kann. Dies zählt sich nun für die Umsetzung in Industriekooperationen aus.“

Photonische Qubits

Auch photonische Qubits lassen sich in halbleitertechnologisch herstellbaren Strukturen realisieren. Ihre große Stärke liegt darin, dass Photonen, also die elementaren Bestandteile des Lichts, nur schwach mit Störeinflüssen wechselwirken und somit auch bei Raumtemperatur hervorragende Kohärenzeigenschaften haben. Dies bringt jedoch auch mit sich, dass Rechenoperationen, die ebenfalls eine Wechselwirkung zwischen Qubits erfordern, schwieriger zu realisieren sind.

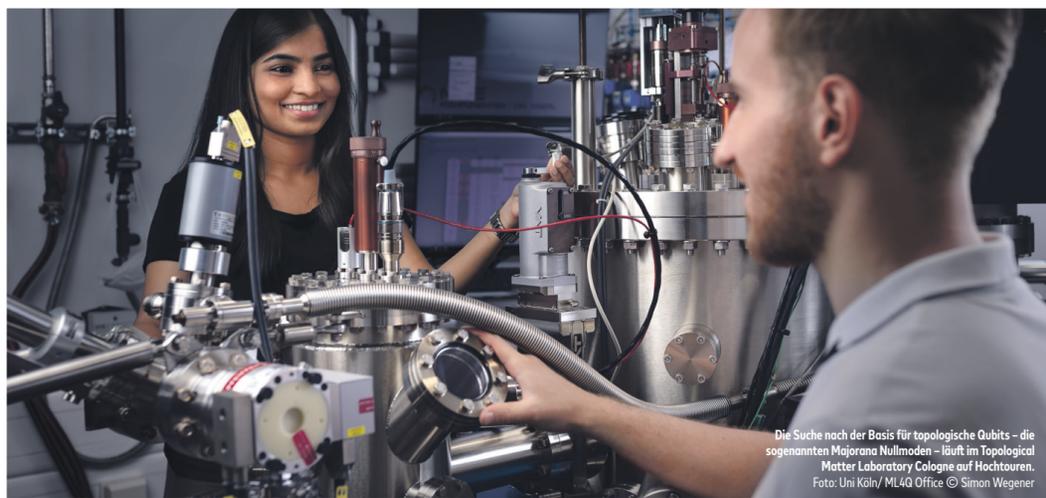
Die Entwicklung eines universellen photonischen Quantencomputers setzt sich die Universität Paderborn ultimativ zum Ziel. Auf diesem langen Weg werden zunächst spezielle Rechner für bestimmte Anwendungsfelder entwickelt. So sollen zum Beispiel komplexe Moleküle untersucht werden, bevor die Funktionalität des Systems sukzessive durch den Einbau zusätzlicher Funktionalitäten hin zur Universalität erweitert wird. „Wenn unsere Quantensysteme in der Praxis angekommen sind, werden sie die Kommunikations- und Informationstechnologie grundlegend verändern“, so Prof. Christine Silberhorn, Inhaberin des Lehrstuhls für Integrierte Quantenoptik an der Universität Paderborn.

Topologische Qubits

Die ersten Experimente an den heute führenden Quantencomputing-Plattformen wurden vor 25 Jahren durch Neugier und Erkenntnisdrang getrieben durchgeführt. Damals war fraglich, ob theoretisch erwartete Quanteneffekte überhaupt nicht nur auf atomarer Skala, sondern auch in von Menschen hergestellten Schaltkreisen beobachtbar sind. Der Gedanke an Anwendungen lag noch in weiter Ferne.

Genauso ist heute noch nicht abzusehen, welche Qubit-Plattformen in 20 Jahren vielleicht entscheidende Durchbrüche ermöglichen werden. Eine solche visionäre Idee ist die im Exzellenzcluster ML4Q verfolgte Suche nach sogenannten Majorana-Qubits. Gemäß theoretischer Vorhersagen könnten diese eine um Größenordnungen bessere Güte erreichen als heute üblich. „Kerngedanke ist dabei der sogenannte topologische Schutz“, erklärt Reinhold Egger, ein führender Theoretiker an der Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf. „Normalerweise sind die in Qubits gespeicherten Quantenzustände extrem fragil. „Bei topologisch geschützten Qubits lässt sich eine Veränderung des Zustands konzeptionell jedoch mit der Umwandlung eines Badeballs in einen Schwimmring vergleichen. Eine kleine Verformung kann da nichts ausrichten.“

Leider existiert dieses revolutionär neuartige Qubit bislang nur in theoretischen Entwürfen. Die Arbeitsgruppe um Yoichi Ando am Institut für Experimentalphysik der Universität zu Köln hat sich zum Ziel gesetzt, das zu seiner Realisierung erforderliche grundlegende Verständnis von Quantenmaterialien zu vertiefen und letztlich einen Informationsträger auf der Basis topologischer Materialien zu realisieren. In einer unter dem Dach des Exzellenzclusters ML4Q organisierten Zusammenarbeit entwickelt die Gruppe gemeinsam mit Expertenteams aus Düsseldorf, Bonn, Aachen und dem Forschungszentrum Jülich Basiskomponenten für topologische Qubit-Architekturen. Eine grundsätzliche Herausforderung besteht dabei in der Optimierung supraleitender Materialien so, dass sie hohe Magnetfelder tolerieren. Ein erster Durchbruch war die kürzliche Realisierung eines konventionellen Qubit, das gegenüber Magnetfeldern der Stärke von 1 Tesla widerstandsfähig blieb: „Durch diverse deutsche und europäische Förderprogramme konnten wir in Köln hervorragende Laborbedingungen schaffen, die es uns ermöglicht haben, als einzige Arbeitsgruppe in NRW neben unseren Kollegen am Forschungszentrum Jülich supraleitende Qubits zu bauen. Somit sind wir unserer Vision einen Schritt nähergekommen, tatsächlich topologisch geschützte Majorana-Qubits zu bauen“, berichtet Ando.



Die Suche nach der Basis für topologische Qubits – die sogenannten Majorana Nullmoden – läuft im Topological Matter Laboratory Cologne auf Hochtouren.
Foto: Uni Köln/ ML4Q Office © Simon Wegener

EXZELLENZCLUSTER ML4Q

„Materie und Licht für Quanteninformation“ (ML4Q) ist ein Exzellenzcluster, der im Rahmen der Exzellenzstrategie der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) seit 2019 gefördert wird. ML4Q ist ein Verbundprojekt der Universitäten Köln, Aachen, Bonn und Düsseldorf sowie des Forschungszentrums Jülich. Ziel von ML4Q ist es, neue Computer- und Netzwerkarchitekturen zu schaffen, die auf den Prinzipien der Quantenmechanik beruhen. Quantencomputer versprechen Rechenleistung jenseits derer aller klassischen Computer (z.B. für Materialforschung, Pharmazie oder Künstliche Intelligenz). Quantenkommunikation ist abhörsicher verschlüsselbar und kann helfen, sichere Kommunikationsnetzwerke zu realisieren. ML4Q bündelt die einzigartige Expertise der beteiligten Partner in drei Schlüsseldisziplinen der Physik (Festkörperphysik, Quantenoptik und Quanteninformation), um die beste Hardware-Plattform für Quanteninformationstechnologie und Blaupausen für ein funktionales Quanteninformations-Netzwerk zu schaffen.

QUANTENTECHNOLOGIEN IN NRW

SOFTWARE

QUANTENCOMPUTING BASIERT AUF VÖLLIG ANDEREM RECHENMODELL

Computer werden jedes Jahr schneller und erobern immer neue Anwendungsbereiche. Ein Quantencomputer hingegen funktioniert nicht wie ein herkömmlicher Prozessor, der einfach nur schneller ist. Der Quantenvorteil ergibt sich aus einem völlig anderem Rechenmodell.

Am Beispiel des Schachspiels wird das Problem anschaulich klar. Für jeden denkbaren Zug gibt es viele Antworten des Gegners, auf die der Spieler selbst wieder auf viele Arten reagieren kann, und so fort. Bereits nach wenigen Runden ergeben sich so mehr mögliche Partien als es Atome im Universum gibt. Sie alle nach und nach durchzugehen, um den optimalen Zug zu finden, ist für klassische Computer nicht möglich. Um Probleme dieser Art anzugehen, braucht es also neue Ansätze.

Die Gesetze der mikroskopischen Physik erlauben tatsächlich eine gänzlich neue Herangehensweise an solche Rechenaufgaben. Bereits seit dem frühen 20. Jahrhundert weiß man, dass die Quantentheorie die Existenz von sogenannten Überlagerungszuständen vorhersagt. Für ein Elektron in einem Stück Metall bedeutet das, dass man ihm keinen festen Ort zuschreiben kann. Stattdessen – und etwas vereinfacht – hält es sich an allen möglichen Orten gleichzeitig auf. „Die Grundidee des Quantencomputers besteht darin, das Konzept von Überlagerungszuständen statt auf Orte von Elektronen auf ganze Computer anzuwenden,“ erklärt David Gross, Professor für Quanteninformationstheorie an der Universität zu Köln. „Man möchte eine Überlagerung aller möglichen Rechenwege erzeugen, um so in nur wenigen Schritten Informationen über die gesamte Lösungsmenge auszunutzen zu können.“ Der Quantenvorteil ergibt sich also aus einem völlig anderem Rechenmodell.

Ob diese Idee tatsächlich trägt, war lange unklar. Das änderte sich 1994, als der US-amerikanische Mathematiker Peter Shor im Detail beschrieb, wie man mit wenigen tausenden Quantenbits die klassischen Verschlüsselungsverfahren aushebeln kann, die heute die Kommunikation im Internet vor unbefugten Mithörern schützen. Das Potential von Quantencomputern wird seit dem ernst genommen. In den folgenden Jahrzehnten wurde eine Vielzahl von möglichen Anwendungen der Quanteninformation gefunden, die, sobald praktisch realisierbar, direkten gesellschaftlichen und wirtschaftlichen Nutzen hätten. Viele Fragen im Bereich der Quantensoftware sind aber weiterhin offen und werden intensiv erforscht. Daran beteiligt sind auch Forscherinnen und Forscher aus Nordrhein-Westfalen. Einige herausragende Projekte werden im Folgenden vorgestellt.

Quantensoftware für Optimierung

Seit etwa zehn Jahren gelten Optimierungsprobleme als eine der vielversprechendsten möglichen Anwendungen des Quantencomputings. Ein Beispiel: Für die Herstellung von Gütern – vom Mikrochip bis zum Automobil – müssen Daten von Kunden, Zulieferern und den Produktionsstätten zusammengeführt werden, um die kapitalintensiven Fabriken maximal auszulasten. Diese Abläufe selbst im einstelligen Prozentbereich zu optimieren, kann zu wirtschaftlichen Vorteilen in Millionenhöhe führen. Soweit die Chancen. Doch es bleiben viele Herausforderungen. Mariami Gachechiladze, die mit Abschlüssen sowohl in Informatik wie auch in Quantenphysik im Exzellenzcluster ML4Q an interdisziplinären Fragen forscht, erklärt: „In der Informatik werden solche Optimierungen in der Klasse der sogenannten NP-schweren Rechenprobleme eingeordnet. Trotz vielversprechender Ansätze: In welchem Umfang es für sie einen Quantenvorteil gibt, und wie genau man ihn ausnutzen kann, ist immer noch Gegenstand aktueller Forschung.“

„Die Grundidee des Quantencomputers besteht darin, das Konzept von Überlagerungszuständen statt auf Orte von Elektronen auf ganze Computer anzuwenden.“

PROF. DR. DAVID GROSS, UNIVERSITÄT KÖLN

Mehrere Forschungseinrichtungen in NRW arbeiten zusammen mit akademischen und industriellen Partnern intensiv daran, die verbleibenden Fragen zu klären. Zwei durch die Bundesregierung geförderte Projekte konzentrieren sich dabei auf die Automobil- und Halbleiterindustrie: QuBRA unter Beteiligung der Universitäten Köln und Bochum sowie Q(A)2 unter Leitung des Forschungszentrums Jülich. Neben der genannten Optimierung von Produktionsabläufen analysieren die Projekte das Potential von Quantencomputern für eine Reihe von aktuellen Herausforderungen der Autobranche. Zum Beispiel: Wie lassen sich selbstfahrende Autos kollisionsfrei durch den Verkehr steuern? Und, wichtig für Hersteller, die sich zunehmend nicht als Verkäufer von Autos, sondern als Mobilitätsanbieter sehen: Wie nutzt man die eigene Flotte sowie andere Verkehrsmittel, um Kunden möglichst effizient zu befördern?

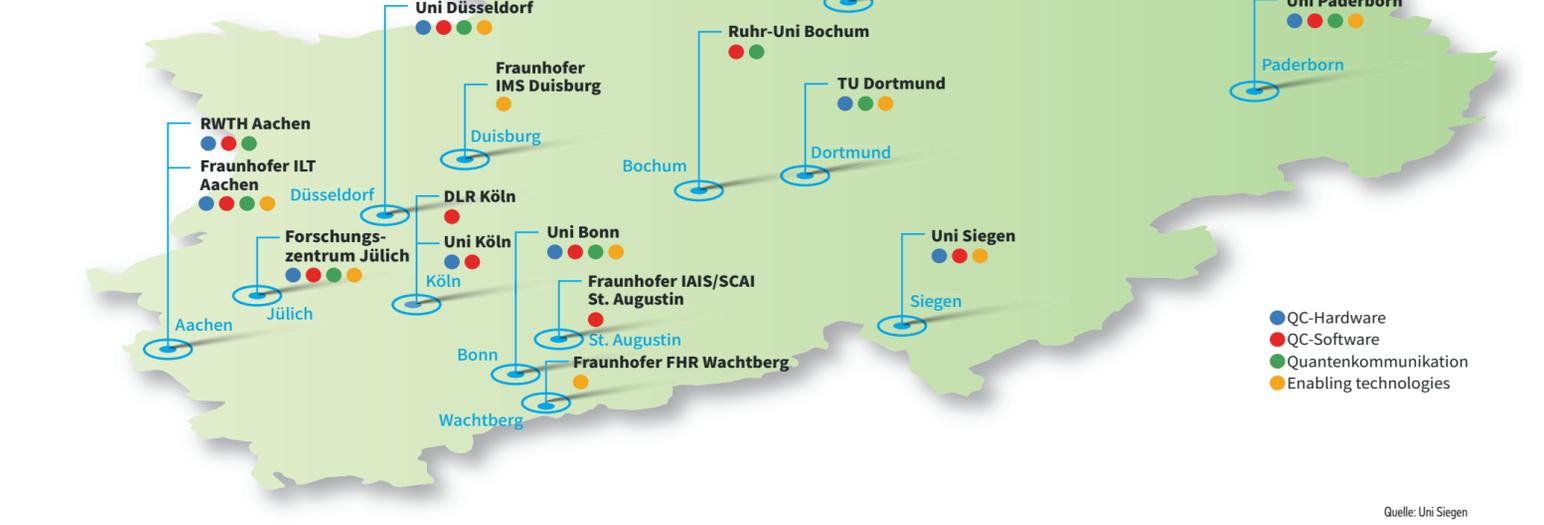
Für das autonome Fahren könnte auch eine neue Quantenmethode für das maschinelle Sehen relevant werden. Ein interdisziplinäres Team der Universität Siegen zeigte jüngst theoretisch durch Experimente auf kommerziell verfügbarer Hardware, wie Quantencomputer effizient die Bewegung von Objekten aus visuellen Daten rekonstruieren können.

Das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) hat sich bei der Entwicklung von Quantenalgorithmen für Optimierungsprobleme mit den NASA Quantum Artificial Intelligence Laboratory zusammengetan. Als Beispiel betrachteten die Forscherinnen und Forscher die Frage der optimalen Zuweisung von Flugzeugen zu Flugsteigen an großen Flughäfen. Sie führten Proberechnungen auf einem zwar eingeschränkten, aber durch die kanadische Firma D-Wave bereits vertriebenen Quantensystem durch. Tobias Stollenwerk, der am Standort Köln arbeitet, berichtet: „Durch die Experimente haben wir gelernt, welche Aspekte des Problems die

QUANTENTECHNOLOGIEN IN NRW

Um Quantentechnologien in NRW möglichst zügig und umfassend zur wirtschaftlichen Wertschöpfung zu führen, wurde im März 2019 die landesweite Koordinierungsstelle für Quantentechnologien in NRW (QT.NMWP.NRW) gegründet. Aufbauend auf dem bereits vorhandenen Netzwerk des Clusters NMWP.NRW etabliert die Koordinierungsstelle ein stetig wachsendes Netzwerk von Akteuren aus Wirtschaft und Wissenschaft, die bereits im Themenfeld Quantentechnologien aktiv sind. Die Karte zeigt diese akademische Landschaft in NRW.

<http://qt.nrw.de/>



Quelle: Uni Siegen

Leistung dieser frühen Maschinen begrenzen. Mit den Kollegen der NASA arbeiten wir derzeit an optimierten Algorithmen.“ Partner der bisher genannten Projekte waren die Entwicklungsabteilungen großer DAX-Konzerne und Forschungszentren der NASA. Für mittelständische Unternehmen wäre ein vergleichbarer F&E-Aufwand kaum tragbar. Jedoch sieht sich ein Logistiker ebenso mit schweren Optimierungsproblemen konfrontiert, wenn er zehntausende Lieferungen auf hunderte Fahrzeuge verteilen muss. Um diese Zielgruppe zu erreichen, ist die Universität zu Köln an einem weiteren Projekt – ProvideQ – beteiligt. Statt direkt mit Endanwenderinnen und Endanwendern, arbeiten die Akademikerinnen und Akademiker hier mit Unternehmen zusammen, die bereits komplizierte Algorithmen in branchenspezifische Software integrieren. Mit zwei führenden deutschen Dienstleistern dieser Art – GAMS und 4flow – soll insbesondere die Anwendbarkeit von Quantenmethoden für Optimierungsprobleme in der Logistik erforscht werden.

Die Fraunhofer-Institute für Intelligente Analyse- und Informationssysteme IAIS und für Algorithmen und Wissenschaftliches Rechnen SCAI arbeiten daran, die Vorteile von Quantenalgorithmen möglichst früh wirtschaftlich nutzbar zu machen – auch mittels Brückentechnologien. In den Worten von Thomas Sodemann, Leiter des Geschäftsfelds High Performance Computing des SCAI: „Schon die Material- und Produktionsplanung einer Brauerei würde jeden aktuell erhältlichen Quantencomputer überfordern.“ Um die Wirtschaft dennoch auf kommende Generationen großer Quantencomputer vorzubereiten, arbeiten die Forscherinnen und Forscher an zunächst klassischer Hardware, die Probleme bereits in einem Format entgegennimmt, das von Quantencomputern lesbar wäre. So können Anwenderinnen und Anwender Erfahrung mit dieser Formulierung sammeln und zu einem späteren Zeitpunkt direkt auf Quantenhardware umsteigen.

Quantensimulation

Computer, die die Gesetze der Quantenmechanik ausnutzen, sind rechenstärker als klassische Geräte. Das bedeutet im Umkehrschluss, dass herkömmliche Computer nicht in der Lage sind, quantenmechanische Systeme effizient zu simulieren. Dies ist ein großes Problem in den Materialwissenschaften und in der Chemie, die beide atomare Eigenschaften von Stoffen oder Substanzen betrachten. Etwa bei der Suche nach medizinischen Wirkstoffen oder auch Materialien, die elektrische Energie besonders verlustfrei transportieren und speichern können. Es wäre vorteilhaft, möglichst viele mögliche Kandidaten am Computer auf ihre Eigenschaften hin zu untersuchen, ohne aufwendig Prototypen im Labor herzustellen und zu analysieren.

Bereits in den 1980er-Jahren speulierte der Nobelpreisträger Richard Feynman, dass man gut kontrollierbare Quantensysteme verwenden könne, um das Verhalten beliebiger Materialien zu simulieren. Heute ist dieser Ansatz unter dem Begriff der Quantensimulation bekannt. Der Exzellenzcluster ML4Q arbeitet an verschiedenen Aspekten von Quantensimulatoren. Ein langfristiges Ziel von ML4Q ist die Entwicklung sogenannter topologischer Materialien, die den Bau besonders fehlerarmer Quantenschaltkreise ermöglichen würden. Um geeignete Materialien schon frühzeitig zu identifizieren und zu testen, zielen Experimente aus Bonn – unterstützt von Theorie aus Bonn und Köln – darauf ab, topologische Zustände in

leichter zu kontrollierenden atomaren und photonischen Quantengasen zu simulieren.

Näher an der Anwendung ist ein Gemeinschaftsprojekt des Exzellenzclusters mit Quantenchemikern des Leverkusener Werkstoffherstellers Covestro. Dort wird erforscht, wie man Eigenschaften komplizierter Moleküle bereits auf mittelgroßen und fehleranfälligen Quantencomputern simulieren kann. Ein weiteres Beispiel: Das Institut für Werkstoff-Forschung des DLR in Köln will zukünftig die Phasendiagramme von neuen Legierungen mittels Quantensimulationen berechnen.

Die Theorie von Quantensimulationen wird im Fachbereich Informatik der Universität Paderborn erforscht. Dort wurden neue Algorithmen für die Berechnung von Tieftemperatureigenschaften von Vielteilchensystemen entwickelt – aber auch Einschränkungen entdeckt. Sevag Gharibian konnte mathematisch nachweisen, dass es bestimmte Verhaltensmuster großer Quantensysteme gibt, die sich prinzipiell der Berechenbarkeit entziehen.

Qualitätssicherung

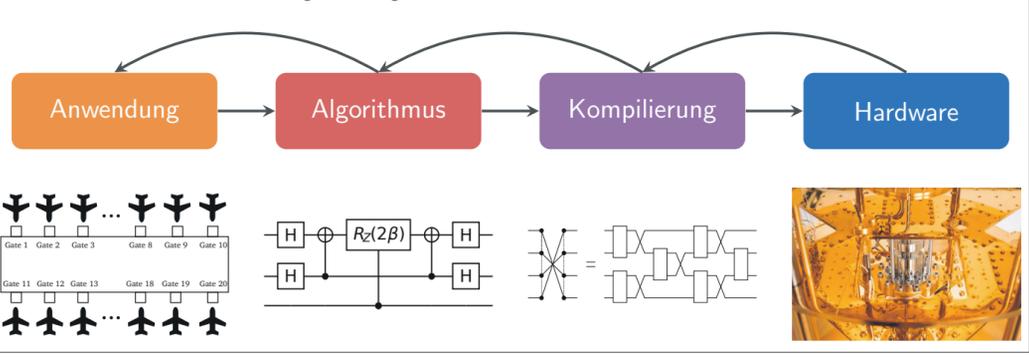
Quantencomputer befinden sich noch in der Phase früher Prototypen. Daher ist es besonders wichtig, Methoden bereitzustellen, die Fehlerquellen identifizieren und charakterisieren können. Die Deutsche Forschungsgemeinschaft finanziert im Rahmen des renommierten Emmy-Noether-Programms eine Nachwuchsgruppe an der Universität Düsseldorf, die sich speziell um diese Fragen kümmert. „Ein Ziel ist, die schrittweise Verbesserung und die Kalibrierung von Quantenbits zu ermöglichen“, erklärt Projektleiter Martin Kliesch. „Wichtig ist aber auch, eine objektive Vergleichbarkeit der Leistungsfähigkeit verschiedener Hardware-Ansätze herzustellen.“ Praktisch werden die Methoden der Arbeitsgruppe zum Beispiel zur Charakterisierung eines neuartigen Quantencomputers mit gespeicherten Ionen genutzt, dessen Entwicklung von der Universität Siegen koordiniert wird.

Die Ausgründung Quise aus dem Forschungszentrum Jülich verfolgt ein ähnliches Ziel. Sie entwickelt eine Software, die durch maschinelles Lernen die Fehlerquellen von Quantenhardware erfasst. So können Flaschenhälse identifiziert werden – also spezifische Aspekte eines Prototyps, die eine verbesserte Leistung begrenzen. „Was wäre, wenn wir in einem großen Kraftakt die Steuerungssoftware überarbeiten würden? Oder sollen wir lieber an der Fehlerrate arbeiten? Fragen dieser Art soll das Programm auf Knopfdruck beantworten“, erklärt Shai Machnes vom Forschungszentrum Jülich das Konzept.

Große Meilensteine der Entwicklung von Quantencomputern wurden in der Vergangenheit immer wieder kritisch hinterfragt. So zum Beispiel, als Google 2019 verkündete, erstmalig einen Quantencomputer für eine klassisch unlösbare Aufgabe eingesetzt zu haben. Bis heute wird kontrovers diskutiert, ob die Fähigkeiten klassischer Computer dabei wirklich fair berücksichtigt wurden. Daraus ergibt sich die Notwendigkeit, objektive Protokolle zum Nachweis klassisch unmöglicher Rechenaufgaben zu entwickeln. Eines der stärksten Protokolle dieser Art, das Gaussian Boson Sampling, wurde von Expertinnen und Experten der Universität Paderborn mitentwickelt und hat international die erste Realisierung eines photonischen Quantenvorteils ermöglicht. Die Universität Köln erforscht derzeit maßgeschneiderte Nachweise für den am Forschungszentrum Jülich entstehenden Quantencomputer QSolid.

PRINZIP DES HARDWARE-SOFTWARE-CODESIGN

Um einen Quantenvorteil für eine nützliche Anwendung zu erzielen, ist eine enge Zusammenarbeit von Hardware- und Softwareforschung notwendig.



Quelle: DLR/Forschungszentrum Jülich

Software-Engineering

Neben neuen Algorithmen gilt es, Programmiersprachen, Werkzeuge zur Softwareentwicklung sowie die Ausbildung von Programmierinnen und Programmierern an das Quantenzeitalter anzupassen. Wer heute klassische Computerprogramme entwickelt, muss sich über die Details der Hardware keine Gedanken machen. Oft läuft die gleiche Software auf Mobiltelefonen, Laptops oder Supercomputern. Quantencomputing ist noch weit von diesem komfortablen Entwicklungsstadium entfernt. Auf abschließbare Zeit wird es notwendig sein, Quantensoftware an die Fähigkeiten und Einschränkungen der Maschinen anzupassen, auf der sie ausgeführt werden soll. Trotzdem ist es jetzt schon sinnvoll, Methoden zu erforschen, die Software- und Hardwareentwicklung so weit wie möglich voneinander unabhängig machen.

In einem Projekt des Instituts für Softwaretechnologie des DLR und des Forschungszentrums Jülich wird daran gearbeitet, die Erzeugung von Quantenschaltkreisen für Planungsprobleme zu automatisieren. Programmierinnen und Programmierer müssen dann nur noch die groben Eigenschaften der Hardware angeben, z.B. die Rate von Ausführungsfehlern, die kompensiert werden müssen, oder das genaue Verdrahtungsschema der Quantenbits. Ein sogenannter Quanten-Compiler übernimmt dann automatisch die Übersetzung in eine optimale Sequenz von Befehlen. Moderne klassische Entwicklungsumgebungen bieten Hilfestellungen, um Programmierfehler zu vermeiden. Wie in George Orwell's fiktivem Neusprech sollen Computersprachen so gestaltet werden, dass falsche Aussagen grammatikalisch unmöglich sind. Ein Experte auf diesem Gebiet ist Michael Walter, der zuvor in Stanford und am Amsterdamer Institut für Quantensoftware an Quantenversionen dieser Technologie gearbeitet hat. Seit Januar setzt er seine Forschung an der Ruhr-Universität in Bochum fort. In Siegen arbeitet der Mathematiker Mohamed Barakat daran, klassisches und Quantencomputing in einer vereinheitlichten Sprache – der sogenannten Kategorientheorie – zu formulieren. Auch die Industrie hat die Notwendigkeit erkannt, Quantensoftware-Engineering zu professionalisieren. So haben BMW und die RWTH Aachen kürzlich einen Vertrag über die Finanzierung einer Stiftungsprofessur auf diesem Gebiet unterschrieben.

Quantum-Cloud

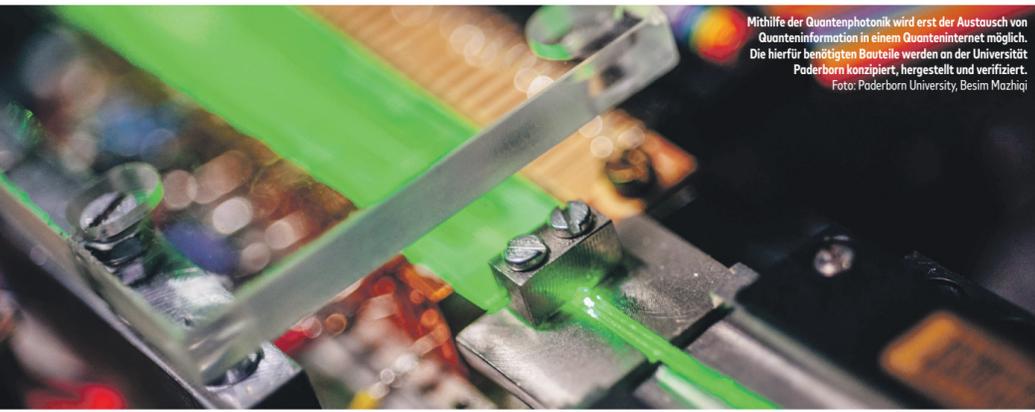
Quantencomputer für zu Hause oder als Smartphone sind aus heutiger Sicht kaum vorstellbar. Auf lange Sicht hin wird es sehr aufwendig bleiben, Quantenhardware zu betreiben. Die Fehleranfälligkeit von Quantenbits gegenüber kleinsten Störungen stellt extreme Anforderungen an die Abschirmung und Kühlung der Geräte. Auch Anwender aus Industrie und Wissenschaft werden voraussichtlich kaum selbst Quantencomputer anschaffen, sondern auf zentrale Dienstleister – Cloudanbieter – zugreifen. Damit dies reibungslos abläuft, finanzieren Bund und Land seit 2019 den Aufbau der Jülicher Nutzer-Infrastruktur für Quantencomputing (JUNIQ) am Jülicher Supercomputer Center. „Über diese Infrastruktur wird eine ganze Palette von Systemen zur Verfügung gestellt – Quantencomputer und Quantensimulatoren sowie Quantenemulatoren. Jeder Nutzer kann wählen, welches am besten für ihn geeignet ist“, sagt die Jülicher Physikerin Kristel Michielsens, die den Aufbau von JUNIQ koordiniert. Seit Mitte Januar beherbergt JUNIQ als einziger Standort außerhalb von Nordamerika einen Quantenannealer der Firma D-Wave mit mehr als 5000 Qubits.

Investition in Ausbildung

Alle Investitionen in Quantenhard- und Software können nur dann erfolgreich genutzt werden, wenn gleichzeitig entsprechend qualifizierte Fachkräfte ausgebildet werden. Eine besondere Herausforderung liegt darin, dass Quantencomputing sowohl Expertise in der Informatik wie auch in der Physik erfordert. An vielen Standorten – zum Beispiel in Aachen, Bochum, Köln, Paderborn und Siegen – arbeiten die beiden Fachbereiche daher zunehmend eng zusammen, um entsprechende Angebote im Masterstudium anzubieten.

Quantentechnologie in NRW – Anzeigensonderveröffentlichung
VERANTWORTLICH FÜR DEN REDAKTIONELLEN INHALT:
 Prof. Dr. Holger Burckhart, Universität Siegen,
 Adolf-Reichwein-Straße 2, 57076 Siegen
REALISATION: Markt1-Verlagsgesellschaft mbH, 45128 Essen
LAYOUT: Markt1-Verlagsgesellschaft mbH
ANZEIGEN: Axel Springer Regionalvermarktung, Essen

QUANTENTECHNOLOGIEN IN NRW



Mithilfe der Quantenphotonik wird erst der Austausch von Quanteninformation in einem Quanteninternet möglich. Die hierfür benötigten Bauteile werden an der Universität Paderborn konzipiert, hergestellt und verifiziert. Foto: Paderborn University, Besim Mozhiqi

KOMMUNIKATION

MEHR SICHERHEIT MIT QUANTENKOMMUNIKATION

Alltäglich kaufen Millionen Menschen im Internet ein, tätigen dort Überweisungen und versenden beruflich wie privat E-Mails. Verschlüsselungsverfahren sorgen dabei für Sicherheit vor Hackern.

Schon 1994 zeigte der US-amerikanische Mathematiker Peter Shor in einer bahnbrechenden Arbeit, dass bereits Quantencomputer mit wenigen tausenden Qubits bekannte klassische Verschlüsselungsverfahren prinzipiell angreifbar machen. Dieser quantenalgorithmische Paukenschlag zeigte eindrücklich, dass das Quantencomputing im Bereich der Cybersicherheit neben Chancen auch Risiken birgt. Diesen Risiken kann man mithilfe von Quantenkommunikationsmethoden begegnen. Doch was versteht man unter Quantenkommunikation? Unter diesem Stichwort ordnet man mehrere Themenfelder ein: zum einen die Möglichkeit, mittels Verwendung von Quantenzuständen abhörsicher zu kommunizieren (sogenannte Quantenkryptographie, insbesondere Quantenschlüsselverteilung). Zum anderen gehört in den Bereich der Quantenkommunikation auch die Übertragung von Quantensystemen als Träger von Information, entweder zwischen zwei Parteien oder auch in einem komplizierten Quantennetzwerk.

Quantenschlüsselverteilung

Bei der Quantenschlüsselverteilung ist das Ziel, einen geheimen klassischen Zufallsschlüssels (d.h. eine Folge von Nullen und Einsen) zu erstellen, indem man bestimmte Quantenzustände und bestimmte Messungen verwendet. Diese Idee entwickelten Charles Bennett und Gilles Brassard bereits 1984.

Der geheime klassische Zufallsschlüssel ermöglicht dann beweisbar sichere Verschlüsselung mit der Vernam-Chiffre (Addieren von Nachricht und Schlüssel). Die Unmöglichkeit, einen unbekanntem Quantenzustand perfekt zu kopieren („No-Cloning-Theorem“), führt dazu, dass nur die rechtmäßigen Parteien die volle Information über den Schlüssel haben: Ein Spion kann die gesendeten Zustände nicht fehlerfrei duplizieren, eine Kopie weitersenden und die andere auslesen. Jede Interaktion eines Spions führt notwendiger-

weise eine Störung ein, die entdeckt werden kann. Das bedeutet, dass die Sicherheit der Quantenschlüsselverteilung auf den Gesetzen der Quantenmechanik beruht.

Die Arbeitsgruppe von Prof. Dagmar Bruß von der Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf untersucht im EU-Quantera-Verbundprojekt QuICHE die Frage, ob in der Quantenkryptographie die Verwendung von Quantensystemen mit mehr als zwei Freiheitsgraden (sogenannte Qudits) einen Vorteil gegenüber Qubits bietet. Ein Beispiel hierfür sind „Qutrits“, also mit Werten 0, 1 und 2, anstatt von den üblichen „Qubits“ mit nur 0 und 1. Hier gibt es einen Trade-Off: Zwar macht die Verwendung von mehr Freiheitsgraden es schwerer für einen Spion, Information über den gesendeten Quantenzustand zu erlangen. Aber die Erzeugung und Kontrolle solcher komplexerer Quantensysteme ist auch experimentell schwieriger zu realisieren. Dagmar Bruß, Leiterin des Instituts für Theoretische Physik III der Heinrich-Heine-Universität, erklärt hierzu: „Für konkrete Implementierungen ist zu erwarten, dass dieser Trade-Off zu einer optimalen Anzahl von Freiheitsgraden führt, die aber erst nach einer Gesamtanalyse ermittelt werden kann. Vielleicht ist die Antwort ja 42, wie im Buch ‚The Hitchhiker’s Guide to the Galaxy‘?“

Ein innovativer Ansatz für die beschriebene hochdimensionale Kodierung von Quantensystemen wird von Prof. Christine Silberhorn und ihrem Team an der Universität Paderborn entwickelt. Durch eine maßgeschneiderte Erzeugung und die gezielte Manipulation von Quantenlicht entsteht ein Quanten-„Alphabet“ unterschiedlicher Frequenzspektren. Sinngemäß können diese als „Regenbögen“ verstanden werden, die als Buchstaben für eine hochdimensionale Informationsübertragung dienen. Dabei sind diese Konzepte mit existierenden Glasfaser-Architekturen kompatibel und robust gegenüber typischen Störeinflüssen in Glasfaserkabeln. Weiterhin können neuartige Rauschfilter realisiert werden, die in Zukunft eine Satelliten-gestützte Quantenkommunikation auch während des Tages ermöglichen sollen. Derzeit befindet sich in Paderborn eine innerstädtische Quantenkommunikationsstrecke im Aufbau, in der diese Konzepte in einer anwendungsnahe Umgebung erprobt werden sollen.

ENABLING TECHNOLOGIES

SCHLÜSSELTECHNOLOGIEN FÜR QUANTENCOMPUTING

Mit Umsetzung revolutionärer Ideen aus der Forschung auf dem Feld der Quanteninformationswissenschaften steht die Gesellschaft derzeit an der Schwelle einer hoch innovativen Technologieentwicklung, die die gezielte Kontrolle einzelner Quantensysteme nutzt, um echte Quantenfunktionalitäten zu erreichen.

Neben dem Quantencomputing und der Quantenkommunikation ist derzeit ein hohes technologisches Potential in Anwendungsfeldern der ultrapräzisen Quantenmesstechnik und -sensorik absehbar. Die Umsetzung der theoretischen Konzepte stellt hierbei höchste Anforderungen an verwendbare Materialien und taugliche Systeme und lässt sich oft nur in Laboraufbauten mit hohem technischem Aufwand und sehr speziell geschultem Personal durchführen.

Die Etablierung der Technologien am Markt und die Skalierung der Systeme erfordern daher, neuartige Gerätetechnik zu entwickeln, und bedürfen umfangreicher Forschungsarbeiten und neuer Ausbildungskapazitäten. Die sehr spezifischen und äußerst anspruchsvollen Anforderungen der verschiedenen Quantentechnologien benötigen dabei auf verschiedenen komplementären Gebieten, wie der Photonik, Hochfrequenztechnik und Kryotechnik, einen wissenschaftlichen und technischen Fortschritt.

Basistechnologie Photonik

Die klassische Photonik ist hierbei eine der prominentesten Schlüsseltechnologien der modernen Informationsgesellschaft. Sie ermöglicht beispielsweise das Internet, bildgebende Verfahren und Messtechniken wie die optische Abstandsmessung. Die Quantenphotonik wird in Zukunft eine ähnliche Rolle für Quantentechnologien einnehmen und ist die einzige Plattform, die den Austausch von Quanteninformation in einem Quanteninternet ermöglicht. Mit der Entwicklung integrierter optischer Schaltkreise, d.h. mikro- und nano-strukturiertes Chipsysteme, können skalierbare komplexe photonische Strukturen zur Realisierung von Quantenprozessoren oder Quantennetzwerken oder auch neuartiger Sensoren realisiert werden.

In Nordrhein-Westfalen existiert für die Entwicklung und Fertigung von optischen Chipsystemen an den beiden Universitäten Paderborn und Münster die Infrastruktur für Mikro- und Nanostrukturierung in hochspezialisierten Reinräumen, um neuartige Schaltkreise und Chipsysteme für photonische integrierte Quantentechnologien voranzutreiben.

An der Universität Paderborn existiert beispielsweise seit über 30 Jahren eine international sichtbare Forschung für die Entwicklung neuer Technologien im Bereich nichtlinearer integrierter Optik und nanostrukturierter Halbleiterbauelemente. Diese wird nunmehr strategisch seit über zehn Jahren – gefördert durch verschiedene nationale und europäische Forschungsprojekte – für die Etablierung photonischer Quantentechnologien genutzt und

weiter ausgebaut. „Mit dem von Bund und Land geförderten Forschungsbau PhoQSLab werden wir ab 2024 eine einmalige Infrastruktur für die Skalierung photonischer Quantensysteme in Paderborn bekommen“, freut sich Christine Silberhorn, Sprecherin des PhoQS in Paderborn.

Die Universität Münster betreibt die Münster Nanofabrication Facility (MNF) als führendes Reinraumzentrum für die Präzisionsnanofertigung auf molekularen Längenskalen. An der MNF steht ein einmaliger Gerätepark zur Verfügung, der als führender Standort für die Nanoprozessierung und Nanoanalytik Hochtechnologie für die Quantenwissenschaften gilt. Die MNF wird im Rahmen internationaler Großprojekte gefördert und dient insbesondere für Start-up-Unternehmen im Bereich der Quantentechnologien als Produktionsstandort für Pilotlinien und Kleinserien zur Verfügung. In Münster wird derzeit in der Physik ein neues Department für Quantentechnologien eingerichtet, das am Center for Nano-Technology (CeNTech) angesiedelt ist und in dem interdisziplinär forschende Arbeitsgruppen eine zukunftssträchtige Hochtechnologie vorantreiben. Als Private-Public-Institution bietet das CeNTech einen direkten Zugang zu Unternehmen und Start-ups, die gemeinsam unter einem Dach Forschung und Entwicklung betreiben, und ist damit eine ideale Plattform für den Transfer von Wissenschaft in die Gesellschaft.

An der TU Dortmund werden neue Quantum Hardware-Konzepte zur Etablierung einer neuen Quantentechnologie auf der Basis von Halbleitern entwickelt. Diese Materialklasse bildet die Grundlage für die aktuelle Elektronik und Optoelektronik, so dass eine unmittelbare technologische Anschlussfähigkeit gegeben ist, auch durch etablierte Herstellungstechnologien. Mit der Raith GmbH ist der Technologieführer im Bereich Nanofabrikation in Dortmund beheimatet, was starke Synergieeffekte im Hinblick auf die Entwicklung von „quantum enabling“-Technologien ergibt. Halbleiter eröffnen die Möglichkeit einer ultraschnellen Manipulation von Qubits mit Lichtpulsen auf Zeitskalen von einer Billionstel Sekunde und darunter. Daher gehen Halbleiterphysik und ultraschnelle optische Spektroskopie eine natürliche Symbiose ein. Ein weiteres Kernthema in Dortmund ist die Verifikation der Funktion von quantentechnologischen Bauteilen, die im Rahmen des mit der Universität Paderborn gemeinsamen Sonderforschungsbereichs TRR142 entwickelt wird. Durch sogenannte Quantenzustands- und Prozessomographien lassen sich Qubit-Qualitäten und die Güte des Speichervorgang analysieren. In Dortmund werden Spektroskopietechniken entwickelt, die für Quantentomographien an Halbleitersysteme tauglich sind. Hierbei werden Polaritonen genutzt – hybride Teilchen aus Licht und Materie, die sich sehr langsam durch Halbleiterstrukturen bewegen und direkt an externe Lichtfelder koppeln, also ideale Schnittstellen zwischen Licht und Materie sind. Die Universität Bonn hat im Bereich Photonik ein Alleinstellungsmerkmal durch die enge Vernetzung von Quantenoptik mit Ato-

me und Festkörperphysik, die durch Berufungen im Rahmen des Exzellenzclusters ML4Q weiter ausgebaut wird, um die Kollaboration zwischen Materialforschung und Quantentechnologie, beispielsweise bei der Entwicklung von topologischen und 2D-Materialien, zu intensivieren. In der Folge eines EU-Programms soll Bonn zu einem Knoten in einem europäischen Netzwerk zur Frequenzverteilung werden, das die Synchronisation großer IT-Netzwerke durch Anschluss an Atomuhren ermöglichen wird – ideale Voraussetzungen zur intensiven transdisziplinären Zusammenarbeit mit der Geodäsie. An der Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf werden wiederum mit Industriepartnern hybrid-integrierte und frequenzstabilisierte Laser zur betriebssicheren Manipulation kalter Atome für transportable Systeme entwickelt. Ziel ist es, Quantensensoren als robuste Instrumente für den Gebrauch im Feld für die Geodäsie und Geophysik auf der Basis von optischen Atomuhren weiterzuentwickeln. Es ist geplant, eine optische Atomuhr an der Geodätischen Fundamentalstation Wettzell zu betreiben, die auf diesen Quantentechnologien beruht. Die Siegerner Nano-Optik erforscht die Wechselwirkung von nanoskaliger Materie und von einzelnen Quantensystemen mit Licht. Prof. Mario Agio interessiert sich besonders für neue Quantenphänomene, die auf Längenskalen kleiner als die Wellenlänge des Lichts auftreten. „Hierzu gehören neuartige Quantenemitter in nanoskaligen Resonatoren, welche mit ultraschnellen Techniken untersucht werden“ erläutert Agio. Die Forschungen legen die Grundlage z.B. für neue Einzelphotonenquellen für die Quantenkommunikation. Prof. Haring-Bolivar aus der Elektrotechnik treibt den Bau des neuen Forschungszentrums INCYTE an der Universität Siegen voran. „Dieses wird ab Anfang 2024 eine hochmoderne Infrastruktur auch für unsere Forschung bieten“ freut sich Agio.

Vision eines globalen Quantennetzwerkes

Unter dem Stichwort „Quantennetzwerk“ versteht man die Quanten-Verallgemeinerung eines klassischen Netzwerks: Sowohl die Knoten als auch die Verbindungen des Netzwerks haben Quantennatur, d.h. sie können Quantenzustände herstellen, miteinander verknüpfen, weitersenden, speichern, empfangen, verarbeiten und messen.

Ein ferner Zukunftstraum ist die Einrichtung eines globalen Quantennetzwerkes (manchmal als „Quanteninternet“ bezeichnet), über das Quantensysteme als Informationsträger verteilt werden. Die große Herausforderung bei der experimentellen Umsetzung ist es, hierbei die typischen Quanteneigenschaften wie Überlagerung und Verschränkung nicht zu verlieren. Denn nur dann kann diese Übertragung zu den gewünschten Zwecken genutzt werden – beispielsweise zur Koordination und zum Datentransfer zwischen Quantencomputern oder zur Erstellung eines Zufallsschlüssels, wie oben beschrieben.

Bei der Übertragung über lange Distanzen (ab etwa 100 Kilometer) sind die unvermeidbaren Fehler und Verluste aber so groß, dass die wertvollen Quanteneigenschaften im Rauschen untergehen. Daher braucht man hier neue Methoden, die gewissermaßen die Quanteneigenschaften boostern sollen: sogenannte Quantenrepeater.

Im BMBF-Verbundprojekt zu Quantenrepeatern wird die nächste Generation von Bauteilen und Systemen für die Quantenkommunikation entwickelt. Die an diesem nationalen Konsortium beteiligten NRW-Partner sind die Universitäten in Bochum, Bonn, Dortmund, Düsseldorf und Paderborn.

Im Rahmen des Quantenrepeater-Verbundprojekts untersucht die Düsseldorfer Physikerin Dagmar Bruß die konzeptionelle Frage, auf welche Weise Quantenzustände möglichst effizient in einem Quantennetzwerk über große Distanzen übertragen werden können, d.h. mit einer möglichst kleinen Fehlerrate und einer möglichst großen Stabilität gegen Rauschen. Hier werden mehrere Methoden theoretisch analysiert – meist sind dies Quanten-Abwandlungen von klassischen Methoden, wie z.B. Quantenfehlerkorrektur, Destillierung, Multiplexing, Netzwerkkodierung etc. Welche Kombination dieser Methoden am vielversprechendsten ist, wird wiederum von der physikalischen Implementierung und insbesondere von der Performance der Quantenkomponenten abhängen. Mehrere NRW-Standorte forschen an der Entwicklung von wichtigen Bausteinen für Quantenrepeater und Quantennetzwerke: So verfolgen im Rahmen von ML4Q die Professoren Hendrik Bluhm und Jeremy Witzens (beide von der RWTH Aachen) in Zusammenarbeit mit Forscherinnen und Forschern der Universität Bonn, der Ruhr-Universität Bochum, des Fraunhofer-Instituts für Lasertechnik

in Aachen und des Forschungszentrums Jülich die Übertragung von Qubitzuständen auf Photonen (fliegende Qubits).

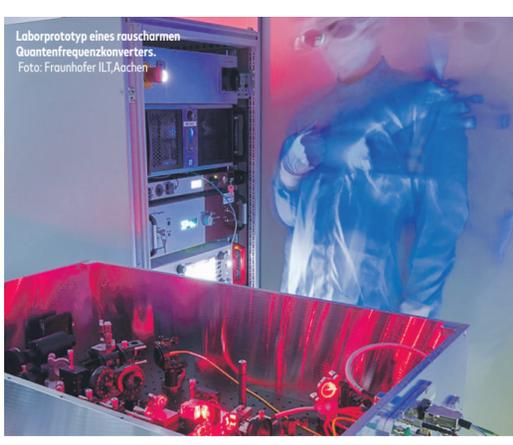
Die Westfälische Wilhelms-Universität (WWU) Münster ist wiederum führend in der Erforschung leistungsfähiger Einzelphotonendetektoren, die skalierbar in Chipsysteme integriert werden können und eine Schlüsselkomponente für photonische Quantenkommunikation in Netzwerken darstellen. Die dafür notwendigen Komponenten werden vollständig an der WWU nanogefertigt. Diese Arbeit wird durch den European Research Council (ERC) und die Quanteninitiative des BMBF gefördert.

Der Ansatz bietet die Möglichkeit, Hochtechnologie aus dem Labor in industrielle Prozessketten zu integrieren. So ist aus Transfer-Aktivitäten das erfolgreiche Quantentechnologie-Start-up Pixel Photonics hervorgegangen, welches als einziges Unternehmen in Deutschland supraleitende Quantendetektoren (SNSPDs) realisiert und vertreibt. Gemeinsam mit führenden Industriepartnern aus der Elektronik, Kryotechnik und der integrierten Optik entwickelt Pixel Photonics Systemkomponenten für die abhörsichere Kommunikation mit höchster Bandbreite.

Eine große Herausforderung bei der Realisierung eines Quantenrepeaters ist die Bereitstellung von Quantenspeichern, die einen darin eingeschriebenen quantenmechanischen Zustand möglichst lange am Leben halten können. Spins, deren freie Beweglichkeit durch dreidimensionalen, räumlichen Einschluss in Quantenstrukturen unterdrückt wird, besitzen die hierfür notwendigen hervorragenden Kohärenzeigenschaften. Die Attraktivität von Spins für Quantentechnologien zeigt sich auch darin, dass an der Technischen Universität Dortmund mit dem Sonderforschungsbereich TRR 160 „Kohärente Manipulation wechselwirkender Spinanregungen in maßgeschneiderten Halbleitern“ ein international ausgerichteter Forschungsverbund mit 20 Projekten zu verschiedensten Ansätzen zur Nutzung von Spins im Rahmen von Quantentechnologien eingerichtet ist. Dabei werden insbesondere auch grundlegende neue Mess- und Manipulationsverfahren erforscht, neben der Weiterentwicklung der Hardware. Jüngste Untersuchungen im Rahmen dieses Sonderforschungsbereichs belegen, dass sich der Spin eines Elektrons in Halbleiterstrukturen, die ein Elektron in allen drei Richtungen auf kleinstem Raum einschließen – sogenannten Quantenpunkten – als temporärer Speicher von Quanteninformation eignen könnte. Zum Beispiel dann, wenn die Quanteninformation auf die umgebenden Kernspins übertragen wird oder der Elektronspin in eine stark polarisierte Kernspinumgebung eingebettet wird. Gelingt eine solche Speicherung, könnte das einen Durchbruch im Bereich der Quantenkommunikation darstellen, bei der von Photonen transportierte Quanteninformation vorübergehend in Speichereinheiten verlässlich abgelegt werden muss.

Post-Quantenkryptographie

Forschende am Exzellenzcluster Cyber Security in the Age of Large-Scale Adversaries (CASA) der Ruhr-Universität Bochum arbeiten mit Hochdruck an neuen Sicherheitsstandards, die für das Quantenzeitalter gerüstet sind. „Wir erforschen neuartige klassische Verschlüsselungsmethoden, die nachhaltig Schutz gegen Angreifer bieten, selbst wenn diese über einen Quantencomputer verfügen“, erklärt Eike Kiltz, Professor für Kryptographie und Sprecher des Exzellenzclusters in Bochum. „Dazu studieren wir Quantenalgorithmen aus dem Blickwinkel der Sicherheitsforschung. So ergeben sich auch neue Einsichten in die Leistungsfähigkeit von Quantencomputern.“



Laborprototyp eines rauscharmen Quantenfrequenzkonverters. Foto: Fraunhofer ILT Aachen

Technologieplattform Mikroelektronik

Für Quantencomputer ist die Mikroelektronik eine zentrale Basistechnologie und ermöglicht die Skalierung, Verringerung der Störanfälligkeit und Senkung der Kosten. Das Fraunhofer-Institut für Mikroelektronische Schaltungen und Systeme IMS forscht an skalierbaren Technologien, wie Einphotonen-Detektoren, sowie an industrienahen CMOS-kompatiblen Fertigungsmethoden für Qubits. Wichtige Themen sind Materialauswahl, Prozessentwicklungen und Charakterisierungen, die Implementierung notwendiger Ansteuerlektronik und Integrationskonzepte für die Kryoelektronik in die Quanten-Hardware. Das Fraunhofer IMS entwickelt so neue Schaltungs- und Sensorkonzepte und ist aufgrund seines umfangreichen Know-hows, dem Zugang zur Forschungsfabrik Mikroelektronik und der eigenen CMOS- und Mikrosystem-Technologie ein weltweit anerkannter Forschungs- und Entwicklungspartner für Industrie und Gesellschaft.

Essentiell für das Auslesen und die Implementierung von Rechenoperationen auf zukünftigen Quantencomputern ist die Beherrschung der Hochfrequenztechnik. Hier bringt das Fraunhofer-Institut für Hochfrequenzphysik und Radartechnik FHR seine Expertise in den Bereichen Chip Design und Messtechnik für kryogene Temperaturen ein. Das Institut erforscht die Entwicklung und den Betrieb von Hochfrequenztechnologien in einem breiten Frequenzspektrum bis in den Terahertzbereich sowie Kryotechnologien und das Verhalten von elektronischen Bauteilen bei Tieftemperaturen.

Die Fraunhofer-Institute in NRW erarbeiten gemeinsam mit Forscherinnen und Forschern sowie Unternehmen Lösungen für die Umsetzung der Quantentechnologien, wobei sie früh den Brückenschlag zwischen exzellenter Grundlagenforschung und Unternehmen herstellen und so ein wachstumsstarkes Innovationsökosystem für Quantentechnologien befördern. Entsprechend ist Fraunhofer gemeinsam mit dem Forschungszentrum Jülich die treibende Kraft bei der Umsetzung eines Center of Quantum Science and Engineering (CQSE) im Rheinischen Revier.