



Im Exzellenzcluster ML4Q arbeiten Forschende an Architekturen, die fehlertolerante Quantencomputer modular realisieren und optisch miteinander vernetzen.

Von Qubits zum Quantennetzwerk

Der Exzellenzcluster Matter and Light for Quantum Computing (ML4Q) untersucht die Möglichkeiten des Rechnens mit Quanten in vielen Facetten.

Kerstin Sonnabend

Der Exzellenzcluster „Materie und Licht für Quanteninformation“ zielt darauf ab, die Grundlagen für einen Quantencomputer zu erforschen. Dazu zählt die Untersuchung verschiedener Plattformen, die als materielle- oder lichtbasierte Qubits dienen können. Darüber hinaus geht es darum, grundlegende Verfahren und Methoden für einen Quantencomputer zu entwickeln und zu verifizieren. Ein zentraler Punkt ist es, Fehler infolge von Dekohärenz und Rauschen zu vermeiden, beispielsweise durch topologisch geschützte Qubits, bzw. diese zu erkennen und zu korrigieren.

Ausgangspunkt sind die kleinsten Bausteine von Quantenprozessoren, die Qubits. Diese Quantensysteme mit zwei Zuständen speichern Information – aber nicht wie ein herkömmlicher Rechner binär kodiert, sondern im Wahrscheinlichkeitsintervall von 0 bis 1. Im Mittelpunkt des Interesses stehen bei ML4Q Majorana-

Zustände: Diesen Zuständen entsprechen Quasiteilchen, die sich zum Beispiel in Supraleitern aus einem Teilchen und einem Loch zusammensetzen und wie ihr Pendant in der Teilchenphysik gleich ihren Antiteilchen sind. Ob sich Majorana-Qubits tatsächlich realisieren lassen, ist noch unklar. Falls sie existieren, könnten sie gegen Störungen topologisch geschützt sein. Denn ihre Geometrie sorgt dafür, dass ein äußeres Magnetfeld nicht zu Dekohärenz und damit dem Verlust der Information führt.

Dem Exzellenzcluster ML4Q gehören 61 Principal Investigators an, die an sieben Institutionen forschen. Die Universität zu Köln, die RWTH Aachen, die Universität Bonn und das Forschungszentrum Jülich haben den Cluster gemeinsam eingeworben; einige Forschende arbeiten auch an den Fraunhofer-Instituten für Lasertechnologie ILT in Aachen und für Hochfrequenzphysik und Radartechnik FHR in Wachtberg sowie an der Universität Düsseldorf. Diese Kombination stellt eine einzigartige Konstellation in



Im vergangenen Jahr zog es Sebastian Hofferberth mit seiner Arbeitsgruppe von Dänemark nach Bonn, wo er auch im Exzellenzcluster ML4Q mitarbeitet. Inzwischen lassen sich in seinem Labor – hier während des Aufbaus – Rydberg-Atome als potenzielle Qubitplattform untersuchen.

räumlicher Nähe dar. Während in Köln vor allem die Theorie sehr stark vertreten ist und über eine weltweit führende Expertise verfügt, die Düsseldorf noch erweitert, stellt das Forschungszentrum Jülich modernste Hardware-Ressourcen bereit. Die Standorte Aachen und Bonn bieten die Möglichkeit, in hochspezialisierten Laboren neue Materialien für Qubits zu erforschen und etwa mit ultrakalten Atomen theoretische Vorhersagen zu überprüfen.

Als Sprecher des Clusters fungiert Yoichi Ando von der Universität zu Köln. Bis 2015 hat er in Japan zu topologischen Isolatoren und Supraleitern geforscht. Der Wechsel nach Deutschland erfolgte auch, weil er die Förderung der Grundlagenforschung in Japan schwinden sah: „Mit der Exzellenzinitiative und nun der Exzellenzstrategie hat die

deutsche Regierung ein einmaliges Instrument geschaffen, das sich Spitzenforschende weltweit wünschen.“

In Aachen, Bonn, Jülich und Köln unterstützt ihn jeweils ein Vertreter. Die Zusammenarbeit zwischen den Institutionen funktioniert gut, auch wenn es um Neuberufungen geht. „Den Berufungskommissionen gehören immer Mitglieder aus den anderen Standorten an“, erklärt Yoichi Ando. Im Rahmen des Clusters kann jeder Standort zwei neue Professuren besetzen. Auch wenn noch nicht alle Stellen vergeben sind, ist es bereits gelungen, international renommierte Forschende einzustellen. Mit Erwann Bocquillon vom Laboratoire de Physique de l'ENS gewann die Universität zu Köln zusätzliches Know-how auf dem Gebiet des topologischen Quantencomputing. Außerdem hat der Cluster dazu beigetragen, mit David Luitz und Silvia Viola Kusminskiy zwei Gruppenleiter von Max-Planck-Instituten in Erlangen und Dresden an die Universitäten in Bonn und Aachen zu locken. Rami Barends, bis 2021 Projektleiter im Google Quantum Lab an der UC Santa Barbara, bringt nun seine Expertise als Direktor am Peter Grünberg Institut des Forschungszentrums Jülich ein.

Matter and Light for Quantum Computing

Beteiligte Institutionen:

Universität zu Köln, RWTH Aachen, Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn, Forschungszentrum Jülich

Weitere Partner:

Fraunhofer ILT, Aachen; Fraunhofer FHR, Wachtberg; Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf

Sprecher:

Prof. Yoichi Ando, PhD (U zu Köln)

Standortvertreter:

Prof. Dr. Hendrik Blum (RWTH Aachen), Prof. Dr. David Gross (U zu Köln), Prof. Dr. Detlev Grützmacher (FZ Jülich), Prof. Dr. Simon Stellmer (U Bonn)

Forschungsgebiete:

- F1: Grundlagen und Technologien topologischer Schnittstellen
- F2: Majorana-Qubits
- F3: Dekohärenz, Messungen und Fehlerkorrektur
- F4: Quantennetzwerke



Auf dem Weg zum Quantennetzwerk

Die Forschungsprojekte von ML4Q verteilen sich auf vier Bereiche, die von jeweils zwei Principal Investigators von verschiedenen Standorten koordiniert werden. Für „Grundlagen und Technologien topologischer Schnittstellen“ versuchen Forschende, Majorana-Zustände in topologischen Phasen von Festkörpern und kalten Atomen zu realisieren. Um geeignete Materialien zu finden, gilt es zunächst, komplexe Phänomene wie Magnetismus bis ins Detail zu verstehen. Spezieller behandelt der Bereich „Majorana-Qubits“ die Frage, wie sich solche Zustände konkret als

Qubits nutzen lassen. Neben der Hardware geht es hier auch um die Fragen, welche Protokolle bei Majorana-Qubits das Schreiben, Lesen oder auch Löschen von Information steuern können und wie eine Fehlerkorrektur realisierbar ist.

In die konkreten Anwendungen blickt der dritte Forschungsbereich von ML4Q: Wie verhalten sich die neuen „Quanten-Geräte“ in einer realistischen Umgebung mit Störfaktoren? Die Forschenden suchen nach Konzepten, um Quanteninformation zu schützen. Dazu untersuchen sie beispielsweise den Einfluss chaotischer Fluktuationen in bereits existierenden Systemen wie den Quantencomputern von IBM oder Google aus supraleitenden Qubits.¹⁾ Im Fokus des vierten Bereichs steht das langfristige Ziel, zuverlässige Quantennetzwerke aufzubauen, die Prozessoren aus atomaren, optischen und Festkörper-Qubits verbinden, ohne die Leistungsfähigkeit des Netzwerks durch einen solch heterogenen Aufbau zu beeinträchtigen.

Ein besonderes Merkmal von ML4Q ist es, viele Plattformen daraufhin zu testen, wofür sie sich in der Quanteninformationsverarbeitung eignen. Hierzu gehören Photonenkondensate, Rydberg-Atome, Ionen und diverse festkörperbasierte Systeme, wie Quantenpunkte, Transmon-Qubits und topologische Isolatoren. Ihre unterschiedlichen Eigenschaften – etwa Taktrate, Kohärenzzeit oder Fehlerrate – machen diese Systeme für verschiedene Aufgaben in einem zukünftigen hybriden Quantencomputer nutzbar. Das ist vergleichbar mit einem klassischen Computer, dessen Prozessor, Speicher und Schnittstellen ebenfalls aus jeweils optimal geeigneten Materialien bestehen.

Um unterschiedliche Qubit-Systeme in einem hybriden Netzwerk zu koppeln, ist insbesondere die Verschränkung eines elektronisch ansteuerbaren Quantenpunktes mit einem Ion von Interesse: Dieser Ansatz kombiniert die Vorzüge festkörperbasierter Systeme mit der präzisen optischen Kontrolle atomarer Qubits. Damit diese Plattformen tatsächlich miteinander kommunizieren, gilt es, die Wellenlänge des emittierten Photons an die Resonanz des Empfängers anzupassen. Bei ML4Q erforschen mehrere Arbeitsgruppen an unterschiedlichen Standorten die hierzu benötigte Quantenfrequenzkonversion in einem „interdisziplinären“ Projekt.

Mit neuem Schwung in die zweite Halbzeit

Da es trotz zahlreicher Bemühungen weltweit bisher nicht gelungen ist, die Signatur eines Majorana-Quasiteilchens nachzuweisen, ist die Ausrichtung des Clusters nach einer internen Evaluation zur Halbzeit der Förderperiode im Sommer angepasst worden. Die Majorana-Qubits spielen künftig eine geringere Rolle, um die Forschung auf anderen Themengebieten ausbauen zu können. Ein Beispiel ist das NISQ-Computing (NISQ: noisy intermediate-scale quantum), um optimal davon zu profitieren, dass am Forschungszentrum Jülich in Kürze Quantencomputer zur Verfügung stehen werden. Außerdem liegt künftig ein weiterer Schwerpunkt auf neuartigen zweidimensionalen Materialien.



ML4Q-Sprecher Yoichi Ando

Für die weitere Zukunft gibt es Überlegungen, die Struktur des Clusters neu aufzubauen: Basis wäre dann die Herstellung und Untersuchung vielversprechender Materialien für Qubits („matter“). Daraus gilt es, erste Geräte zu entwickeln („devices“) und die Eigenschaften der Materialien bzw. die Arbeitsweise der Geräte zu verstehen („operations“). Das langfristige Ziel von ML4Q bleibt die Entwicklung von Architekturen, die fehlertolerante Quantencomputer modular realisieren und optisch miteinander vernetzen.

Besondere Förderung

Ein besonderes Modell hat der Cluster sowohl bei der Frauen- als auch bei der Nachwuchsförderung entwickelt. Um promovierte Frauen gezielt zu fördern, haben die Verantwortlichen beschlossen, einer Arbeitsgruppe, die eine Postdoktorandin einstellt, 50 Prozent des Gehalts als zusätzliches Budget zu zahlen. Damit lässt sich beispielsweise eine Promotionsstelle finanzieren, welche die frisch Angestellte vergeben und betreuen darf. Der finanzielle Anreiz soll zum einen Frauen motivieren, eine Karriere im Bereich der boomenden Quantentechnologien anzustreben, und zum anderen die Principal Investigators anregen, verstärkt nach geeignet qualifizierten Frauen Ausschau zu halten. Langfristig soll das den Frauenanteil in den beteiligten Institutionen auch in höheren Qualifikationsstufen steigern.

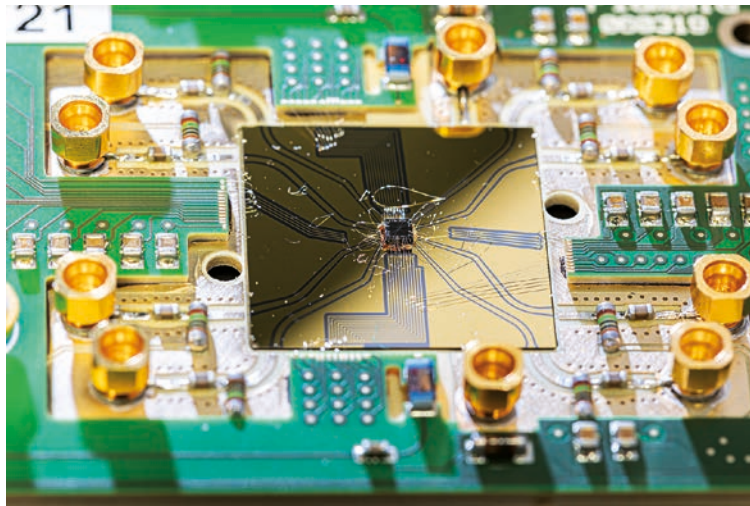
Für den wissenschaftlichen Nachwuchs im Allgemeinen strebt Yoichi Ando eine Förderung an, wie sie in den USA durch das Tenure-Track-System üblich ist. Verbesserte Aufstiegschancen an einer Einrichtung böte beispielsweise die Ausschreibung einer W2-Professur mit Tenure Track auf

Die Exzellenzcluster

In loser Folge stellt das Physik Journal die Cluster der Exzellenzstrategie mit Schwerpunkt in der Physik bzw. starker Beteiligung von Physikerinnen und Physikern vor.



1) Näheres dazu findet sich hier: bit.ly/3Acr9b5



Für Halbleiter-Quantenchips haben Forschende von ML4Q die Grundlagen gelegt, um einen „Quantenbus“ zu entwickeln: Die Übertragung von Elektronen über mehrere Mikrometer ebnet den Weg zu Millionen Qubits und somit zu skalierbaren Quantencomputern.

W3. Dass eine solche Beförderung nur beim Wechsel der Institution üblich ist, hält Ando für überholt angesichts der weltweiten Konkurrenz um brillante Köpfe in den Quantentechnologien.

Im Sommer hat der Cluster im Rahmen der internen Zwischenevaluation erstmals in einem kompetitiven, geschlechtergerechten Verfahren drei Frauen und drei Männer als „ML4Q Young Investigators“ ausgewählt und zu Principal Investigators ernannt. Für die vorgeschlagenen Projekte stehen insgesamt 1,5 Millionen Euro bereit; weitere Mittel unterstützen die Nachwuchswissenschaftler:innen bei der akademischen Karriere.

Studierenden im Bachelor bietet ML4Q die Möglichkeit eines 10- bis 12-wöchigen Praktikums an einer der beteiligten Institutionen. So besteht früh Gelegenheit, die Arbeitsgruppen zu Quantentechnologien kennenzulernen. Das Programm steht Studierenden aus aller Welt offen: Ein Teil der Reisekosten wird erstattet; eine monatliche Zulage ermöglicht den Aufenthalt vor Ort. Kurse für Master-Studierende, Promovierende oder junge Postdocs bietet die ML4Q Research School.

Daneben beeinflusst der Cluster aber auch die Region, hat doch die Regierung von Nordrhein-Westfalen das Landesprogramm „EIN Quantum NRW“ mit 20 Millionen Euro aufgelegt und flankiert damit die Forschung des Clusters. „EIN“ steht für „Education, Innovation and Networking“ und soll zum Ausdruck bringen, dass es einerseits um die Ausbildung junger Menschen auf dem Gebiet der Quantentechnologien geht und andererseits um die Verbindung von Wissenschaft und Wirtschaft im Hinblick auf die Entwicklung marktreifer Produkte und eine gemeinsame anwendungsorientierte Forschung. „Der Cluster ML4Q hat das Landesprogramm entscheidend geprägt“, betont Simon Stellmer. Der Experte für Quantenmetrologie ist Bonner Standortvertreter von ML4Q.

Die Allianz der Cluster

Der Exzellenzcluster ML4Q hat sich mit den weiteren vier Exzellenzclustern im Bereich der Quantenphysik zur „Quantum Alliance“ zusammengeschlossen. Diese geht auf die Initiative von Tommaso Calarco zurück, einen der Prin-

cipal Investigators bei ML4Q. Er hat Erfahrung darin, solche große Konsortien anzustoßen, zeichnete er doch 2016 für das Quantum Manifesto mitverantwortlich, das schließlich in die europäische Initiative „Quantum Flagship“ mündete. Der Vorsitz bei der Quantum Alliance wechselt reihum zwischen den beteiligten Partnern. Im Fokus steht die Vernetzung aller Beteiligten, insbesondere bei der Förderung des wissenschaftlichen Nachwuchses. Die bundesweite Initiative hat auch dafür gesorgt, dass es in Deutschland zusätzliche Mittel und Förderinitiativen gibt, um die herausragenden Leistungen in der Grundlagenforschung in marktreife Produkte umzusetzen.

So stellten zu Beginn ihrer Laufzeit die Cluster der Exzellenzstrategie die größten Verbundprojekte zur Erforschung von Quantentechnologien in Deutschland dar – mit einem Fokus auf Grundlagenforschung. Mittlerweile fördern Bund und Länder auch anwendungsorientierte Projekte in den Quantentechnologien – denn Giganten der IT-Branche, wie Microsoft, Google oder IBM, investieren ein Vielfaches und haben bereits Quantenprozessoren präsentiert. „Aber wir brauchen noch immer die Grundlagenforschung, um zu verstehen, wie diese Systeme wirklich funktionieren. Nur so lassen sie sich weiter optimieren“, ist Simon Stellmer überzeugt. Daher stünden die Chancen für ML4Q sehr gut, mit einem fundierten Arbeitsprogramm und einem ehrgeizigen Team auch in der nächsten Förderrunde erfolgreich zu sein.

The Quantum Alliance

In der „Quantum Alliance“ arbeiten die fünf deutschen Exzellenzcluster in einem Konsortium zusammen, die zu Quantenwissenschaft und -technologien forschen: CUI – Advanced Imaging of



Matter (Physik Journal, November 2013, S. 20), MCQST (Februar 2020, S. 20), QuantumFrontiers (Mai 2021, S. 26), ct.qmat (März 2022, S. 51) und ML4Q. Als sechster Partner gehört das Zentrum IQST (Integrated Quantum Science and Technology) aus Stuttgart und Ulm zum Konsortium; der Exzellenzcluster PhoenixD (Juni 2020, S. 26) ist „affiliated partner“.