

Quantencomputer mit Rydbergatomen

BMBF-Verbundprojekt „QRydDemo“

Projektlaufzeit: 1.2.2021 bis 31.1.2025

Ein Gespräch mit den Projektpartnern

Stuttgart, 9. Februar 2021. Für bestimmte Rechenaufgaben, die herkömmliche Supercomputer überfordern, wie zum Beispiel Optimierungsprobleme oder die Simulation von neuartigen Materialien und Verbindungen können Quantencomputer der Zukunft eine Lösung anbieten. Marktforscher erwarten, dass Quantencomputer zwar noch einige Jahre bis zur Marktreife brauchen. Schätzungen zur Folge könnte das Marktvolumen aber bis 2025 bei bis zu drei Milliarden Dollar liegen, längerfristige Prognosen gehen sogar bis 50 Milliarden Dollar. Die führenden Großunternehmen die sich auf diesem Gebiet stark engagieren sind meist amerikanische Firmen wie Google, IBM und Microsoft. Die Bundesregierung fördert nun in einer groß angelegten Initiative Forschungsprojekte, bei denen ein Quantencomputer „made in Germany“ entstehen soll. In diesem nationalen Wettbewerb startet nun unter der Leitung der Universität Stuttgart das Verbundprojekt „QRydDemo“. Das Gesamtvolumen, das den Projektpartnern aus Wissenschaft und Industrie zur Verfügung steht, beträgt 10,2 Millionen Euro, von denen ca. neun Millionen vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) zur Verfügung gestellt werden. Ziel ist es, bis Ende der Projektlaufzeit 2025 einen Rydberg Quantencomputer zu realisieren.

Es sind verschiedene Technologien im Rennen, auf denen zukünftige Quantencomputer aufgebaut sein könnten. Ihnen liegen jeweils unterschiedliche physikalische Systeme zugrunde. Die aktuell vielversprechendsten Ansätze beruhen auf supraleitenden Schaltkreisen und gefangenen Ionen. Digitales Quantenrechnen mit Rydbergatomen ist im Vergleich zu den genannten Plattformen eine junge und sich sehr dynamisch entwickelnde Plattform.

Warum ist ihr Ansatz mit Rydbergatomen so vielversprechend?

Florian Meinert: Ähnlich wie bei einem klassischen Computer führt ein Quantencomputer Algorithmen aus – also eine Folge von logischen Rechenschritten – jedoch mit den kleinsten physikalischen Einheiten, sogenannten Quantenbits (oder kurz Qubits). Im Gegensatz zu klassischen Bits können Qubits nicht nur die beiden Zustände 0 und 1 annehmen, sondern auch Überlagerungszustände zwischen 0 und 1. Solche sogenannten Superpositionen sind auch zwischen weit entfernten Qubits möglich. Diese Eigenschaft der Qubits, die sogenannte Verschränkung, ist nur in der Quantenmechanik möglich und kann mit keinem klassischen Computer realisiert werden. Die Prinzipien der Quantenmechanik, erlauben es, Rechenschritte parallel statt nacheinander auszuführen. Damit lassen sich bestimmte Problemstellungen effizient lösen, für die eine Berechnung auf einem klassischen Computer praktisch unmöglich wird. Um mit Qubits Rechenoperationen durchführen zu können, muss der Zustand der Superposition und Verschränkung für viele Qubits über einen längeren Zeitraum aufrechterhalten werden. Es kommt also darauf an, wie präzise man einzelne Qubits kontrollieren kann und wie gut sich die Anzahl der Qubits hochskalieren lässt. In den letzten drei Jahren konnten auf der Basis von Rydbergatomen Kontrolle und Verschränkung in Systemen von mehr als 50 Qubits gezeigt sowie Qubit-Operationen mit einer Fehlerquote von weniger als einem Prozent demonstriert werden. Die Rydbergatom-Plattform ist ein äußerst vielversprechender Ansatz, deren Leistung sich aus unserer Sicht um die Größenordnungen steigern lässt, die für einen praxistauglichen Quantencomputer erforderlich sind.

Welche Rolle spielen die Rydbergatome genau in diesem System?

Florian Meinert: Um die nötige Verschränkung in einem Quantensystem aufzubauen, müssen sich die Qubits des Quantencomputers gegenseitig beeinflussen können. Die dafür erforderliche Wechselwirkung lässt sich mit Rydbergatomen realisieren. Rydbergatome sind mehrere tausend Mal größer als normale Atome. Das locker gebundene Elektron von Rydbergatomen reagiert besonders empfindlich auf andere Rydbergatome in der Nähe. So können sich Rydbergatome über Distanzen von etwa fünf Mikrometern hinweg „fühlen“. Das entspricht fast einem Zehntel der Dicke eines menschlichen Haares. Für Atome sind das gigantische Entfernungen. Trotz der starken Wechselwirkungen erfolgt die Rydberg-Anregung „kohärent“, d.h. besonders kontrolliert und ohne störende Einflüsse, eine wichtige Voraussetzung für die Anwendung in Quanten-Computerkonzepten. Diese Kohärenz im Qubit-Ensemble über lange Zeiten zu halten ist eines der Hauptaufgaben, der wir uns in unserem Projekt stellen. Erreichen möchten wir dies mit einem ausgeklügelten Laser- und Fallensystem, welches es erlauben soll, die Qubit-Zustände 0 und 1 und alle Überlagerungszustände sehr gut zu kontrollieren und zu speichern sowie logische Quantengatter, die der Grundbaustein der Rechenoperationen mit Qubits sind, zu realisieren. Während in vielen Quantencomputer-Plattformen die räumliche Anordnung der Qubits und damit die Architektur der Rechenschritte statisch sind, erlaubt die Rydberg-

Plattform prinzipiell eine dynamische Architektur in zwei und langfristig sogar in drei Dimensionen. Von unserem Ansatz erhoffen wir uns, dass wir diese dynamische Architektur anwenden können, um neue Quantengatter zu demonstrieren und damit die Stärken der Rydberg-Plattform voll auszuschöpfen.

Unser Ziel ist es, im Laufe des Projekts einen Quantencomputer-Demonstrator mit bis zu 500 Qubits aufzubauen, der Anwendern mit einem Compiler über ein Webinterface zugänglich gemacht werden soll.

*Im Projekt arbeiten Experimentalphysiker*innen und Theoretiker*innen mit Praktikern Hand in Hand. Wie sieht die Zusammenarbeit im Projekt konkret aus?*

Hans Peter Büchler: Die Experimentalphysik liefert sozusagen den Prozessor des Computers. Als Theoretiker entwickeln wir das Programm, das die Rechenschritte der Quantenalgorithmen ausführt, die auf dem Quantenprozessor ablaufen sollen. Genau wie bei der klassischen Softwareentwicklung müssen wir dazu erst einmal Bibliotheken aufbauen, die vorgefertigte Ausführungen allgemeiner Quantenroutinen zur Verfügung stellen.

Eine Aufgabe wird es dann sein, unsere neuen Quantenalgorithmen auf klassischen Computern zu testen. Nur so lässt sich überprüfen, ob der Quantencomputer richtig rechnet. Problem dabei ist allerdings die schiere Datenmenge, die bei der Speicherung von Quantenzuständen anfällt und einen klassischen Computer leicht in die Knie zwingt. Auf lange Sicht möchten wir mit Hilfe von speziellen Codes eine Quantenfehlerkorrektur im System implementieren, wo immer noch eine Schwachstelle im System liegt.

Ziel ist es, am Ende der Projektlaufzeit ein Webinterface zu installieren, mit dem sich ein erstes Set an Problemstellungen berechnen lassen

Welche Rechnungen könnten damit in naher Zukunft gelöst werden?

Simone Montangero:

Seit über zehn Jahren arbeiten wir an der Entwicklung effizienter Quantenalgorithmen, was faszinierend und herausfordernd zugleich ist. Einige Problemstellungen eignen sich aus unserer Sicht aber besonders gut, um die Funktions- und Leistungsfähigkeit der geplanten Rydberg-Quantencomputerplattform zu demonstrieren. Dabei geht es um Fragestellungen, die sich z.B. in der Quantenchemie und der Erforschung neuer Quantenmaterialien ergeben. Unser Ziel ist es, mit Hilfe von Machine-Learning-Verfahren, ein Teilbereich der Künstlichen Intelligenz, die Abläufe der Rechenprozesse im Quantencomputer zu optimieren und Antworten auf diese Fragen zu finden. Konkret bedeutet das, dass wir die Parameter der Quantengatteroperationen mit Hilfe von selbstlernenden Optimierungsalgorithmen so einstellen, dass die Fehlerraten minimiert werden. Am Ende der Projektlaufzeit hoffen wir, dass wir mit unseren neuartigen Quanten-Algorithmen die Stärke unseres Rydberg-Quantencomputers demonstrieren können.

Welche neuen theoretischen Fragen erhoffen Sie sich im Laufe der Projektlaufzeit zu lösen?

Hans Peter Büchler:

Die Realisierung eines Quantencomputers mit Rydbergatomen bietet die Möglichkeit, neuartige sogenannte Vielteilchenoperationen einzusetzen. Solche sogenannten N-Qubit-Quantengatter erlauben es, den Zustand von mehreren Qubits gleichzeitig mit nur einem Kontrollqubit zu verändern. Wir konnten in den letzten Jahren die Bedingungen, die für solche Gatter erfüllt sein müssen, theoretisch schon sehr gut identifizieren. Im Verbundprojekt möchten wir nun klären, für welche Problemstellungen das Einsetzen dieser Gatter algorithmische Vorteile bietet. So erwarten wir z.B., dass der Einsatz von Vielteilchengatter hilfreich sein könnte, Vielteilchensysteme, wie sie z.B. für die Quantenchemie von zentraler Bedeutung sind, effizienter zu lösen. Darüber hinaus sind Vielteilchengatter auch ein zentraler Baustein, um sogenannte Quantenfehlerkorrektur zu realisieren. Dies ist ein wichtiger Baustein, um Fehler die bei der Quantenrechnung entstehen, entdecken und korrigieren zu können.

Welche Bereiche würden besonders vom Einsatz eines Quantencomputers profitieren?

Tilman Pfau: Der Quantencomputer wird den klassischen Computer nicht ersetzen. Ein Quantencomputer kann seinen Vorteil gegenüber einem klassischen Computer aber immer besonders bei rechenintensiven Fragestellungen ausspielen. Das ist z.B. bei der Simulation von Molekülverbindungen oder Festkörpern der Fall. In Zukunft könnten sich

beispielsweise chemische oder biologische Prozesse besser berechnen lassen und in Folge neue Materialien oder Arzneiwirkstoffe entwickelt werden. Aber auch perfekt optimierte Verkehrsströme, Produktionsabläufe oder hochleistungsfähige Batterien ließen sich mit der grundlegend anderen Rechenweise realisieren.

Wird der Einsatz eines Quantencomputers den Alltag der Menschen verändern?

Tilman Pfau: Zum heutigen Zeitpunkt lässt sich darüber nur spekulieren. Aber ich bin sicher, dass sich ein großes Potential von Anwendungen auftut, an die heute noch niemand denkt. Der Quantencomputer für die Hosentasche wird es am Ende vermutlich nicht werden. Aber denkbar sind Quantencomputerrechenzentren, auf die prinzipiell jeder über ein Netzwerk zugreifen kann, ähnlich wie das heute schon mit den Supercomputern auf der Welt möglich ist.

Welche Rolle spielt die Firma TOPTICA als Industriepartner in diesem Projekt, das sich ja immer noch recht nah an der Grundlagenforschung bewegt?

Jürgen Stuhler: Wir erforschen im Rahmen des Projekts wie wir Lasersysteme realisieren können, die sich für den Einsatz in Quantencomputern eignen. Das sind zum einen sehr stabile Hochleistungslaser für den Aufbau sogenannter „magischer“ Einzelatomfallen, in denen sich die Kohärenz der Qubits lange aufrechterhalten lassen, so dass viele Rechenschritte an ihnen durchgeführt werden können. Mit einem weiteren Lasersystem werden für die Rechenschritte die Wechselwirkung der Rydbergatome ein- und wieder ausgeschaltet. Dieses muss daher präzise auf die Rydbergatome abgestimmt sein, um die Fehlerrate klein zu halten. Dies stellt hohe Anforderungen an die Stabilität der Lasersysteme. Laser mit den erforderlichen Spezifikationen gibt es bislang nicht auf dem Markt. Wir untersuchen, wie solch präzise Laser realisiert werden können und überprüfen ihre Eignung für den Quantencomputer-Demonstrator. Die Realisierung eines Quantencomputers ist eine sehr komplexe Aufgabe und nur im Verbund aus Wissenschaft und Industrie zu stemmen. TOPTICA bringt dabei sein weltweit einzigartiges Knowhow auf dem Gebiet der Laser für die Quantentechnologie ein und kofinanziert das Projekt mit über einer Million Euro.

Warum beteiligen sich Firmen wie TOPTICA bereits heute an einer Entwicklung, deren Erträge in der Zukunft liegen - weit über den normalen Planungshorizont der Firmen hinaus?

Jürgen Stuhler: TOPTICA entstand vor rund 25 Jahren aus dem Umfeld der akademischen Forschung auf dem Gebiet „Quantenoptik“, das sich heute zur Quantentechnologie entwickelt hat. Viele unserer Mitarbeiter haben eine akademische Laufbahn in diesem Fachgebiet hinter sich und die meisten unserer Kunden engagieren sich in der Quantentechnologie. So sind Faszination und Begeisterung für das Fachgebiet an sich ein sehr starker Antrieb für unsere Beteiligung an solchen Grundlagenprojekten. Es ist aber auch der langfristige Geschäftssinn, der uns motiviert, gerne in Verbundforschungsprojekten mitzumachen. An den Ansprüchen der Partner und Dank deren Rückmeldung wachsen langfristig unser technologisches Knowhow und die Qualität unserer Produkte. So erhalten wir unsere Marktführerschaft auf dem Gebiet der Laser für die Quantentechnologie – und darüber hinaus.

Welches Potential sehen Sie als Lasertechnologiefirma kurz- mittel- und langfristig in der Investition in diese Zukunftstechnologie? Kann der Quantencomputer die Wirtschaft revolutionieren?

Jürgen Stuhler: Der Quantencomputer oder allgemeiner die Quantentechnologie ist sicher eines der vielversprechendsten Zukunftsfelder für die Wirtschaft aber auch für die Gesellschaft allgemein. Wir sind überzeugt davon, dass Anwendungen weit jenseits unserer heutigen Vorstellungskraft entstehen werden, sobald die Quantentechnologie breiten Einzug in Wirtschaft und Gesellschaft gehalten hat. Was den Quantencomputer selbst betrifft, so ist das wirtschaftliche Potentiale enorm. Das betrifft nicht nur die Herstellung von Quantencomputer-Hardware, sondern vor allem auch die Entwicklung der zugehörigen Software und den anwendungsbezogenen Einsatz der Quantencomputer.

Florian Meinert: Wenn wir es schaffen, die Kinderkrankheiten bis dahin in den Griff zu bekommen, könnten wir bis in zehn Jahren voll funktionierende Quantencomputer haben. Wir arbeiten bei unserem Quantencomputer-Demonstrator daran, die Fehlerquote deutlich zu senken und auch an Möglichkeiten, wie wir die Ergebnisse, die unser Quantencomputer liefert, sicher überprüfen können. Wenn es uns gelingt, effiziente Quantenalgorithmen zu entwickeln, können Quantencomputer bis in zehn Jahren routinemäßig Berechnungen durchführen, bei denen klassische Computer auch mit besseren und schnelleren Prozessoren scheitern. Nur für diese Spezialrechnungen – die aber ein hohes Marktpotenzial haben - ist der Quantencomputer dem klassischen Computer wirklich überlegen und kann sich durchsetzen. Die ganzen Aufbauten werden über die Jahre auch kompakter und deutlich wartungsärmer sein. Schon jetzt passt der Aufbau, mit dem die Rydbergatome präpariert werden, auf einen optischen Tisch und nimmt nicht mehr einen ganzen Raum ein wie es noch in der Anfangszeit der Forschung mit ultrakalten Atomen der Fall war. Es könnte auch erste Quantenrechenzentren geben, die dann hoffentlich allen zur Verfügung stehen und nicht nur in den Händen weniger Firmen oder Nationen liegen.

Hat der Forschungs- und Technologiestandort Deutschland das Potential Technologieführer auf dem Gebiet der Quantencomputer zu werden?

Tilman Pfau: Der Forschungsstand heute beruht zu einem großen Teil auf den Erfolgen der Grundlagenforschung weltweit, getrieben durch internationale Kooperation und einem offenen Umgang mit den Forschungsergebnissen. Zentren wie unser Zentrum für Integrierte Quantenwissenschaft und –technologie IQST, ein Forschungsverbund der Universitäten Stuttgart und Ulm und das Max-Planck-Institut in Stuttgart, sind da von Anfang an gut mit dabei. Jetzt gilt es unser Knowhow aus der Grundlagenforschung in die Anwendung zu führen. In der Rydberg-Grundlagenforschung sind wir mit dem von uns initiierten und koordinierten DFG-Forschungsschwerpunkt „Giant interactions in Rydberg Systems (SPP 1929 – GiRyd)“ bereits weltweit führend.

Die vom BMBF aufgesetzte Rahmenprogramm, „Quantentechnologien - von den Grundlagen zum Markt“ stellt bis 2022 insgesamt 650 Millionen Euro für die Entwicklung der Quantentechnologien bereit. Ich sehe Deutschland in einer guten Ausgangsposition, wenn wir die starke Grundlagenforschung mit den ansässigen Hightech-Firmen aber auch die zahlreichen Betriebe des Mittelstands und potenzielle Anwender für Quantencomputerdienstleistungen mit ins Boot holen.

Neben diesen Investitionen ist es auch wichtig, noch mehr auf das Thema Bildung auf dem Gebiet „Quantentechnologie“ zu fokussieren. Denn in den grundständigen Ingenieurstudiengängen kommen diese Themen kaum vor. Die Quantenwissenschaften müssen aus der Physik heraus zu einem interdisziplinären Fach werden, wie andere physikalische Grundkenntnisse zum Beispiel in der Elektrotechnik auch. Ein Ansatz den wir übrigens in unserem Quantenzentrum IQST schon seit einiger Zeit verfolgen.

Auch die Weiterbildung zum Thema „Quantentechnologie“ sollte möglichst früh in den Unternehmen verankert werden. Dazu gehört z.B., ein berufsbegleitendes Weiterbildungsangebot auf diesem Gebiet zu etablieren und Nachwuchs- und Führungskräfte in den Unternehmen früh für die Chancen und Möglichkeiten auf diesem Markt zu sensibilisieren.

Die Projektpartner im Gespräch:



Dr. Florian Meinert
5. Physikalisches
Institut
Universität Stuttgart



Prof. Dr. Hans Peter
Büchler
3. Institut für
Theoretische Physik
Universität Stuttgart



Prof. Dr. Simone
Montangero
Honorarprofessor an
der Universität Ulm und
Professor am
Fachbereich Physik und
Astronomie an der
Universität Padua,
Italien



Prof. Dr. Tilman Pfau
5. Physikalisches
Institut
Universität Stuttgart



Dr. Jürgen Stuhler
Vice President
Quantum Technologies
TOPTICA Photonics AG
in München/Gräfelfing