RWTH AACHEN UNIVERSITY

RWTH THEMEN

Forschungsmagazin **2/2020**

Profilbereich „Information & Communication Technology“

Marian Barsoum, Hendrik Bluhm

Materie und Licht für Quanteninformation

Forschung mit regionalen Partnern

"Matter and Light for Quantum Computing" (ML4Q) is a new Excellence Cluster funded within the Excellence Strategy by the German Research Foundation (DFG) since January 2019. It is a cooperation by the universities of Cologne, Aachen, and Bonn, as well as Forschungszentrum Jülich.
Quantum computing promises unprecedented information processing capabilities by pursuing a fundamental paradigm shift in how information is represented – using quantum states rather than discrete numbers. This pursuit requires research and technology in the fields of solid-state physics, quantum optics, and quantum information science. ML4Q brings together the best researchers from four institutions in the federal state of North Rhine-Westphalia – the universities of Cologne, Aachen, and Bonn, as well as Forschungszentrum Jülich – to tackle the multidisciplinary issue of quantum computing. The goal of the cluster's research is to develop new computing and networking architectures using the principles of quantum mechanics. The scientific structure of ML4Q spans four focus areas, each addressing a specific set of problems relevant to the cluster's mission. All focus areas include theoretical as well as experimental components and transcend the boundaries of disciplines and institutions: fundamentals and technology for topological interfaces; Majorana qubits; decoherence, measurements, and error correction; and quantum connectivity. Essentially, this breakdown means that ML4Q is investigating quantum computing in terms of light, matter and information.

In Quantenrechnern wird Information durch Quantenzustände repräsentiert. Diese neue Generation von Computern könnte zur Lösung unterschiedlicher Herausforderungen beitragen, beispielsweise zur Entwicklung neuer Werkstoffe und Pharmazeutika, der Gewährleistung sicherer Kommunikation oder der Optimierung von Logistik-Arbeitsprozessen. Für solche Anwendungen würden Quantencomputer über Rechen- und Netzwerkleistungen weit jenseits existierender Technologien verfügen. Zusammen mit Forschungsgruppen der Universität zu Köln, der Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn und des Forschungszentrums Jülich wollen Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler der RWTH die Grundlagen für den Superrechner schaffen.
Nach Jahrzehnten rasanter Entwicklung werden fundamentale Grenzen in der Miniaturisierung von Computer-Hardware erkennbar. Heutige Transistoren haben zwar eine Größe von 10nm erreicht, gehorchen jedoch noch den Gesetzen der klassischen Physik und nehmen daher klar definierbare Zustände – also 0 oder 1 – an. Bei den Mengen an Daten, die generiert werden, und den Anforderungen an Rechenleistungen gerät das Rechnen mit Bits allmählich an seine Grenzen und wird dem Bedarf an leistungsfähiger Technologie nicht mehr gerecht.

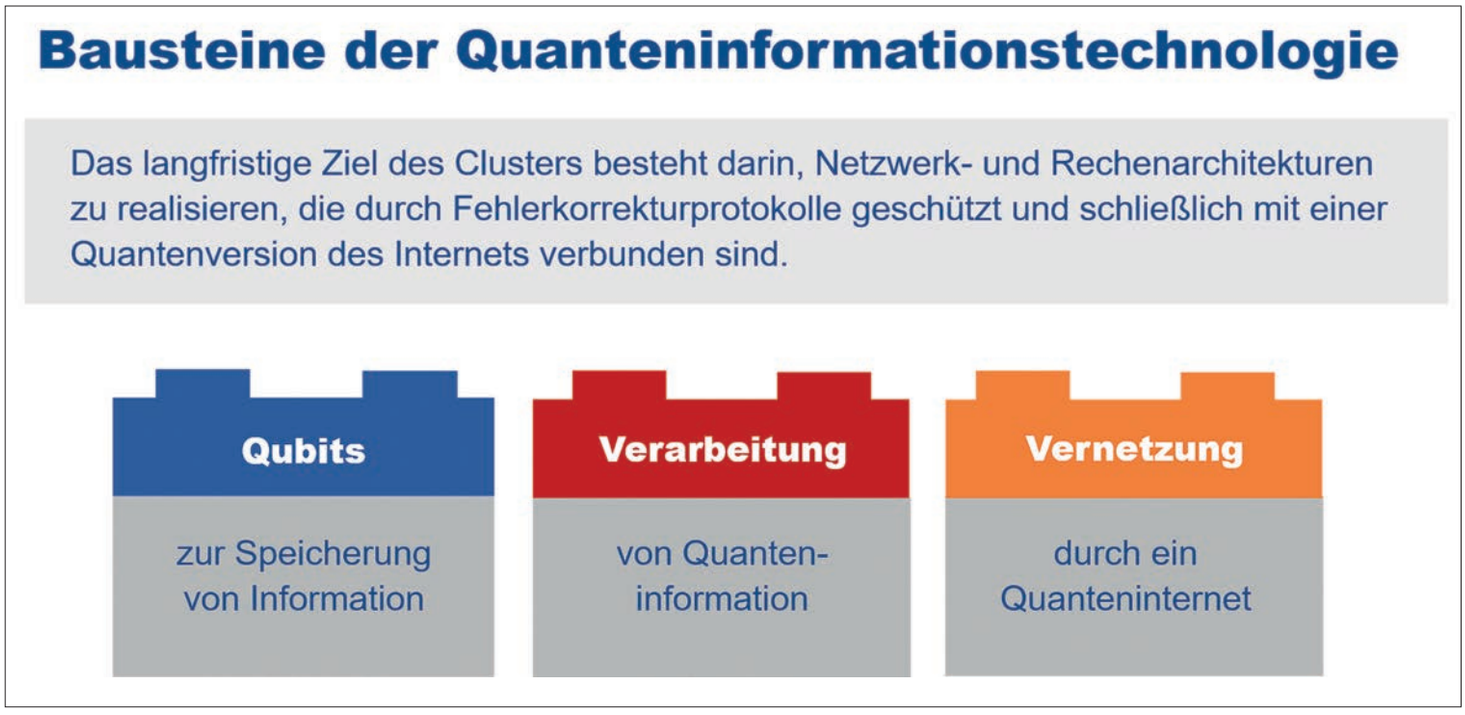

Bild 1: Die drei Elemente der Quanteninformationstechnologie werden im Exzellenzcluster ML4Q standortübergreifend und ganzheitlich erforscht.

Ein Blick in die Quantenwelt drängt sich auf

Unsere Welt besteht aber nicht aus Nullen und Einsen, sondern aus Quanten, die den Regeln der Quantenmechanik unterliegen – zumindest auf subatomarer Ebene. Im Quantencomputer ist der Transistor durch ein subatomares Objekt, beispielsweise ein Elektron, ersetzt. Das daraus resultierende Quantenbit, auch Qubit genannt, kann wie das Bit den Zustand 1 oder 0 annehmen – aber auch gleichzeitig im Zustand 1 und 0 sein sowie in theoretisch unendlichen Zuständen dazwischen. So können Quantenrechner Rechenschritte simultan erledigen und versprechen damit Rechenleistungen weit jenseits klassischer Computer für bestimmte Anwendungen.

Wissend um das Potenzial von Quanteninformationstechnologien als mächtige Werkzeuge beim Design neuer Materialien und Chemikalien oder der Gewährleistung sicherer Kommunikation engagieren sich Unternehmen sowie staatliche Forschungsprogramme, um Technologiekompetenz im Quantencomputing aufzubauen. Von derzeitigen Demonstratorsystemen über flexibel nutzbare Quantenprozessoren bis hin zur Vernetzung funktionsfähiger Quantencomputer im Quanteninternet wird es Jahre – vielleicht mehrere Dekaden – intensiver Forschung und die Beteiligung verschiedener Expertisen brauchen. Entwicklungen in der Quantenmaterialforschung werden zur Herstellung robuster Qubits benötigt, die mittels der Erkenntnisse aus der Quanteninformationsforschung messbare und fehlerfreie Rechenergebnisse liefern können. Mittels der Quantenoptik können sogenannte Quantum Links realisiert werden, die die Netzwerkfunktionalität von Quantenrechnern ermöglichen. Ausgehend von diesem Paradigma ist der Exzellenzcluster „ML4Q – Matter and Light for Quantum Computing", als Kollaboration von Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern der Universität zu Köln, der Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn, der RWTH sowie des Forschungszentrums Jülich entstanden. Hier wird das Ziel verfolgt, Architekturen zu schaffen, in denen fehlertolerante Quantencomputer modular realisiert und optisch miteinander vernetzt sind.

Mit welchen Qubits fängt man an?

Quanten besitzen eine Eigenschaft, die dafür verantwortlich ist, dass unsere makroskopische Welt eher klassisch als quantenhaft aussieht – sie sind äußerst störanfällig und zerfallen leicht in den klassischen Zustand. Man nennt dieses Phänomen Dekohärenz. Das Problem ist, dass aufgrund der Dekohärenz die elementaren Logikoperationen oft fehlerhaft sind – derzeit misslingt auch bei den am weitesten entwickelten Systemen typischerweise jede hundertste Operation mit zwei Qubits. Im Gegensatz dazu wird eine

elementare Rechenoperation auf unseren Desktopcomputern nur vernachlässigbar selten falsch ausgeführt. Um diese hohe Störanfälligkeit und Fehlerrate zu minimieren, werden zwei Lösungsansätze verfolgt. Im ersten versucht man bessere Qubits zu bauen; im zweiten sollen durch Fehlerkorrektur mit fehlerhaften Qubits zuverlässige Ergebnisse erzielt werden. ML4Q verfolgt in einem ganzheitlichen Ansatz beide Optionen. Dabei werden zwei Arten von Qubits ausführlich untersucht: Majorana-Qubits mit dem theoretisch vorhergesagten Potenzial, durch topologische Effekte eine bahnbrechende Immunität gegen Dekohärenzeffekte zu erzielen, und siliziumbasierte Quantenpunkte als ein mit der heutigen Halbleitertechnologie gut kompatibler Ansatz, siehe Infobox unten.
Das wissenschaftliche Programm von ML4Q basiert auf vier Schwerpunktbereichen und wird mit einem agilen Prozess komplementiert, der die kontinuierliche Aufnahme von neuen Projekten und Kollaborationen ermöglicht. Arbeitsziel des ersten Schwerpunktbereichs ist die Realisierung von Majorana-Quasiteilchen, die sich als Träger von Quanteninformation eignen, in topologischen Phasen von Festkörpern und kalten Atomen. Aus den Majorana-Quasiteilchen werden im zweiten Schwerpunktbereich Majorana-Qubits realisiert. Der dritte Schwerpunktbereich befasst sich mit Messprozessen und Konzepten zur Fehlerkorrektur, während der vierte Schwerpunktbereich die Verbindung verschiedenartiger Qubits und die Theorie von Quantennetzwerken entwickelt. Die Vision ist, möglichst optimal arbeitende Quanten-Recheneinheiten zu realisieren und die Grundlagen zu schaffen, um diese zu leistungsfähigen Systemen und Netzwerken verbinden zu können.

Qubit-Realisierungen

Die Eigenschaft von Qubits, den elementaren Bauelementen von Quantencomputern, ist die Fähigkeit, bei der Speicherung und Manipulation von Zuständen möglichst ideales quantenmechanisches Verhalten zu zeigen. Insbesondere müssen sie sogenannte Superpositionszustände annehmen können, welche neben Wahrscheinlichkeiten auch den kontinuierlichen Freiheitsgrad der quantenmechanischen Phase kodieren, und miteinander verschränkt werden können. Diese Verschränkung entspricht Superpositionszuständen des Gesamtsystems, so dass zum Beispiel mehrere Lösungskandidaten einer Problemstellung gleichzeitig analysiert werden können und so eine Parallelrechnung ohne Dopplung der Hardware möglich wird.
Derzeit werden viele Ansätze zur physikalischen Implementierung von Qubits verfolgt. Trotz unterschiedlicher Entwicklungsstände ist noch nicht absehbar, welcher für eine technologische Nutzung am geeignetsten ist. Mit Lasern manipulierte Ionen und Atome im Ultrahochvakuum haben nahezu ideale Eigenschaften bewiesen, würden für die Realisierung hinreichend großer Prozessoren jedoch äußerst komplexe opto-elektronische Kontrollsysteme erfordern. In ML4Q werden diese Qubits als Modellsystem und kleine aber leistungsfähige Netzwerkelemente verfolgt.
Supraleitende Qubits basieren auf widerstandslosen elektrischen Schaltkreisen, die bei Temperaturen von wenigen Hundertstel eines Grades über dem absoluten Nullpunkt betrieben werden. Die Herstellungsverfahren sind denen der Halbleitertechnologie nicht unähnlich. Leider zeigt diese Art von Qubits eine sehr hohe Anfälligkeit gegenüber diversen Störeinflüssen.
Halbleiterqubits sind der heutigen Informationstechnologie noch ähnlicher, da sie transistorartige Strukturen für das Einfangen einzelner Elektronen ebenfalls bei tiefen Temperaturen verwenden. Meist wird deren Spin-Freiheitsgrad zur Speicherung von Quanteninformation verwendet. Exzellente Eigenschaften und eine gute Robustheit einzelner Qubits konnten gezeigt werden; die Verschaltung zu größeren Einheiten ist jedoch noch eine Herausforderung, welche auch von ML4Q angegangen wird.
Majorana-Qubits beruhen auf dem theoretischen Konzept, dass sich Quantenzustände durch topologische Effekte schützen lassen. Die Grundprinzipien ähneln der Tatsache, dass sich ein Knoten in einem Seil mit festgehaltenen Enden nicht auflösen wird, auch wenn das Seil noch so sehr im Wind flattert. Jedoch ist die Demonstration bisher noch nicht geglückt und bringt große materialwissenschaftliche Herausforderungen mit sich. Diese zu meistern ist eines der zentralen Ziele von ML4Q.

Quanteningenieure der Zukunft

Exzellente Forschung kann nur durch exzellente Ausbildungsprogramme den Kompetenzaufbau in der Region effektiv und nachhaltig ermöglichen. Daher ist es ein Anliegen von ML4Q, Synergien innerhalb der drei kooperierenden Universitäten zu schaffen und ein attraktives Bildungsangebot für Nachwuchswissenschaftlerinnen und -wissenschaftler zu kreieren. So bietet die RWTH die neue Vertiefungsrichtung Quantentechnologie im Masterstudiengang Physik an. Auch in der Elektrotechnik wird ein vergleichbares Studienangebot geschaffen. Zusätzlich profitiert die RWTH durch die Verbundstruktur von ML4Q von dem international etablierten Rekrutierungsprogramm der Bonn-Cologne Graduate School of Physics and Astronomy, kurz bcgs.
Neben der Kompetenzbündelung in der Region, um Nordrhein-Westfalen zu einem der Innovationsstandorte für Quantentechnologie in Europa zu entwickeln, engagiert sich ML4Q für eine bundesweite Vernetzung aller akademischen Player und sorgt damit für eine starke Stimme der universitären Grundlagenforschung. ML4Q ist seit 2019 Gründungsmitglied der Quantum Alliance. Hier haben sich fünf von der Deutschen Forschungsgemeinschaft geförderte Exzellenzcluster und weitere Zentren der Quantenwissenschaften zusammengeschlossen. Die Allianz ist zentral für die Weiterentwicklung des sich schnell entwickelnden Gebiets in Deutschland und sieht sich als einen der Motoren der Quantentechnologien sowie als Dreh- und Angelpunkt der Ausbildung in den Quantenwissenschaften.

Autoren

Dr. Marian Barsoum ist zuständig für die Öffentlichkeitsarbeit im Exzellenzcluster „ML4Q – Matter and Light for Quantum Computing“ und am II. Physikalischen Institut der Universität zu Köln.
Univ.-Prof. Dr. rer. nat. Hendrik Bluhm ist Inhaber des Lehrstuhls für Experimentalphysik und Standortvertreter der RWTH Aachen im Exzellenzcluster „ML4Q – Matter and Light for Quantum Computing“.

Marian Barsoum, Hendrik Bluhm

Quanten-computing

Ein Paradigmenwechsel in der Datenverarbeitung

Quantum technologies have already found their way into many parts of our daily lives. Current developments in quantum computing are promising to bring us into a new era of computing power beyond our present imagination. RWTH Aachen University and its strong collaboration partners are on the way to making significant contributions to this expected paradigm shift in the future of computing. Benefiting from a number of European and national funding programs as well as collaborations with non-university research institutions, research groups at RWTH and JARA-FIT are expanding their competencies with the goal of contributing substantially to European and national R&D programs in the field. Research competencies span a broad portfolio in the theory of the elementary building blocks of quantum computers, quantum error correction, the experimental realizations of solid state approaches based on semiconductors and superconducting devices, as well as system engineering aspects such as cryoelectronics.

Quantentechnologien der ersten Generation sind längst Teil unseres Alltags geworden. Halbleiterbauelemente wie Dioden und Transistoren bilden die Grundlage der modernen Elektronik und sind in Computern, Smartphones und Fernsehern enthalten. Ohne Laser wären viele Fertigungsprozesse, Messverfahren und Kommunikation undenkbar. Auch viele materialwissenschaftliche Errungenschaften wie zum Beispiel Supraleitung basieren auf dem Verständnis der Quantenmechanik. All diese Anwendungen wären ohne letztere nicht denkbar. Jedoch sind die benutzten Phänomene stets makroskopischer Natur und beruhen auf dem kollektiven Verhalten einer großen Zahl von mikroskopischen Teilchen.

Die Manipulation einzelner Quantenobjekte wie Atome, Elektronen oder auch Photonen erschließt weitere Quantenphänomene, welche anfänglich eher als praktisch belanglose Kuriosität erschienen, mittlerweile aber experimentell eindeutig untersucht und bestätigt sind. Deren Ausnutzung liegt im Fokus der Quantentechnologien der zweiten Generation. Für diese Quantenobjekte gelten physikalische Gesetze und Prinzipien, die das Potenzial für neue technische Lösungen bieten.

Ein vielversprechender Entwicklungszweig der sogenannten „Quantum 2.0 Ära“ ist das Quantencomputing. Aufgrund ihres bahnbrechenden Potenzials gelten Quantencomputer als eine Schlüsseltechnologie des 21. Jahrhunderts. Die konzeptionelle Grundlage beruht im Wesentlichen auf zwei Phänomenen: Überlagerungszustände und Verschränkung. Quantenbits, auch Qubits genannt, können wie das klassische Bit den Zustand 1 oder 0 annehmen – aber auch gleichzeitig im Zustand 1 und 0 sein sowie in beliebigen Zuständen dazwischen. Verfügt man über mehrere Qubits, können wiederum solche Superpositionen abgebildet werden, die jeden möglichen klassischen Zustand des Gesamtsystems enthalten. So kann ein einzelner Quantenprozessor Rechenschritte auf vielen Zuständen simultan erledigen. Da die Anzahl der möglichen Zustände exponentiell mit der Anzahl der Qubits steigt, gilt dies auch für die Rechenleistung, welche weit jenseits der klassischer Computer liegen kann. Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler erhoffen sich von Quantencomputern Durchbrüche in vielen rechenintensiven Disziplinen, etwa bei der Erforschung neuer Medikamente, bei der Entwicklung Künstlicher Intelligenz oder auch für die Optimierung von Lieferketten in der Logistik.

Weiterhin ermöglicht die Eigenheit der Quantenmechanik, dass Zustände nicht ohne

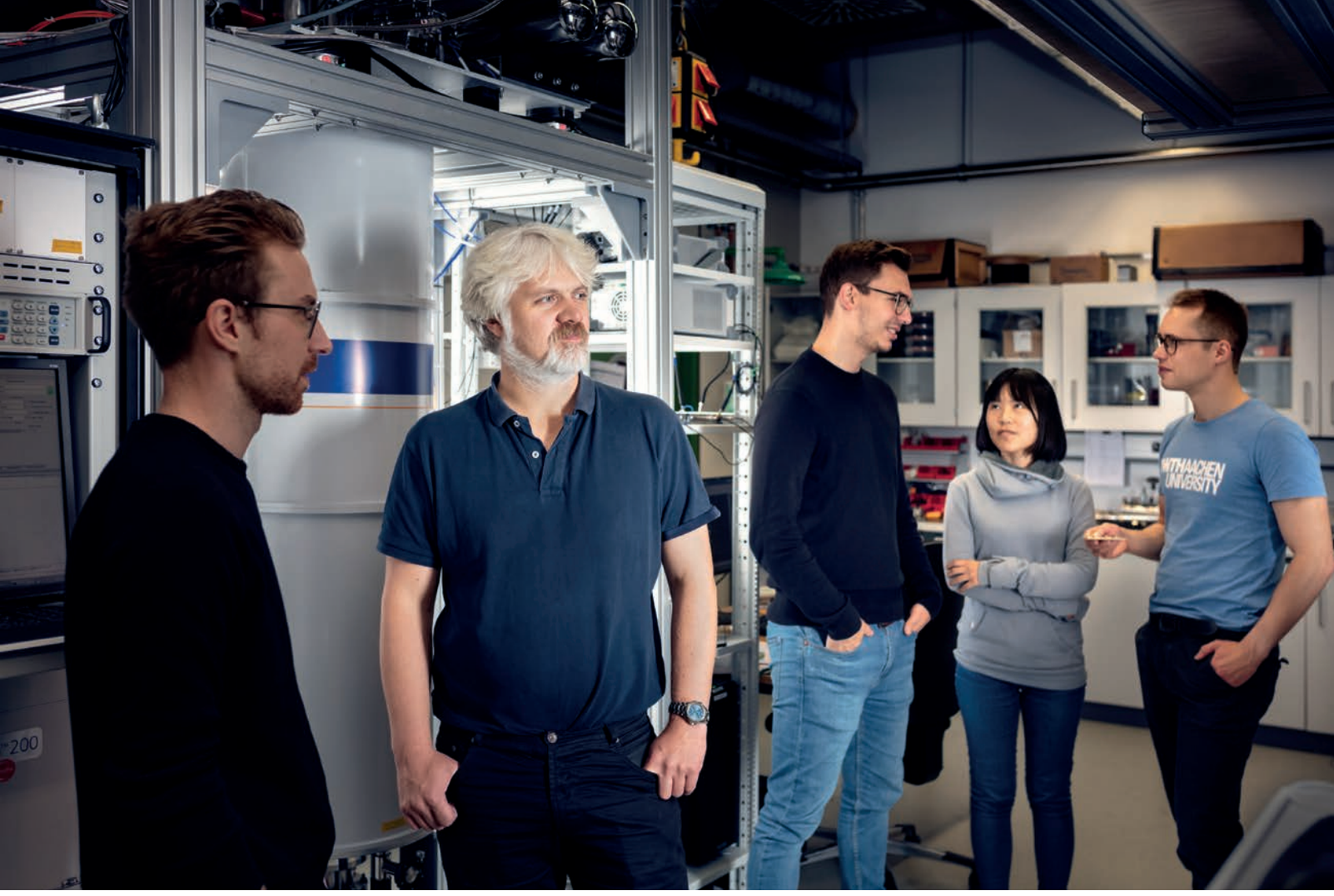

Bild 1: Im Labor widmen sich Nachwuchswissenschaftler um Professor Hendrik Bluhm (zweiter von links) der experimentellen Untersuchung von spinbasierten Qubits.
Foto: Simon Wegener

Veränderung kopiert oder gelesen werden können. Das Ergebnis sind Kommunikationsprotokolle, die physikalisch gegen unbemerktes Abhören geschützt sind.

Zur Quantenüberlegenheit ist es noch ein weiter Weg

Nach nahezu zwei Jahrzenten Forschung an den Eigenschaften einzelner Qubits stehen Quantencomputer aktuell noch am Anfang ihrer Entwicklung. Bisher ist es gelungen, Rechensysteme mit bis zu 50 verschränkten Qubits zu realisieren. Dies ist für praktische Anwendungen jedoch noch deutlich zu wenig, und die Qubits arbeiten noch zu ungenau. Je nach Ansatz werden Verbesserungen von mehreren Größenordnungen in der Fehlerrate oder Zahl der Qubits benötigt. Die Schwierigkeit liegt in der sehr hohen Anfälligkeit von Quantenzuständen gegen Störungen jeder Art, so dass sie nur für kurze Zeit miteinander verschränkt bleiben und in dieser Zeit Rechenoperationen ausführen können. Man spricht von Dekohärenz, die die Fehlerrate bestimmt.

Ein Ansatz, von dem relativ frühe Erfolge zu erhoffen sind, ist die Verwendung von bis zu einigen hundert Qubits für kurze Algorithmen, so dass Fehler selten genug auftreten. Dadurch kann das Potenzial jedoch nicht voll ausgeschöpft werden. Für längere Algorithmen wird die sogenannte Quantenfehlerkorrektur notwendig, welche die unvermeidbaren Fehler korrigiert. Der Preis dafür ist eine Vergrößerung der notwendigen Qubit-Zahl um einen Faktor 1.000 bis 10.000. Noch keiner der verfolgten Implementierungsansätze für Qubits hat die Voraussetzungen für eine solche Hochskalierung bewiesen. Zu der Schwierigkeit der Realisierung hinreichend vieler robuster Qubits kommt die Realisierung geeigneter Kontrollsysteme. Jedes Qubit benötigt sorgfältig abgestimmte, hochpräzise Kontrollsignale. Für kleine Systeme bewährte Verfahren lassen sich nicht ohne weiteres hochskalieren. Manche Qubits werden bei Raumtemperatur im Ultrahochvakuum betrieben und erfordern genaue Laserpulse, welche sich nur mit sehr aufwendigen, makroskopischen Lasersystemen erzeugen lassen. Andere sind zwar mit einfacher zu erzeugenden elektrischen Signalen kontrollierbar, müssen aber nahe dem absoluten Nullpunkt bei -273 °C betrieben werden. Gängige Temperaturen sind ein Faktor 1.000 bis 10.000 kleiner als Raumtemperatur. Somit wird noch viel Grundlagenforschung und Entwicklungsarbeit zu einer Reihe von Aspekten benötigt, bevor verschiedene Anwendungsfelder des Quantencomputings

erschlossen werden können. Wenn dies gelingt, winkt jedoch eine großzügige Belohnung: Eine Studie der Boston Consulting Group schätzt ein langfristiges Marktvolumen von bis zu 300 Milliarden Dollar, wobei die Zuverlässigkeit dieser Vorhersage nicht höher liegen dürfte als die derzeitiger Qubits.

Globale und nationale Trends

Mit diversen nationalen Förderprogrammen investieren viele Regierungen, vor allem China und die USA, in Quantentechnologien. 2018 startete das FET Flagship Program on Quantum Technologies der Europäischen Kommission, um die Entwicklung der Quantentechnologien auch in Europa mit einer Milliarde Euro Fördergeldern voranzutreiben. Zusätzlich fördert die Bundesregierung die Entwicklung der Quantentechnologien in Deutschland mit 650 Millionen Euro bis 2021. Auch beschloss die Bundesregierung am 3. Juni 2020 ein Konjunkturprogramm, in welchem Quantentechnologien, insbesondere Quantencomputing, Quantenkommunikation, Quantensensorik und Quantenkryptographie, mit einem Finanzvolumen in Höhe von 2 Milliarden Euro gefördert werden sollen. Ziel ist, dass deutsche Institute und Unternehmen die zweite Quantenrevolution mitgestalten und international eine führende Rolle übernehmen. Große Konzerne wie Google, IBM und Microsoft haben bereits experimentelle Quantencomputer vorgestellt. Partnerschaften zwischen diesen Konzernen und den deutschen außeruniversitären Forschungseinrichtungen sind bereits entstanden: Während IBM seinen Quantencomputer „Q System One“ in einer Partnerschaft mit der Fraunhofer-Gesellschaft nach Deutschland bringt, wurde ein gemeinsames Forschungsprogramm zwischen dem Forschungszentrum Jülich und Google initiiert. Die „Jülich UNified Infrastructure for Quantum Computing“, kurz JUNIQ, wird für die Ausbildung von Spezialisten in der Industrie verfügbar und über die Cloud europäischen Nutzern zugänglich sein. Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler beider Partner bekommen zusätzlich die Möglichkeit, Simulationen auf den Superrechnern am Jülich Supercomputing Centre durchzuführen und mit Googles Quantenprozessoren zu experimentieren.

Die RWTH und ihre Partner haben in den letzten zehn Jahren den Forschungsschwerpunkt Quantencomputing systematisch aufgebaut. Ein wichtiges Element ist die Jülich Aachen Research Alliance, kurz JARA, die die Kompetenzen beider Einrichtungen bündelt. JARA-FIT, eine der fünf Forschungssektionen, wurde den Zukunftstechnologien in der Datenverarbeitung gewidmet. Das JARA-FIT angehörige JARA Institut Quantum Information (QI) hat es sich gemeinsam mit Partnern zur Aufgabe gemacht, zum dynamischen Forschungsfeld der Quanteninformation maßgeblich beizutragen und auch in Europa Technologiekompetenz in Quantencomputing-Hardware aufzubauen. Die Professoren David DiVincenzo und Hendrik Bluhm leiten das Institut.

Die wesentlichen Forschungsschwerpunkte des sowohl theoretisch als auch experimentell arbeitenden Instituts sind das Verständnis von Dekohärenzeffekten in Festkörper-Qubits, die Theorie der Quantenfehlerkorrektur und die experimentelle Weiterentwicklung von supraleitenden und Halbleiterqubits mit zunehmendem Fokus auf Skalierbarkeit. So entsteht in Jülich der Systemdemonstrator des Projekts „OpenSuperQ“, das im Rahmen FET Flagship Program on Quantum Technologies der EU einen Quantenprozessor mit 50 bis 100 Qubits entwickelt. Im Bereich Halbleiterqubits wurde in Zusammenarbeit mit Infineon kürzlich ein konkreter Skalierungsansatz konzipiert, der mit industrieller Fertigung kompatibel und zum Erreichen sehr großer Qubit-Zahlen geeignet ist. Dieser wurde 2019 mit dem RWTH Innovation Award ausgezeichnet.

Ein relativ neuer Trend in der lokalen Forschungslandschaft ist die Erforschung der Grundlagen für hochintegrierte, kryoelektronische Kontrollsysteme, welche den Schlüssel zur Hochskalierung liefern könnten. Wichtige Forschungsfragen sind: Wie gut funktioniert die heutige Schaltungstechnik bei tiefen Temperaturen? Wie kann sie für die geänderten Anforderungen optimiert werden? Welche Schaltungs- und Systemkonzepte eignen sich für die skalierbare Qubit-Kontrolle?

Autoren

Univ.-Prof. Dr. rer. nat. Hendrik Bluhm ist Inhaber des Lehrstuhls für Experimentalphysik und im Leitungsgremium des JARA Institut Quantum Information.

Dr. Marian Barsoum ist zuständig für die Öffentlichkeitsarbeit im Exzellenzcluster „ML4Q – Matter and Light for Quantum Computing“ und am II. Physikalischen Institut der Universität zu Köln.

Impressum

Herausgegeben im Auftrag des Rektors
der RWTH Aachen
Dezernat 3.0 – Presse und Kommunikation
Templergraben 55
52056 Aachen
Telefon +49 241 80 - 93687
pressestelle@rwth-aachen.de
www.rwth-aachen.de

Verantwortlich:
Renate Kinny

Redaktion:
Angelika Hamacher

Titelbild:
Peter Winandy, Aachen

Anzeigen:
Medienhaus Aachen GmbH
Dresdener Str. 3, 52068 Aachen
Geschäftsführer: Andreas Müller
Leiter Werbemarkt: Jürgen Carduck
(verantwortlich für Anzeigen i.S.d. § 8 Abs. 2
Landespressegesetz NRW)

Martina Welz Assistenz Anzeigenleitung
Tel. 0241/5101 611
E-Mail: martina.welz@medienhausaachen.de

Gestaltung:
Kerstin Lünenschloß, Aachen

Druck:
image Druck + MEDIEN GmbH, Aachen

Das Wissenschaftsmagazin RWTH THEMEN
erscheint einmal pro Semester.

Nachdruck einzelner Artikel, auch auszugsweise, nur mit Genehmigung der Redaktion.

Für den Inhalt der Beiträge sind die Autoren verantwortlich.

ISSN-Nummer 0179-079X