



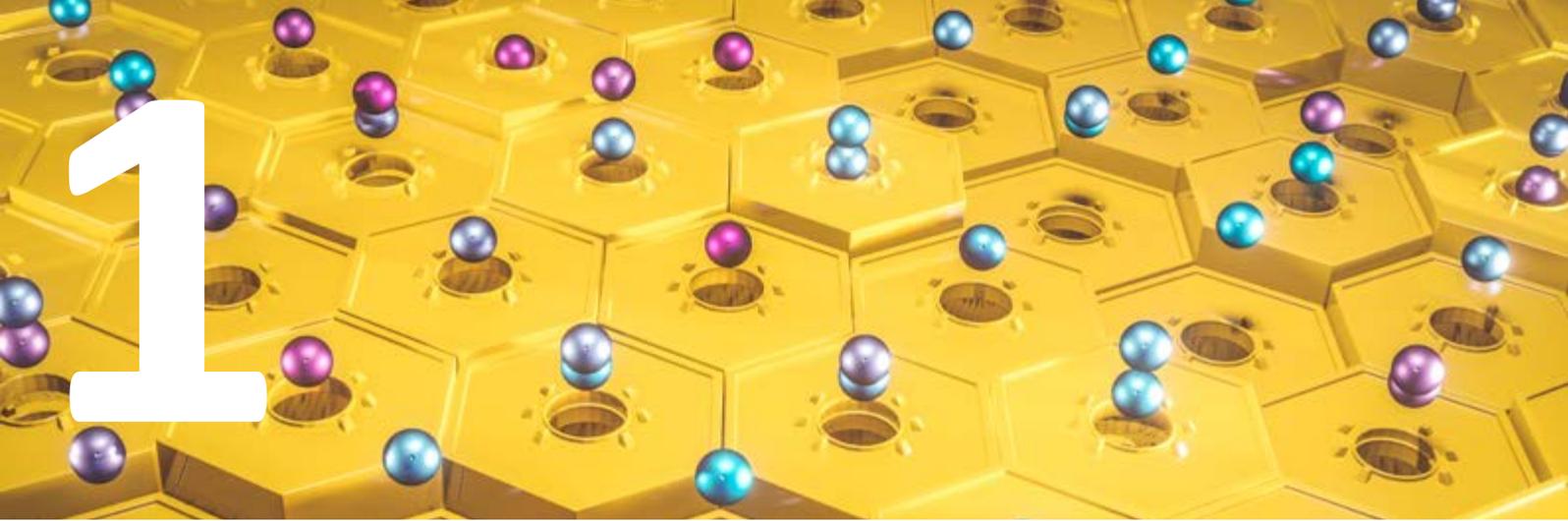
WHITEPAPER

Quantencomputing in Bayern

Wege von der Forschung in die Anwendung

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung – Die Vorteile des Quantencomputing	3
2. Wo stehen wir heute? Chancen und Herausforderungen mit Quantencomputing	4
2.1 Verfügbare Quantenhardware	4
2.2 Umgebungsbedingungen und Fehlerkorrektur als entscheidende Herausforderungen für die Forschung	4
2.3 Kommerzielle Nutzung von Quantencomputing noch am Anfang	5
2.4 Quantenexpertise dringend gefragt	5
3. Quantencomputing auch in Deutschland als Hoffnungsträger für Industrie, Wirtschaft und Verwaltung	7
3.1 Bayerische QuantenTech Vision für einen anwendungsorientierten Zugang zu Quantencomputing	7
3.2 Anwenderfreundlichkeit ist das A und O	8
3.3 Das QAR-Lab und Bayern Innovativ: Kompetente Beratung zeigt potenziellen Anwendern Perspektiven auf	8
4. Wichtig für den Mittelstand: Jetzt schon Weichen für die Quantenzukunft stellen	9
5. Mit Quantencomputing die Welt verändern – erfolgreiche Projekte eröffnen Perspektiven	10
5.1 Digitale Kommunikation: Kryptografie	10
5.2 Künstliche Intelligenz	10
5.3 Ausbau von öffentlichen und unternehmensweiten Infrastrukturen	11
5.4 Luft- und Raumfahrt, Logistik, Lagerhaltung	11
5.5 Automotive, industrielle Fertigung, Logistik, Verkehrsfluss und Maschinenlernen	12
5.6 Chemie und Pharmazeutik, Materialforschung	12
6. Fazit: mit dem QAR-Lab den eigenen „Quantenvorteil“ identifizieren!	13



Die Vorteile des Quantencomputing

Quantencomputing wird heute noch vielfach als theoretisches, rein wissenschaftliches Konzept wahrgenommen. Das verwundert nicht, denn bereits der technische Hintergrund der Quantentechnologie ist für die meisten Menschen schwer vorstellbar: Anders als in der digitalen Welt, in der es für die klassischen Bits nur die beiden Zustände „0“ und „1“ gibt, können sich im Quantencomputing die beiden Zustände auch überlagern – Quanteneffekte wie Superposition und Verschränkung ermöglichen, mit Quantenbits (Qubits) eine erheblich höhere Menge an verschiedenen Lösungen in wesentlich kürzerer Zeit zu verarbeiten. Konkrete Ergebnisse zur „Quantenüberlegenheit“ gegenüber herkömmlichen Supercomputern lieferten u. a. Forscher von Google mit der Entwicklung des Quantenprozessors „Sycamore“ (53 Qubits). Laut Hersteller soll dieser in der Lage sein, Berechnungen, für die ein herkömmlicher Supercomputer etwa 10.000 Jahre brauchen würde, in 200 Sekunden durchzuführen.¹

Laut Potenzialanalyse der Management- und Technologieberatung Sopra Steria sehen jedoch gegenwärtig nur 34 Prozent von 158 befragten Führungskräften und Spezialisten aus Unternehmen Quantentechnologien für die eigene Branche als sehr oder eher relevant an, für die eigene Firma oder Verwaltung sind es lediglich 28 Prozent. 64 Prozent der Befragten rechnen aber damit, dass Quantentechnologien bis 2030 „spürbaren Einfluss“ auf ihr Unternehmen oder ihre Verwaltung gewinnen werden.² Immerhin sehen 59 Prozent der befragten Entscheiderinnen und Entscheider aus dem Bankensektor „potenzielle Einsatzgebiete im Controlling und für die Optimierung von Finanzströmen.“ In Industrieunternehmen können sich 26 Prozent „Verbesserungen der Logistikprozesse“ vorstellen.³ Umfassende Quantenstrategien gibt es heute noch in den wenigsten Unternehmen – hierfür mangelt es wohl oft auch einfach noch am erforderlichen Hintergrundwissen und einem Bewusstsein für die revolutionären Potenziale der Quantentechnologien.

Was sind Qubits?

Quantenbits (Qubits) beschreiben die Recheneinheit eines Quantencomputers. Im Unterschied zum klassischen Bit können Qubits nicht nur konkrete Zustände zwischen „0“ und „1“, sondern auch Überlagerungen dieser Zustände annehmen – man spricht hier von **Superposition**.

Bei der **Verschränkung** von zwei oder mehr Qubits miteinander werden ihre Zustände in der Betrachtung untrennbar miteinander „verschmolzen“. Sie nehmen erst durch die Messung wieder diskrete Werte an – ähnlich dem Prinzip von „Schrödingers Katze“, die in einer geschlossenen Box sowohl tot als auch lebendig sein kann. Wirft man einen Blick in die Box, nimmt das Tier entweder den Zustand „lebend“ oder „tot“ an.

Je mehr Qubits entsprechender Güte in einem Rechner-System miteinander verknüpft sind, desto komplexer können die Aufgaben sein, die sich damit berechnen lassen.

2

Wo stehen wir heute? Chancen und Herausforderungen mit Quantencomputing

In der Tat gilt es nach wie vor, einige Hürden zu überwinden, bevor Quantencomputing auf breiter Front in der Praxis von Unternehmen und Organisationen zum Einsatz kommen kann.

2.1 Verfügbare Quantenhardware

Bereits heute bieten vornehmlich nordamerikanische Hersteller die entsprechende Hardware, um die Möglichkeiten von Quantencomputing auszutesten. Dazu zählen zum einen Quantum-Annealer, mit denen sich – ähnlich wie mit digitalen Simulatoren eines Quantensystems – bereits Aufgabenstellungen bewältigen lassen, für die es viele mögliche Lösungen gibt – wie etwa in der Verkehrsflussoptimierung oder in der Materialforschung.

Quantum-Gate-Computer hingegen sind der Versuch, einen universellen Quantencomputer zu entwickeln. Dieser nutzt sogenannte Quantengatter, die es erlauben, die Signale der Qubits unter Berücksichtigung der quantentypischen Phänomene Verschränkung und Superposition zu verarbeiten. Zu den bislang verfügbaren Systemen gehören:

- **D-Wave:** Quantum-Annealer, bislang mit 512 Qubits, für Optimierungsaufgaben. Seit September 2020 ist der D-Wave Advantage mit 5.000 Qubits⁴ verfügbar. Cloud-Plattform „Leap“ und Software-Framework „Ocean“.
- **Google:** Quantencomputer mit dem „Sycamore“-Prozessor auf Basis von Supraleiter-Technologie, 53 Qubits.
- **Honeywell:** Entwicklung des ersten kommerziellen Ionenfallen-Quantencomputers weltweit. „Ho“ als Cloud-Lösung mit aktuell 10 Qubits.

- **IBM:** Quantencomputer Q System One, aktuell mit dem Prozessor „Eagle“ mit 127 Qubits.⁵ Erste grafische Benutzeroberfläche „Composer“ und „Qiskit“ als Open-Source-Cloud-Framework von IBM Research für Quantenprogramme.
- **IonQ:** Ionenfallen-Quantencomputer mit 11 Qubits, der über den Cloud-Service Amazon Braket⁶ kommerziell vermarktet werden soll.
- **Rigetti:** Quantum-Gate-Computer auf Basis der Supraleiter-Technologie, aktuell mit dem Prozessor „Aspen-8“ mit 32 Qubits. Vermarktung u. a. über den Rigetti Quantum Cloud Service und über Amazon Braket.⁷ Der neue Multichip-Prozessor „Aspen-M“ mit 80 Qubits (2x 40 Qubits) soll ab dem ersten Quartal 2022 verfügbar sein. Versuche zeigten, dass Aspen-M Berechnungen 2,5-mal schneller und mit einer bis zu 50 Prozent geringeren Fehlerrate durchführen kann als die Vorgänger-Chip-Generation.⁸

2.2 Umgebungsbedingungen und Fehlerkorrektur als entscheidende Herausforderungen für die Forschung

Noch ist es schwierig, Quantencomputing-Technologien in konkrete Anwendungen zu übersetzen. Ein Grund hierfür liegt in der hohen Störanfälligkeit der Qubits, die den Einsatz komplexerer Quantenalgorithmen ohne effektive Fehlerkorrektur kaum möglich macht. Mit 1:100 bis zu 1:1.000 liegt die Fehlerrate von elementaren Qubit-Schal-



Wir brauchen letztendlich einen fehlerkorrigierenden Quantenrechner. Bis dieser entwickelt ist, wird es noch dauern. Da niemand vorhersehen kann, welche Entwicklungssprünge uns die Zukunft bringt, schauen wir uns die weltweit besten Quantencomputing-Technologien parallel an. Prof. Dr. Claudia Linnhoff-Popien, QAR-Lab

tungen noch deutlich über der von herkömmlichen Hochleistungsrechnern.⁹

Um möglichst fehlerarme Berechnungen und Messergebnisse zu erzielen, benötigen supraleitende Quantencomputer nicht nur einen Raum, in dem sie vor äußeren Einflüssen wie beispielsweise Vibrationen bestens geschützt sind, sondern auch ein äußerst aufwendiges kryogenes Kühlsystem. Rechner, die auf der Ionenfallen-Technologie basieren, können zwar bei Raumtemperatur arbeiten, erfordern jedoch den Einsatz vieler Laser zum Einfangen der Ionen und den Betrieb in einer Vakuumkammer.¹⁰ Damit gestaltet es sich für Industrieunternehmen heute noch viel zu aufwendig und unwirtschaftlich, inhouse einen eigenen Quantencomputer zu betreiben. Der Zugriff auf Cloudlösungen wie Amazon Braket, den D-Wave Quantum Cloud Service „Leap“, den Rigetti Quantum Cloud Service oder das Strangeworks Quantum Computing Ecosystem schafft hier jedoch bereits Abhilfe.

2.3 Kommerzielle Nutzung von Quantencomputing noch am Anfang

Die entsprechenden Quantenrechner stehen derzeit immer noch vorwiegend in Forschungseinrichtungen. IBM präsentierte im Januar 2019 mit dem Q System One den ersten kommerziellen, schaltkreisbasierten Quantencomputer der Welt. Dieser ist aufwendig durch Strahlungsschilde, Vakuumkammern und Dämpfungssysteme in einem luft-

dichten Glaswürfel vor Umgebungseinflüssen geschützt und wird in den IBM-Rechenzentren nahe New York betrieben.¹¹ Zu den zahlenden Kunden, die per Cloud auf den Hochleistungsrechner zugreifen, gehören unter anderem die Europäische Organisation für Kernforschung CERN und der Mineralölkonzern ExxonMobil.¹²

Seit Juni 2021 ermöglicht auch die Fraunhofer-Gesellschaft in Ehningen bei Stuttgart den Zugriff auf ein IBM Q System One. Ziel ist, den „Weg für künftige industrielle Anwendungen für diese neue Art des Rechnens“ zu ebnet, Forschungsvorhaben zu beschleunigen und die Ausbildung von Fachkräften für das Quantum Computing voranzutreiben.¹³ Bereits jetzt können auch Unternehmen für monatlich 11.500 Euro eigene Quantenstudien durchführen oder selbst entwickelte Quantenalgorithmen testen.¹⁴

2.4 Quantenexpertise dringend gefragt

Im QAR-Lab, das 2016 mit dem Anliegen gegründet wurde, „Quantencomputing einem breiten Nutzerkreis in Forschung und Wirtschaft niedrigschwellig zugänglich zu machen“¹⁵, sieht man die Notwendigkeit, möglichst umfassend IT-Experten heranzubilden, die einerseits „mit den speziellen, auf Quantenmechanik basierenden Rechnern umgehen oder Aufgabenstellungen darauf definieren können“ und zum anderen „Ideen für Software hätten und diese entwickeln könnten.“¹⁶

”

2016 kam ein DAX-Konzern auf uns zu und fragte, ob wir nicht eine bestimmte Aufgabenstellung für ihn auf einem Quantum-Annealer programmieren könnten. Damit gehörten wir weltweit zu den ersten Informatikern, die dieses Thema erforscht haben.

Prof. Dr. Claudia Linnhoff-Popien, QAR-Lab



Foto: LMU

Das QAR-Lab unter der Leitung von Prof. Dr. Claudia Linnhoff-Popien, Inhaberin des Lehrstuhls für Mobile und Verteilte Systeme am Institut für Informatik der Ludwig-Maximilians-Universität München (LMU), hat daher im Frühjahr 2021 eine dreimonatige Quantum Computing Optimization Challenge durchgeführt, in der Studierende fünf Use Cases der Konzerne BASF, BMW, SAP, Siemens und Trumpf auf vier verschiedenen Quantencomputer-Systemen berechnen konnten, um für jeden Anwendungsfall das beste Ergebnis zu erzielen. Damit erhielten die Teilnehmenden die einzigartige Möglichkeit, Erfah-

rungen mit unterschiedlichen Herausforderungen im Quantencomputing mit Rechnern von IBM, Rigetti, Fujitsu und D-Wave zu sammeln. Nach dem erfolgreichen Verlauf dieses Projekts wurde im November 2021 eine zweite Challenge mit Use Cases der Unternehmen E.ON, Evonik Industries und BAYER ausgerichtet.

Gemeinsam mit Partnern aus der Industrie entwickelt Prof. Dr. Linnhoff-Popien nun am Lehrstuhl für Informatik der LMU die Lernplattform CAQAO, die Quantenprogrammierkenntnisse an Interessierte vermitteln und spätestens in drei Jahren einsatzbereit sein soll.¹⁸

”

Die Quantum Computing Optimization Challenge zeigte, dass bereits heute kleine Instanzen von realen Anwendungsfällen der Industrie mit Hilfe von Quantencomputern gelöst werden können.¹⁷

QAR-Lab-Pressemitteilung vom 26.07.2021

3

Quantencomputing auch in Deutschland als Hoffnungsträger für Industrie, Wirtschaft und Verwaltung

Mittlerweile herrscht in der Forschung und in der Politik weltweit Einigkeit, dass dem Quantencomputing die Zukunft gehört. So hat die Europäische Kommission bereits 2018 das Quantumflagship-Programm auf den Weg gebracht, das die Quantenforschung über einen Zeitraum von mindestens zehn Jahren mit vorerst einer Milliarde Euro fördern soll.¹⁹ Im Rahmen des Konjunktur- und Zukunftspakets unterstützt die Bundesregierung die Entwicklung von Quantentechnologien mit weiteren zwei Milliarden Euro.²⁰

In Deutschland ging 2019 am Jülich Supercomputing Centre (JSC) das anwendungsorientierte Forschungsprojekt JUNIQ (Jülicher Nutzer-Infrastruktur für Quantum Computing) an den Start. Dort arbeitet man mit der Quantum-Annealing-Technologie von D-Wave. Im Jülicher Forschungszentrum wird auch der erste europäische D-Wave Quantum Cloud Service „Leap“ betrieben.²¹

3.1 Bayerische QuantenTech Vision für einen anwendungsorientierten Zugang zu Quantencomputing

In Bayern möchte man mit der für die QuantenTech Vision entwickelten Roadmap alle Ausprägungen der Quantentechnologie berücksichtigen und „mittel- sowie langfristige Zeitschienen zur Sensibilisierung und Einbindung aller Agierenden“ aufzeigen.²² Zur schrittweisen Etablierung von Quantentechnologie in Bayern wählt man explizit einen „anwendungsorientierten Zugang“, der die folgenden Aspekte umfasst:

- **Hardware-Entwicklung zum Quantencomputing/Computer** sowie damit einhergehende Enabling-Technologien (Kryotechnik, Mikrowellenpuls-Technik, Einzelphotonendetektoren, Software-Stack für Quantencomputer, Quanten-

Fehlerkorrektur etc.) und das entsprechende Ökosystem

- **Komponenten, Prototypen und Demonstratoren**, z. B. für Sensorik, Metrologie und Kommunikation
- **Software- und Algorithmen-Entwicklung**: Anwendung aus der Industrie bzw. Spiegelung von realen Problemen in Lösungsräume, die über Software abgebildet werden können (z. B. Optimierungsprobleme)
- **Absicherung kritischer Infrastrukturen**: Sichere Kommunikation für kritische Infrastrukturen jeder Art (Energieversorgung, Krankenhäuser etc.)²³

Bei der Umsetzung dieses Vorhabens spielt das QAR-Lab eine wichtige Rolle – sowohl als Treiber der Grundlagenforschung als auch als Vorreiter bei der Erschließung von Anwendungspotenzialen von Quantentechnologien in Industrie, Wirtschaft und Gesellschaft. Gegenwärtig fokussiert sich das QAR-Lab in seinen Aktivitäten dabei auf die folgenden Schwerpunkte:

- Lösung von Optimierungsproblemen
- Künstliche Intelligenz mit Quantencomputing
- Entwicklung einer anwenderfreundlichen Software-Plattform für Quantencomputing

Die Forscher des QAR-Lab sind überzeugt, dass auf lange Sicht fast alle Bereiche in Wirtschaft und Industrie oder Gesellschaft und Verwaltung von der Leistungsfähigkeit des Quantum Computing profitieren können – zum Beispiel bei sämtlichen Aufgaben, in denen aus einer Vielzahl von Möglichkeiten die optimale Lösung gefunden werden muss:

- Automotive
- Chemie
- Datensicherheit
- Energieversorgung
- Facility Management
- Finanzwesen
- Geologie
- Gesundheitswesen
- IoT-Anwendungen
- IT-Sicherheit
- Industrielle Produktion (Smart Factory)
- Klima- und Katastrophenschutz
- Kommunikation
- Kryptografie
- Lagerverwaltung
- Landwirtschaft (Smart Farming)
- Lebensmittelindustrie
- Logistik
- Luft- und Raumfahrt
- Qualitätssicherung
- Meteorologie
- Maschinenbau
- Materialentwicklung
- Medizintechnik
- Messtechnik
- Öffentlicher Nah- und Fernverkehr
- Pharmazeutik
- Sensorik
- Städte- und Verkehrsplanung
- Transportwesen
- Umweltschutz

3.2 Anwenderfreundlichkeit ist das A und O

Um dem Quantencomputing breite Akzeptanz zu verschaffen, ist neben der Verfügbarkeit von wirtschaftlichen Hardware- und Software-Lösungen auch die Entwicklung von Standards und die Bereitstellung anwenderfreundlicher Benutzeroberflächen von entscheidender Bedeutung. Deshalb sucht das QAR-Lab ganz gezielt den Kontakt und Erfahrungsaustausch mit Entwicklern und potenziellen Nutzern. Denn ähnlich wie beim Personal Computer wird auch der Durchbruch des Quantencomputing maßgeblich von der Benutzerfreundlichkeit der Software-Architekturen getrieben werden.

3.3 Das QAR-Lab und Bayern Innovativ: Kompetente Beratung zeigt potenziellen Anwendern Perspektiven auf

Neben den technischen Hürden gilt es vor allem, bei potenziellen Quanten-Usern ein Bewusstsein für die Bandbreite der Einsatzmöglichkeiten von Quantencomputing zu wecken. Beratungsangebote können hier helfen, Berührungspunkte zu überwinden und Perspektiven zu identifizieren. Das QAR-Lab pflegt deshalb den partnerschaftlichen Austausch mit der Bayern Innovativ GmbH, die als Thinktank für Innovationen im Freistaat Bayern Kompetenzen bündelt und den interdisziplinären Wissenstransfer zwischen Forschung und allen Branchen der Industrie fördert. Bayern Innovativ unterstützt das QAR-Lab einerseits durch sein umfassendes Netzwerk in alle Bereiche von Forschung, Industrie, Politik und Gesellschaft und andererseits durch die Beratungskompetenz seiner Quantenexperten.

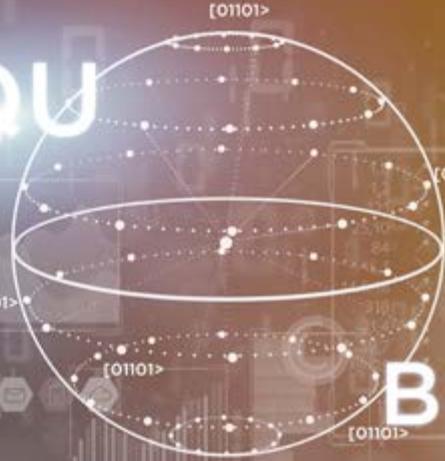


Wir sehen uns als Anlaufstelle für alle innovationsbereiten Unternehmen, die sich informieren möchten, welche Chancen der Bereich Quantentechnologie für sie eröffnen könnte. Hier können wir neben unserer Beratungsleistung bei der Vermittlung wertvoller Kontakte behilflich sein.

Dr. Andreas Böhm, Projektmanager Technologie und Leiter Quantentechnologie, Bayern Innovativ GmbH

4

QU



Wichtig für den Mittelstand: Jetzt schon Weichen für die Quantenzukunft stellen

Bereits 2018 prognostizierte Dr. Sebastian Feld, früherer Leiter des QAR-Lab und heute Assistant Professor am Quantum & Computer Engineering Department der Delft University of Technology: „Irgendwann wird jeder Quantencomputer nutzen – bewusst oder unbewusst.“²⁴ Damit spielte er auf Anwendungen an, die künftig den Alltag der meisten Menschen beeinflussen werden – wie etwa einen Kommunikationssatelliten für die Internet-Kommunikation, der dank Quantenverschlüsselung für Cyberkriminelle praktisch nicht zu knacken ist.

Derzeit sind es vor allem Großunternehmen und Start-ups, die sich schon mit dem Thema Quantencomputing auseinandersetzen, Hardware, Cloud-Lösungen, Algorithmen und Software-Frameworks testen und auf ihren Quantenvorteil hinarbeiten. Als Entwickler der Q System One Hardware-Plattform erkundet auch IBM potenzielle Anwendungsbereiche von Quantencomputing: „Für uns gibt es drei große Themen: Pharmazie und Materialforschung, Supply Chain Management und Logistik sowie das Finanzwesen“, sagt IBM-Sprecher Michael Kiess.²⁵

Im Sommer 2021 gründeten zudem zehn deutsche Konzerne das Quantum Technology and Application Consortium (QUTAC)²⁶, um aus den bestehenden Grundlagen des Quantencomputing nutzbare industrielle Anwendungen zu entwickeln und ein souveränes, europaweites Quantencomputing-Ökosystem aufzubauen. Unter den Gründungsmitgliedern des Zusammenschlusses sind mit BASF, der BMW Group, Boehringer Ingelheim, Bosch, Infineon, Merck, Munich Re, SAP, Siemens und Volkswagen namhafte Vertreter der Sparten Automotive, Chemie und Pharma, Hardware und

Software, Technologie und Versicherung. Da sich internationale Konzerne bereits heute im Bereich Quantencomputing positionieren, ist es für mittelständische Unternehmen umso wichtiger, ebenfalls aktiv zu werden und eigene Anwendungsgebiete für Quantentechnologien zu erschließen.

In der QuantenTech Vision Bayern setzt man von Anfang an konsequent auf einen fruchtbaren Dialog zwischen Forschung und Wirtschaft, um in den nächsten zehn Jahren „ein florierendes Quantentechnologie-Ökosystem und damit die Ausgangslage für den zukünftigen Konjunkturmotor Deutschlands“ zu schaffen.²⁶ Dabei bringt „die starke bayerische Industrie, die nahezu alle Branchen abdeckt, [...] aus Anwendersicht zudem Impulse in die Forschung, die damit [...] auch applikationsnahe Problemstellungen adressiert.“²⁷ Dies ist essenziell, da sich nicht nur hochspezialisierte Start-ups und Großunternehmen, sondern auch KMU bereits heute auf das Quantenzeitalter vorbereiten sollten, um langfristig wirtschaftlich erfolgreich zu bleiben – und möglicherweise sogar neue Geschäftsfelder zu erschließen.

5

Mit Quantencomputing die Welt verändern – erfolgreiche Projekte eröffnen Perspektiven

Beispielhafte Projekte zeigen bereits heute, wie vielfältig die Anwendungsmöglichkeiten von Quantencomputing in fast allen Sparten von Industrie, Wirtschaft und Verwaltung sind. Viele der im Folgenden aufgeführten Modellprojekte beinhalten auch branchenübergreifend interessante Lösungsansätze.

5.1 Digitale Kommunikation: Kryptografie

Quantencomputer spielen ihren großen Geschwindigkeitsvorteil besonders dann aus, wenn es etwa gilt, riesige Datenbanken zu durchsuchen oder komplexe mathematische Aufgaben wie die Faktorisierung großer Zahlen zu lösen. Damit sind heute übliche Verschlüsselungssysteme, die eigentlich Datensicherheit gewährleisten sollen, für Quantencomputer leicht zu knacken. Auf der anderen Seite dürfte es mittelfristig möglich sein, Kommunikationssysteme mit Hilfe von „Post-Quanten-Kryptografie“ abhörsicher zu machen – was angesichts der zunehmenden Verbreitung smarter Infrastrukturen etwa in der Energieversorgung (Smart Grid), im Facility Management (Smart Factory, Smart Home) oder im Verkehrswesen große Bedeutung erlangen wird.

Ziel dieses vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) geförderten Verbundprojekts (Aquorypt – „Anwendbarkeit quantencomputerresistenter kryptografischer Verfahren“) ist die Entwicklung von Verschlüsselungsverfahren für die Post-Quanten-Kryptografie, die von Quantencomputern nicht zu knacken sind. Die heute gebräuchliche Public-Key-Kryptografie basiert weitgehend auf komplexen mathematischen Aufgaben wie der Zerlegung von natürlichen Zahlen in ihre Primfaktoren. Für Quantencomputer stellen solche Berechnungen keine große Hürde dar.²⁹

Damit stehen künftig praktisch alle Unternehmen, aber auch öffentliche Einrichtungen und Behörden vor dem Problem, dass die Sicherheit kritischer Daten nicht mehr gewährleistet werden kann. Aquorypt evaluiert unterschiedliche Verschlüsselungsmethoden, die gegen herkömmliche Cyberattacken ebenso resistent sind wie gegen Angriffe von Quantencomputern. Das Projektteam besteht aus Quantenexperten der Technischen Universität München, von Fraunhofer AISEC in Garching, Giesecke + Devrient in München, Infineon Technologies in Neubiberg, der Siemens AG in München und der Technischen Universität Darmstadt.³⁰

5.2 Künstliche Intelligenz

Künstliche Intelligenz (KI) und maschinelles Lernen dürften durch Quantencomputing als Schlüsseltechnologien künftig in vielen Bereichen signifikant an Bedeutung gewinnen – wenn es etwa gilt, Logistik-Lösungen wie Liefer Routen, Energienetze oder Finanz-Portfolios zu optimieren und das Training großer neuronaler Netze zu beschleunigen.³¹ Der Quantencomputer-Hersteller Rigetti erprobte beispielsweise die Leistungsfähigkeit seines „Aspen“-Prozessors durch Zusammenführung frei zugänglicher Daten der New Yorker Börse, um zu prognostizieren, ob die Börse am Folgetag höher oder niedriger abschließen würde.

Im Projekt **PlanQK** (Plattform und Ökosystem für Quantenunterstützte Künstliche Intelligenz) erkundet das QAR-Lab gemeinsam mit 19 Partnern Anwendungsbereiche für Künstliche Intelligenz in deutschen mittelständischen Unternehmen, die über keine eigenen Research-Abteilungen verfügen. Ziel des Projekts ist, auch solchen Firmen Möglichkeiten zu eröffnen, frühzeitig Quantenvorteile zu nutzen. PlanQK bietet über eine einfach zugängliche Wissensplattform für quantenunterstützte Künstliche Intelligenz (QKI) Informationen zu verfügbaren Technologien, Expertenkontakten und kompletten Anwendungen.

Im Rahmen von PlanQK erarbeiten die Projektpartner konkrete Anwendungen aus den drei Bereichen:

- Prognose und Klassifizierung
- Wartung und Erkennung
- Planung und Optimierung

Zu den untersuchten Szenarien gehören:

- Erkennung und Prognose von Anomalien und Betrugsfällen im Finanzsektor
- Optimierung von Wartungsprozessen in der Industrie und im öffentlichen Personennahverkehr
- Optimierung industrieller Produktionslinien
- Vernetzung und Steuerung von Industriekomponenten
- Instandhaltung von Straßen und Stadtmöblierung (Straßenbeleuchtung, Parkbänke etc.)

Im September 2019 wurde das Projekt PlanQK im Innovationswettbewerb „Künstliche Intelligenz (KI) als Treiber für volkswirtschaftlich relevante Ökosysteme“ des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (BMWi) ausgezeichnet und für einen Zeitraum von drei Jahren mit mehr als elf Millionen Euro gefördert.³²

5.3 Ausbau von öffentlichen und unternehmensweiten Infrastrukturen

Neben Unternehmen, die etwa komplexe Produktionslinien betreiben, ihre Qualitätssicherung und Wartungspläne optimieren oder neue Materialien entwickeln wollen, kann auch der öffentliche Raum von Quantentechnologien profitieren.

Referenzprojekt des QAR-Lab mit Telekom Innovation Labs: CGFOFL

Im Rahmen des Breitbandausbaus für die Telekommunikation müssen in Deutschland zahlreiche Kabel unterirdisch verlegt werden. Dabei gilt es, Faktoren wie zu versorgende Endkundenanschlüsse, bereits vorhandene Leitungen, das Straßennetz

und die Bodenbeschaffenheit zu berücksichtigen, um die Grabungs- und Materialkosten zu minimieren. Hierfür kommen Quantum-Annealing-Algorithmen zum Einsatz.³³

Die Erkenntnisse aus dem Projekt lassen sich auch auf andere unterirdische Infrastruktur-Ausbaumaßnahmen übertragen – zum Beispiel auf die Bereiche:

- Energieversorgung und Smart Grid
- Wasserversorgung
- Kanalisation

Quantentechnologien bieten hier Vorteile:

- Optimierte Energienetze und Leitungsverläufe
- Optimierte Verfügbarkeit durch präzise Lastprognosen
- Effizientere, vorausschauende Wartungsprozesse (Predictive Maintenance)
- Zuverlässiger Schutz von Daten und Netzkomponenten vor Cyberattacken durch quantumcomputerresistente Verschlüsselungsmethoden

Die Gestaltung zukünftiger Energienetze mit Hilfe von Quantencomputern ist das Ziel des Projekts Q-Grid der E.ON Digital Technology GmbH und des Lehrstuhls für Mobile und Verteilte Systeme an der LMU München. Das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) stellt für die Durchführung ca. 1,7 Millionen Euro an Fördergeldern bereit. Im Mittelpunkt stehen Fragen wie die Optimierung von verteilten Netzen mit vielen lokalen Quellen und Verbrauchern durch quantengestützte Algorithmen.³⁴

5.4 Luft- und Raumfahrt, Logistik, Lagerhaltung

Zeit, Wegstrecken, Stoßzeiten und Verspätungen, Arbeitszeiten, Urlaubspläne, Ausfälle wegen Krankheit oder technischen Problemen, Terminvorgaben: In allen Branchen, in denen komplexe Prozesse unter Berücksichtigung vieler Faktoren möglichst effizient und wirtschaftlich organisiert werden müssen, lassen sich schon jetzt deutliche Quantenvorteile erzielen.

Referenzprojekt des QAR-Lab mit Airbus Defense and Space: CANOPUS

Im Rahmen des CANOPUS-Projekts wurde Quantum Annealing zur Lösung des Airport-Gate-Assignment-Problems (AGAP) erforscht. Dabei geht es um die schnelle, effiziente und pünktliche Zuweisung von Gates auf Flughäfen bei optimierten Laufwegen für Personal und Passagiere. Zusätzlich müssen weitere Faktoren wie Anschlussflüge, Flugplanänderungen und Verspätungen mit einkal-

kuliert werden. Mit herkömmlichen Großrechnern gestalten sich diese Berechnungen äußerst aufwendig und lassen sich mit der heute verfügbaren Quantenhardware bereits enorm beschleunigen. Auch dieses Modell lässt sich auf andere Industriebereiche übertragen – wie etwa die Optimierung

- des Güter-Nah- und Fernverkehrs auf Schiene und Straße
- der Organisation großer Warenlager

5.5 Automotive, industrielle Fertigung, Logistik, Verkehrsfluss und Maschinenlernen

Unternehmen der Automotive-Branche wie die BMW Group, Volkswagen oder Mercedes gehören zu den Vorreitern in der Erkundung der Anwendungspotenziale von Quantencomputing. Ihre Erkenntnisse sind auch auf andere Industriezweige von Nutzen.

Referenzprojekt des QAR-Lab mit Volkswagen Data:Lab: QASAR

Optimierungsaufgaben standen im Mittelpunkt des Projekts QASAR der Volkswagen AG: Ziel war, mit Hilfe eines Quantum-Annealers von D-Wave Lösungen für das Capacitated-Vehicle-Routing-Problem (CVRP) zu finden. Hierfür galt es, zur bestmöglichen Verteilung von Gütern die günstigsten Fahrtrouten auszuwählen, damit beispielsweise mehrere Lastwagen ihre Fracht möglichst schnell an verschiedenen Orten ausliefern können. Besonders komplex gestaltete sich die Aufgabenstellung, weil auch möglichst in Echtzeit Baustellen, Staus, Verspätungen, Geschäfts- und Öffnungszeiten etc. berücksichtigt werden mussten.

Von den gewonnenen Erkenntnissen profitieren auch andere Sektoren in Industrie, Wirtschaft und Verwaltung. Etwa bei der Optimierung

- des Verkehrsflusses und der Vermeidung von Staus im urbanen Straßenverkehr
- der Angebote von Taxi-Unternehmen und On-Demand-Car-Sharing-Modellen

In beiden Fällen ermöglicht u. a. die anonyme Auswertung von Bewegungsdaten, zu jeder spezifischen Tageszeit die schnellste Route durch die Stadt zu ermitteln oder durch zuverlässige Prognosen die Verfügbarkeit der Fahrzeugflotte besser an den tatsächlichen Bedarf anzupassen.

In einer weiteren Versuchsreihe wurden Möglichkeiten der Künstlichen Intelligenz und des Maschinenlernens erforscht – um beispielsweise Be-

wegungsabläufe und Wege von Roboterarmen entlang von Fertigungslinien zu optimieren. Die Erfahrungen aus diesem Projekt lassen sich über den Automotive-Sektor hinaus auf alle Bereiche der automatisierten industriellen Produktion übertragen.

BMW Group: Quantencomputing in Automobilentwicklung und -fertigung

Bereits 2017 richtete BMW ein interdisziplinäres Projektteam ein, um Anwendungspotenziale von Quantencomputing im Automotivesektor zu identifizieren – im Fokus steht für BMW die Frage, inwieweit sich Abläufe in Fahrzeugentwicklung, Produktion, Teilelogistik, Maschinenlernen, Materialforschung und Batteriezellchemie mit Hilfe von Quantencomputern optimieren lassen.³⁵

5.6 Chemie und Pharmazeutik, Materialforschung

Das Entwickeln, Testen und die Produktion von Chemikalien, Pharmazeutika und Materialien ist ein langwieriger, aufwendiger und kostenintensiver Prozess. Mit Hilfe von Quantencomputern lassen sich auch sehr komplexe Molekülstrukturen simulieren, die herkömmliche Superrechner bislang überfordert haben. Quantentechnologien können also dazu beitragen, die Entwicklungszyklen neuer Chemikalien, pharmazeutischer Wirkstoffe und Materialien deutlich zu verkürzen.³⁶

Boehringer Ingelheim: Kooperation mit Google Quantum AI

Im Januar 2021 gab Boehringer Ingelheim die Zusammenarbeit mit Google Quantum AI bekannt. Ziel der Partnerschaft ist, die Quantentechnologie von Google für die Simulation von Molekulardynamik zu nutzen, um das Design und die Modellierung von Wirkstoffen in der Pharmazie zu beschleunigen und zu optimieren.

Merck Group: Simulation biochemischer Prozesse

Gemeinsam mit dem Start-up HQS Quantum Simulations GmbH entwickelte der Pharma-Konzern Merck einen Algorithmus zur Simulation biochemischer Prozesse. Die Quantenchemie ermöglicht, komplexe Experimente auf dem Computer nachzubilden und das Verhalten von Molekülen zu simulieren. Dies eröffnet vielfältige Perspektiven für die Identifikation neuer potenzieller pharmazeutischer Wirkstoffe (z. B. zur Krebstherapie), aber auch für die Entwicklung neuer Materialien.³⁷

6

Fazit: mit dem QAR-Lab den eigenen „Quantenvorteil“ identifizieren!

Die Signale in Forschung, Industrie und Wirtschaft sind eindeutig: Langfristig wird Quantencomputing Prozesse und Abläufe in Industrie, Wirtschaft und Gesellschaft maßgeblich beeinflussen. Diese technologische Revolution wird unser Leben möglicherweise noch stärker verändern als die digitale Transformation. Deshalb empfiehlt das QAR-Lab auch kleineren und mittelständischen Unternehmen, sich heute schon mit dem Thema Quan-

tencomputing zu befassen und mögliche Anwendungsszenarien zu identifizieren.

Become Quantum Ready – das QAR-Lab unterstützt seine Partner aus der Industrie dabei, für Use Cases die passende Quantenhardware zu wählen und die entsprechenden Applikationen auf den Weg zu bringen.

Quellennachweis

- ¹ <https://www.basecamp.digital/quantencomputer-wo-liegen-die-einsatzgebiete/>
- ² https://www.soprasteria.de/docs/librariesprovider2/sopra-steria-de/publikationen/studien/potenzialanalyse-quantencomputing-expose.pdf?sfvrsn=ec6df1dc_3
- ³ <https://www.finanznachrichten.de/nachrichten-2021-11/54525896-studie-zu-quantencomputing-unternehmen-verharren-in-lauerstellung-007.htm>
- ⁴ <https://www.heise.de/news/D-Wave-verbessert-Quanten-Annealer-und-plant-auch-richtige-Quantencomputer-6211713.html>
<https://www.dwavesys.com/solutions-and-products/systems/>
- ⁵ <https://www.computerbase.de/2021-11/ibm-quantum-eagle-quantenprozessor-mit-127-qubits-als-vorbote-der-zukunft/>
- ⁶ <https://aws.amazon.com/de/braket/Quantencomputers/ionq/>
- ⁷ <https://aws.amazon.com/de/braket/Quantencomputers/rigetti/>
- ⁸ <https://www.globenewswire.com/news-release/2021/12/15/2352647/0/en/Rigetti-Computing-Announces-Next-Generation-40Q-and-80Q-Quantum-Systems.html>
- ⁹ <http://www.quantencomputer-info.de/quantencomputer/anwendungen-fuer-quantencomputer/>
- ¹⁰ Acatech (Hg.): Quantentechnologien (acatech HORIZONTE), München 2020, S. 31
- ¹¹ <https://www.businessinsider.com/ibm-unveils-ibm-q-system-one-the-first-commercial-Quantencomputer-2019-1>
- ¹² <https://www.dezeen.com/2019/01/11/ibm-q-system-one-map-universal-design-studio-Quantencomputer-ces/>
- ¹³ <https://www.ibm.com/blogs/think/de-de/2021/06/quantum-system-one/>
- ¹⁴ <https://www.wiwo.de/technologie/forschung/quantencomputer-das-computer-abo-in-der-provinz-fuer-11-500-euro-im-monat/27289352.html>
- ¹⁵ <https://qarlab.de/qar-lab-stellt-basf-bmw-sap-siemens-und-trumpf-die-ergebnisse-der-Quantum-Computing-optimization-challenge-vor/>
- ¹⁶ <https://qarlab.de/wirtschaftswoche-prof-linnhoff-popien-ueber-dringenden-bedarf-von-quantencomputing-experten/>
- ¹⁷ <https://qarlab.de/qar-lab-stellt-basf-bmw-sap-siemens-und-trumpf-die-ergebnisse-der-Quantum-Computing-optimization-challenge-vor/>
- ¹⁸ <https://qarlab.de/wirtschaftswoche-prof-linnhoff-popien-ueber-dringenden-bedarf-von-quantencomputing-experten/>
- ¹⁹ <https://qt.eu/about-quantum-flagship/introduction-to-the-quantum-flagship/>
- ²⁰ <https://www.bundesregierung.de/breg-de/suche/quantencomputing-1836542>
- ²¹ <https://www.fz-juelich.de/SharedDocs/Pressemitteilungen/UK/DE/2019/2019-10-25-junIQ.html>
- ²² Thinknet Quantentechnologie der Bayern Innovativ GmbH, Roadmap zur QuantenTech Vision Bayern, August 2021, S. 8
- ²³ Ebd.
- ²⁴ <https://www.industry-of-things.de/irgendwann-wird-jeder-quantencomputer-nutzen-bewusst-oder-unbewusst-a-776700/>
- ²⁵ <https://www.basecamp.digital/quantencomputer-wo-liegen-die-einsatzgebiete/>
- ²⁶ <https://www.qutac.de/ueber-qutac/>
- ²⁷ Thinknet Quantentechnologie der Bayern Innovativ GmbH, Roadmap zur QuantenTech Vision Bayern, August 2021, S. 7
- ²⁸ Ebd.
- ²⁹ https://www.bsi.bund.de/DE/Themen/Unternehmen-und-Organisationen/Informationen-und-Empfehlungen/Kryptografie/Post-Quanten-Kryptographie/post-quanten-kryptografie_node.html
- ³⁰ <https://www.forschung-it-sicherheit-kommunikationssysteme.de/projekte/aquorypt>
- ³¹ <https://www.fraunhofer.de/de/forschung/aktuelles-aus-der-forschung/quantentechnologien/quanten-ki.html>
- ³² https://www.fokus.fraunhofer.de/de/fokus/presse/ki-wettbewerb-bmwi_2019_09
- ³³ <https://qarlab.de/wirtschaft/projekte/cgfofl-telekom-innovation-labs/>
- ³⁴ <https://www.quantentechnologien.de/forschung/foerderung/anwendungsnetzwerk-fuer-das-quantencomputing/q-grid.html>
- ³⁵ <https://www.automotiveit.eu/exklusiv/wie-bmw-das-quantencomputing-weiter-forciert-250.html>
- ³⁶ <https://www.boehringer-ingenheim.de/pressemitteilung/partnerschaft-mit-google-bei-quantencomputern>
- ³⁷ <https://www.merckgroup.com/de/research/science-space/envisioning-tomorrow/smarter-connected-world/Quantum-Computing.html>
<https://www.basecamp.digital/quantencomputer-wo-liegen-die-einsatzgebiete/>

Impressum

HERAUSGEBER

Bayern Innovativ GmbH
Am Tullnaupark 8
90402 Nürnberg
T +49 911 20671-0
info@bayern-innovativ.de
www.bayern-innovativ.de

QAR-Lab – Quantum Applications
and Research Laboratory
Ludwig-Maximilians-Universität
München
Oettingenstraße 67
80538 München

BILDNACHWEIS

Titel: AdobeStock, Peter Jurik
S. 3: shutterstock@CI Photos
S. 4: shutterstock@Yurchanka Siarhei
S. 7: shutterstock@Bartlomiej K. Wroblewski
S. 9: AdobeStock@Production Perig
S. 10: AdobeStock@greenbutterfly
S. 13: shutterstock@Andrey Suslov

GESTALTUNG

Werbers Büro GmbH

Die Bayern Innovativ GmbH ist seit der Gründung im Jahr 1995 wichtiger Bestandteil der Innovationspolitik des Freistaats Bayern. Vision des Unternehmens ist ein Bayern, in dem jede tragfähige Idee und Technologie zur Innovation wird. Im Fokus stehen dabei insbesondere kleine und mittlere Unternehmen.

Das Angebot von Bayern Innovativ umfasst zum einen die Organisation von Netzwerken. Das „Thinknet Bayern“ vernetzt Unternehmen, Hochschulen, Forschungsinstitute, wichtige Gesellschaften des Freistaats Bayern, von ihm geförderte Organisationen und viele weitere Technologie- und Wissensnetzwerke zu einem starken Thinktank. Schwerpunkte sind die fünf Spezialisierungsfelder Digitalisierung, Energie, Gesundheit, Material & Produktion und Mobilität.

Die Angebote im Bereich Beratung & Förderung umfassen unter anderem Services zur Etablierung eines professionellen Technologie- und Innovationsmanagements, zum Patentwesen, zu Schutzrechten, zur internationalen Innovationsvermarktung und zu erfolgreichen Geschäftsmodellen in der Kultur- und Kreativwirtschaft. Als Projektträger Bayern ist Bayern Innovativ Träger mehrerer bayerischer Förderprogramme. Als Förderlotse navigiert Bayern Innovativ zu weiteren Förderprogrammen des Freistaats Bayern sowie des Bundes und der EU.

Bayern Innovativ begleitet seine Netzwerke, Beratungs- und Förderungsangebote mit Events & Messen. Für einen optimalen Wissenstransfer im Thinknet Bayern organisiert Bayern Innovativ unter anderem große Kongresse, hochkarätige Arbeitskreise, Workshops und Coachings und „Events 4.0“. Der „Gemeinschaftsstand Bayern Innovativ“ öffnet Unternehmen und Instituten kostengünstig das Tor zu internationalen Leitmesse.

Mehr Informationen: www.bayern-innovativ.de

QAR LAB

Das QAR-Lab der LMU steht unter dem Motto „Become Quantum ready“ und bringt seit Jahren erste Use Cases von Unternehmen auf die Rechner der Zukunft. Gegründet im Jahr 2016 hat es im Laufe der Jahre ein großes Know How aufgebaut, um die Technologie des Quantencomputings in der Praxis anzuwenden. Zahlreiche namhafte Konzerne profitieren bereits von diesem Expertenwissen.

Das QAR-Lab leistet darüber hinaus als Gründungsmitglied des europaweiten Leuchtturmprojekts PlanQK („Plattform und Ökosystem für quantenunterstützte KI“) Pionierarbeit dabei, die Quantencomputing-Technologie auf dem Gebiet der Künstlichen Intelligenz zu nutzen. Das QAR-Lab ist auch Partner des Munich Quantum Valley MQV.

Mehr Informationen: www.qarlab.de