

QUANTEN COMPUTING

2/4

Quantencomputing und
Künstliche Intelligenz - Anwendungen

Prof. Dr. Adrian Paschke

Dr. Nikolay Tcholtshev

Impressum

Herausgeberin:

Konrad-Adenauer-Stiftung e. V. 2021, Berlin

Umschlagfoto: © Adobe Stock/Bartek Wróblewski

Bildnachweis: S. 15 Prof. Dr. Adrian Paschke © Philipp Plum/Fraunhofer FOKUS

Dr. Nikolay Tcholtchev © Marc Frommer/Fraunhofer FOKUS

Gestaltung und Satz: yellow too, Pasiek Horntrich GbR



Der Text dieses Werkes ist lizenziert unter den Bedingungen von „Creative Commons Namensnennung-Weitergabe unter gleichen Bedingungen 4.0 international“, CC BY-SA 4.0 (abrufbar unter: <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/legalcode.de>).

ISBN 978-3-95721-905-3

Auf einen Blick

- › Der Einsatz von Quantencomputing verspricht einen Evolutionssprung vergleichbar mit der digitalen Revolution. Quantencomputer könnten große gesellschaftlich-relevante Problemstellungen in Echtzeit bearbeiten und bieten das Potenzial, bisher ungelöste Probleme in Angriff zu nehmen.
- › Ein bedeutendes Anwendungsfeld für Quantencomputer liegt im Bereich Künstliche Intelligenz. Quantencomputer stellen dabei „KI-Beschleuniger“ dar, mittels derer in Zukunft Logistik- und Produktionsprozesse optimiert, neue Materialanalysen ermöglicht und ein Beitrag zu einer nachhaltigen Gestaltung des städtischen Lebens und öffentlicher Dienstleistungen geleistet werden kann.
- › Für die Sicherstellung der Wettbewerbsfähigkeit im 21. Jahrhundert ist es essenziell, dass sich Deutschland und Europa bei der Entwicklung von Quantencomputern an die Spitze setzt, um nicht in Abhängigkeit von anderen Ländern zu geraten und dem technologischem Fortschritt hinterherzulaufen.

Inhaltsverzeichnis

1. Grundlagen	6
1.1 Warum brauchen wir Quantenunterstützung im Bereich Künstliche Intelligenz (KI)?	6
1.2 Was ist KI?.....	7
1.3 Was ist quantenunterstützte KI?.....	7
2. Anwendungsfelder	9
2.1 Wofür kann quantenunterstützte KI eingesetzt werden?	9
2.2 Was sind aktuelle Probleme und Herausforderungen?	10
3. Was kann Deutschland im Bereich quantenunterstützter KI tun?	13
4. Autoren	16

1. Grundlagen

Der Einsatz von Quantencomputing (QC) verspricht einen Evolutionssprung vergleichbar mit der digitalen Revolution. Quantencomputer könnten große gesellschaftsrelevante Problemstellungen in Echtzeit bearbeiten und bieten das Potenzial, bisher ungelöste Probleme in Angriff zu nehmen. Von allen Quantentechnologien wird für QC das größte wirtschaftliche Potenzial und der größte gesellschaftliche Einfluss vorausgesagt. Die Entwicklung von QC stellt möglicherweise eine der bedeutendsten wissenschaftlichen Herausforderungen unserer Zeit dar.

Daher ist es von essenzieller Notwendigkeit für die Sicherstellung der Wettbewerbsfähigkeit im 21. Jahrhundert, dass sich Deutschland bei der Entwicklung von QC an die Spitze setzt, um nicht in Abhängigkeit von anderen Ländern zu geraten und technologischem Fortschritt hinterherzulaufen. Quantencomputer eignen sich gut für die Verarbeitung von Prozessen, die bereits auf der Grundlage von Quanteneffekten stattfinden, z. B. bei der Simulation von chemischen Molekülen.

Nehmen wir als Beispiel die physikalischen und chemischen Prozesse in elektrischen Batterien. Diese basieren ebenfalls auf Quanteneffekten – deren Verständnis und Simulation auf Quantencomputern kann die Produktion von besseren und leistungsstärkeren Batterien erheblich beschleunigen. Zukünftig werden Modelle und Softwarebibliotheken benötigt, die diese Probleme aus der Domäne der Anwendungen in die „Sprache“ übersetzt, die ein Quantencomputer verarbeiten kann.

1.1 Warum brauchen wir Quantenunterstützung im Bereich Künstliche Intelligenz (KI)?

Künstliche Intelligenz (KI) ist eine der digitalen Schlüsseltechnologien, die allerdings eine intensive Nutzung von Rechenleistung erfordert. Für

die experimentelle Entwicklung und den Einsatz in neuen KI-Anwendungen steigt die benötigte Rechenzeit immer mehr an. Aktuell verdoppelt sich die mit klassischen Rechnern verfügbare Leistung alle 18 Monate, während sich der Aufwand für die Weiterentwicklung von KI alle 3,5 Monate verdoppelt. Daher suchen sowohl die Forschung als auch die Industrie dringend nach neuen Möglichkeiten, dem weiter steigenden Rechenbedarf in der KI durch neue Hardware zu begegnen.

Um den steigenden Bedarf an Rechenkapazität abzudecken, wird bereits spezielle KI-Hardware eingesetzt, z. B. Grafikkarten (GPU) als KI-Beschleuniger oder neuromorphe Chips. Ein echter „Quantensprung“ in Bezug auf die benötigte Rechenleistung wird vom Quantencomputer erwartet. Die Verbindung von QC und KI bietet die Möglichkeit, die zukunftsweisenden Vorteile von QC in kommerziellen Anwendungen zu integrieren. Die Technologie hat großes Potenzial, KI deutlich leistungsfähiger zu machen, um z. B. die komplexen Systeme in Wirtschaft und Industrie mit maschinellen Lernverfahren zu analysieren und komplizierte Simulations- und Optimierungsprobleme zu bewältigen.

Erste Quantencomputer stehen bereits kommerziell zur Verfügung bzw. sind unmittelbar vor der Markteinführung. Es ist durchaus möglich, dass in den nächsten Jahren Quantencomputer Probleme lösen können, für die traditionelle Computer praktisch nicht mehr infrage kommen, der sogenannte Quantenvorteil. Aktuell verwendet man noch sogenannte Noisy Intermediate-Scale Quantum-Computer (NISQ-Computer). Diese haben den Nachteil, dass sie noch nicht die Zuverlässigkeit klassischer Computer erreichen können.

Während diese Zuverlässigkeitsdefizite in vielen Bereichen problematisch sind, lebt gerade KI oft auch von der zufälligen Variation in den Berechnungen. Wo diese heute auf klassischen Rechnern aufwändig erzeugt wird, ist sie für

NISQ-Systeme bereits ganz natürlich. Zukünftig sind daher weitere Fortschritte hin zu fehlerkorrigierten bzw. fehlerfreien Quantencomputern und spezieller Quanten-KI-Beschleunigerhardware für quantenunterstützte KI-Algorithmen (QKI) zu erwarten.

Für Deutschland und Europa besteht großes Potenzial, wenn intensiv und frühzeitig auf die Entwicklung von quantenunterstützten Technologien und QKI-Anwendungen gesetzt wird. Dementsprechend gilt es, diese neuen Technologien Entscheiderinnen und Entscheidern verständlich zu machen und auch der Wirtschaft ohne große Hürden bereit zu stellen. Mit dem Aufbau einer Expertise bei der Entwicklung und Nutzung von QKI wird die Innovationskraft in der Industrie und Wirtschaft entstehen. Der vorliegende Beitrag soll daher in das neue Technologiefeld der quantenunterstützten KI und deren Potenzialen einführen, mögliche Anwendungen aufzeigen, den Forschungsstand und laufende Beispielprojekte darstellen sowie weitere Handlungsempfehlungen geben.

1.2 Was ist KI?

In den 50er-Jahren schlug man KI als Forschungsgebiet mit der Vision vor, dass eines Tages Maschinen sprechen, abstrakte Konzepte bilden und nicht nur Probleme bewältigen, deren Lösung bisher nur Menschen möglich war, sondern sich im Zuge dessen auch verbessern können. Seitdem wird KI intensiv erforscht und entwickelt sowie bereits für viele Aufgaben sehr erfolgreich eingesetzt. Dazu gehören bspw. formale Aufgaben, wie mathematische und logische Probleme zu lösen, aber auch medizinische Diagnosen zu stellen sowie juristisch und analytisch zu entscheiden. Darüber hinaus können KI-Systeme zunehmend alltägliche kognitive Aufgaben bewältigen, wie Sprechen, Laufen und Wahrnehmen. Auch wenn es paradox erscheint, sind gerade die für uns Menschen einfachen alltäglichen Aufgaben für eine KI eine viel größere Herausforderung als formale oder Expertinnen- und Expertenaufgaben.

Um diese Aufgaben zu lösen, kommen unterschiedliche Algorithmen und Methoden aus dem Bereich des Maschinellen Lernens (ML) und des Deep Learning (DL) zum Einsatz, die aus Daten lernen und (statistische) Muster erkennen. Zusätzlich gibt es semantische KI-Technologien, die den Schwerpunkt auf die semantische Wissensrepräsentation und die Interpretation mit logischem Schlussfolgern legen. Weitere KI-Algorithmen stammen aus dem Bereich der Planung und Optimierung, um (semi-)autonome Entscheidungen und Agieren einer KI zu ermöglichen. Diese Einsatzmöglichkeiten im Bereich autonomer, kooperativer und lernender KI können dabei physisch erscheinen, also in Robotern oder in „smarten“ Geräten und Anlagen integriert sein. Ergänzend hierzu können KI-Systeme digital implementiert werden, z. B. als Webagentinnen und -agenten, kognitive Assistentinnen und Assistenten oder auch als intelligente Dienste. Aktuell wird an der dritten Generation von KI-Systemen geforscht, die semantisches Wissen und dessen Interpretation sowie Erklärbarkeit mit Maschinellern Lernen und dem Transfer von Erlerntem vereinen.

1.3 Was ist quantenunterstützte KI?

Eingebettet in den Bereich Künstliche Intelligenz sind Quantencomputer zunächst einmal vielversprechende Neulinge in einer wachsenden Sammlung von möglichen KI-Beschleunigern. Quantencomputer nutzen zur Informationsverarbeitung Quanteneffekte wie Superposition oder Verschränkung. Während ein digitaler Computer mit Bits rechnet, arbeitet ein Quantencomputer mit Qubits, die im Gegensatz zu den klassischen Bits nicht nur genau einen von zwei möglichen Zuständen annehmen können, sondern auch eine Überlagerung beider ermöglichen. Dadurch können mit nur wenigen Qubits riesige Datenmengen mit komplexen Abhängigkeiten dargestellt werden. KI-Algorithmen des Maschinellen Lernens oder auch der quantenunterstützten Optimierung lassen sich für Quantencomputer so anpassen, dass sie mehrere Lösungswege gleichzeitig beschreiten können. Damit können Quantencomputer prinzipiell schneller Lösun-

gen finden und somit für Aufgaben eingesetzt werden, die klassische Computer nicht in einer angemessenen Zeit lösen können.

Jenseits des enormen Potenzials, KI zu beschleunigen, kann QC zum einen auch zur Entwicklung von vollständig neuen KI-Ansätzen und ML-Modellen führen. Zum anderen kann Maschinelles Lernen aber auch umgekehrt die Art und Weise verändern, wie Quantenalgorithmen erlernt und trainiert werden, sodass Quantencomputer in Kombination mit anderer hybrider KI-Hardware optimiert genutzt und Berechnungsergebnisse fehlerkorrigiert ausgelesen werden können.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass das Potenzial des Quanten-Maschinellen-Lernens, zukünftige KI-Anwendungen zu ermöglichen und zu innovieren sowie zur Entwicklung des Bereichs des Quantencomputers selbst beizutragen, ein vielsprechender Grund ist, warum Quanten-KI eine große Zukunft haben kann.

2. Anwendungsfelder und Herausforderungen

2.1 Wofür kann quantenunterstützte KI eingesetzt werden?

Blickt man auf mögliche Anwendungsfelder von quantenunterstützter KI, zeichnen sich bereits heute drei mögliche Bereiche ab, in den QKI eingesetzt werden wird.

2.1.1 Anwendung aus dem Bereich quantenunterstützte Optimierung

Optimierungsprobleme haben eine Vielzahl an realen Anwendungen, bspw. in der Logistik oder im Finanzwesen. Das mathematische Problem besteht darin, aus einer großen Menge möglicher Lösungen die optimale zu finden. Es gibt zahlreiche bekannte Optimierungsprobleme – wie z. B. das sogenannte Travelling Salesman Problem (TSP)¹ –, die als Basis zur Algorithmenentwicklung für Lösungen bei praxisrelevanten Optimierungsproblemen dienen. Das TSP ist eines der bekanntesten Optimierungsprobleme: Ein Handlungsreisender soll eine Rundreise unternehmen und an den Ausgangspunkt zurückkehren und auf seiner Reise möglichst wenige Kilometer zurücklegen. Praktische Anwendung finden sie bspw. in den Bereichen der Optimierung von Finanzportfolios sowie der Planung großer Transport- und Telekommunikationsnetze. In der produzierenden Industrie wiederum ergeben sich sehr komplexe Optimierungsprobleme, insbesondere bei der optimalen Routenfindung im Bereich Logistik oder bei der Optimierung des zeitlich aufeinander abgestimmten Einsatzes unterschiedlicher Ressourcen in Produktionsprozessen (Multi-Ressourcen-Scheduling).

Trotz starker Fortschritte im Bereich der Optimierungsalgorithmen (z. B. Operations Research) und KI sind viele der Optimierungsprobleme aber ab einer bestimmten Größe selbst durch heutige Supercomputer praktisch nicht lösbar. Das heißt diese Probleme können nicht in

einer angemessenen Zeit berechnet werden.² Die Lösung solcher industrieller Optimierungsprobleme stellt daher eine der vielversprechendsten Anwendungsfelder des Quantum Computing dar.

2.1.2 Anwendung aus dem Bereich quantenunterstützte KI zur Materialanalyse

Im Design neuer Materialien in der Materialforschung, chemischer Produkte, wie Düngemittel oder auch Medikamente in der pharmazeutischen Forschung, ist das Ermitteln unbekannter Eigenschaften von Molekülen und chemisch relevanter Größen (wie der Reaktionsgeschwindigkeit) notwendig. Um diese Eigenschaften und das Verhalten der molekularen Struktur von Materialien und Wirkstoffen vorherzusagen, sind Simulationen ein gängiges Werkzeug. Hierfür können auch maschinelle Lernverfahren eingesetzt werden. Es ist allerdings schwierig, umfangreiche Daten zum Trainieren der ML-Modelle per Simulation zu erzeugen. Simulationsverfahren auf klassischen Rechnern sind nur für Moleküle bis zu einer beschränkten Größe einsetzbar, da die Rechnungen dieser Art sehr zeitaufwändig oder sogar unmöglich sind.

Hier werden Quantencomputer relevant, da sie genutzt werden können, um quantenmechanische Materialeigenschaften mittels Simulation quantenmechanischer Systeme zu berechnen. Da der Quantenrechner für seine Berechnungen Quantenmechanik nutzt, sind Quantencomputer letztlich auch zur Berechnung der simulierenden Moleküle wesentlich besser geeignet. In der Materialforschung können so mit quantenmechanischen Materialsimulationen Daten erzeugt werden, die dann in KI-Ansätzen genutzt werden können, um Eigenschaften neuer Materialien vorherzusagen.

2.1.3 Anwendung aus dem Bereich Smart Cities/Mobilität und Transportation

Der Bereich Smart Cities ist ein natürliches Anwendungsgebiet für die Rechenkraft, die durch QC perspektivisch bereitgestellt wird. Viele Anwendungen der klassischen KI sind in einer smarten Stadt bereits heute im Einsatz. So werden z. B. entsprechende Algorithmen bei der Fahrplanoptimierung, bei der Berechnung effizienter Lieferketten (z. B. für Lebensmittel), bei der Simulation von Verkehrsflüssen oder auch bei der Spracherkennung für Antragstellungen verwendet. Dank QC könnten diese bestehenden KI-Ansätze in Zukunft allerdings noch viel häufiger, intensiver und in Echtzeit zum Einsatz kommen und so einen erheblichen Beitrag zu einer nachhaltigen Gestaltung des städtischen Lebens und öffentlicher Dienstleistungen beitragen.

Ein denkbare Szenario besteht darin, dass dank der neuen Rechenleistung von Quantencomputern Betreiberinnen und Betreiber des öffentlichen Nahverkehrs imstande wären, aktuelle Verkehrs- sowie Nutzerinnen- und Nutzerdaten viel schneller zu analysieren und eine optimale Reorganisation der Abläufe in Echtzeit berechnen zu können. Hierdurch könnte eine neue Qualität von Mobilitätsdienstleistungen erreicht werden, die nicht nur einen Beitrag zu einer erhöhten Lebensqualität liefert, sondern auch Ressourcen schont.

2.2 Was sind aktuelle Probleme und Herausforderungen?

2.2.1 Quantenrechner/Dienste in der Cloud – Anonymisierungsproblematik für Quantenrechner

Die Mehrheit der aktuell verfügbaren Quantenrechner wird über die Cloud zur Verfügung gestellt. Das bedeutet, dass Quantenberechnungen lokal programmiert und danach über das Internet an das Cloud-Backend kommuniziert werden, wo sie in entsprechende Warteschlangen einsortiert und anschließend auf den verfügbaren Quantenrechnerinstanzen ausgeführt werden. Für die Zukunft wird erwartet, dass Quantenalgorithmen

mit Daten versorgt werden, die sich auch auf verschiedene vertrauliche/persönliche Aspekte beziehen können. Solche Daten sind für den Trainings- und Testprozess von ML-Techniken von großer Bedeutung und werden in der Welt der Quanten-KI eine vergleichbare Rolle spielen.

Die Bereitstellung des Quantum Computings über die Cloud – kombiniert mit KI – entspricht dem KI-as-a-Service-Paradigma, das derzeit im Bereich der traditionellen KI etabliert wird. Dies impliziert jedoch, dass potenziell sensible Daten an eine zentrale Instanz geschickt werden müssen, wo entsprechende Berechnungen stattfinden. Das hat zu Ansätzen wie „Encrypted Computation“ geführt, bei dem die Daten im Voraus verschlüsselt werden und die KI-Berechnungen anschließend auf den verschlüsselten Daten ausgeführt werden. Dieser Aspekt ist in der Tat sehr kritisch im Kontext der Quanten-KI, wenn man davon ausgeht, dass die Daten auf einem traditionellen Rechner verschlüsselt und anschließend einem Quantencomputer für KI-Berechnungen zur Verfügung gestellt werden, wobei der Quantencomputer theoretisch die Fähigkeit hat, die Verschlüsselung mit hoher Wahrscheinlichkeit zu brechen und die sensiblen Daten freizulegen.

Die obigen Erläuterungen verdeutlichen die klare Notwendigkeit eines effizienten Datenschutzes in Kombination mit ausgeklügelten Schemata (z. B. Post-Quantum-Kryptografie) im Hinblick auf sensible Daten, die innerhalb eines Cloud-Quanten-KI-Setups verwendet werden. Die große Frage ist, ob man dem spezifischen Quantum-KI-Anbieter voll vertrauen kann. Wenn nicht, sollten entsprechende algorithmische Schemata vorhanden sein, um die zugehörigen Daten zu schützen und dennoch die vielversprechenden Quantum-KI-Funktionen maximal zu nutzen.

2.2.2 Standards für mehr Digitale Souveränität

Traditionell und insbesondere im Bereich des QC kann die potenzielle Falle der Hersteller- bzw. Dienstanbieterbindung (sogenannte Vendor-Lock-in-Effekte) als eine große Bedrohung für die technologische und digitale Souveränität in Europa angesehen werden. Vor allem unter der

Voraussetzung, dass es beim derzeitigen Stand der Dinge kaum groß angelegte europäische Wettbewerberinnen und Wettbewerber auf dem Markt gibt. Da der Zugriff auf die Quanten-KI über die Cloud erfolgt, ist es ein durchaus mögliches Szenario, dass Quanten-KI-Anwenderinnen und -Anwender in ganz Europa ihre Algorithmen für die maßgeschneiderten Schnittstellen (APIs) der spezifischen Quantum-Computing-Plattformen entwickeln. Dies würde automatisch zu einer starken Abhängigkeit in Schlüsselsektoren unserer Wirtschaft und Gesellschaft führen. Um dieses Risiko zu vermeiden, ist es von großer Bedeutung, offene und einheitliche Standards für den Zugang zur Cloud-basierten Quantum-Computing-KI-Infrastruktur zu etablieren. Europa und Deutschland sind traditionell stark auf dem Gebiet der Standardisierung und können auf eine lange Reihe erfolgreicher Initiativen in den Bereichen Telekommunikation, Transport, Mobilität, Materialien und intelligente Städte zurückblicken (um einige wenige zu nennen).

Diese Stärke sollte genutzt werden, um die Quanten-KI für die europäischen Gesellschaften auf der Grundlage einer starken technologischen Souveränität auf der Softwareebene nachhaltig nutzbar zu machen. Dabei ist es wichtig, neben den Aspekten der Standardisierung auch die Möglichkeit zu haben, die Quantum-KI-Plattformen gemäß den zu entwickelnden Standards zu evaluieren, zu testen und zu zertifizieren. Und auf diese Art und Weise sicherzustellen, dass die Vorgaben tatsächlich eingehalten werden und eine Herstellerabhängigkeit weniger wahrscheinlich ist.

2.2.3 Erklärbarkeit und Zertifizierung für Quanten-KI

Das Thema der Zertifizierung von Algorithmen der Künstlichen Intelligenz und des Maschinellen Lernens und darauf basierenden Systemen ist von großer Bedeutung für die Akzeptanz von KI in unserer Gesellschaft und ihre Anwendung in kritischen Infrastrukturen und Diensten. Dasselbe gilt gleichermaßen auch für die Quanten-KI. Daher brauchen wir Ansätze und Methoden, um Quanten-KI-Algorithmen so erklärbar zu machen, dass

sie Gegenstand von Zertifizierungsprüfungen und Evaluierungen durch die entsprechenden Gremien sein können.

Dies ist eine sehr ernste Herausforderung angesichts der Berechnungsspezifika von QC, die zu wahrscheinlichkeitsbasierten Ergebnissen führen, kombiniert mit der Instabilität der QC-Instanzen und den mathematischen Besonderheiten der ML-Algorithmen. Daher sind die Erklärbarkeit und Zertifizierung für Quanten-KI ein Forschungsthema mit besonderer Herausforderung, das in den kommenden Jahren sehr intensiv behandelt werden muss.

2.2.4 Unsicherheit der Recheneinheiten

Angesichts der großen Hoffnungen, die mit Quantumcomputing und Quanten-KI verbunden sind, muss klar festgestellt werden, dass die Hardwaretechnologie noch nicht so ausgereift ist, um einen klaren Vorteil gegenüber Hochleistungsrechnern bieten zu können. Um einen Quantenvorteil zu erreichen, ist eine größere Anzahl von Qubits erforderlich, was unweigerlich zu einer komplexeren Topologie der darunterliegenden Rechenarchitekturen führt. Das impliziert zusätzliche Schwierigkeiten bei den heutigen Noisy Intermediate-Scale Quantum Computern (NISQ-Computern), die insbesondere in einer höheren Fehleranfälligkeit bei Berechnungen münden.³ Trotz dieser höheren Fehleranfälligkeit können heutige NISQ-Computer dennoch für die Entwicklung von Quantenalgorithmen nützlich sein. Dafür sind Konzepte erforderlich, um Qubit-Fehler zu beheben und erfolgreiche Berechnungen zu liefern. Die heute entwickelten Konzepte zur Erhöhung der Zuverlässigkeit von NISQ-Computern können letztlich dazu beitragen, dass die allgemeine Zuverlässigkeit bei Berechnungen von Quantumcomputern langfristig erhöht wird.⁴

-
- 1 Bei TSP handelt es sich um ein kombinatorisches Orientierungsproblem, bei dem die Aufgabe darin besteht, dass eine Reihenfolge für den Besuch mehrerer Orte so zu wählen ist, dass keine Station außer der ersten mehr als einmal besucht wird, die gesamte Reisedistanz des Handlungsreisenden möglichst kurz und die erste Station gleich der letzten Station ist. Weitere bekannten Optimierungsprobleme wären das Capacitated Vehicle Routing Problem (CVRP) oder das Airport Gate Assignment (AGAP).
 - 2 Dies ist darauf zurückzuführen, dass für diese Art von komplexen Orientierungsproblemen keine effizienten deterministischen Lösungsverfahren bekannt sind, es handelt sich daher auch um sogenannte NP-Probleme.
 - 3 Diese treten insbesondere bei den sogenannten Dekohärenzzeiten (d. h. bei der Stabilität der Quantenzustände) zutage wie auch bei höheren Qubit-Fehlerraten.
 - 4 Eines dieser Konzepte ist durch die Idee von Quanten-DevOps gegeben, die eine regelmäßige Überprüfung der Zuverlässigkeit von NISQ-Quantum-Computing-Instanzen beinhaltet. Durch die Prüfung der rechnerischen Zuverlässigkeit grundlegender Quantengatter und -berechnungen zielt Quantum-DevOps darauf ab, konsequent die Wahrscheinlichkeit abzuschätzen, dass eine kritische große Berechnung (z. B. die stündliche Berechnung von Verkehrsflussmodellen für eine Stadt) Ergebnisse von ausreichender Qualität liefert. Wenn man diesen Ansatz verfolgt, um die am besten passende Cloud-QC-Instanz auszuwählen, und diesen Schritt direkt in die Prozesse der Entwicklung, des Testens und schließlich des Betriebs von quantenbasierten KI-Algorithmen integriert, hat dies das Potenzial, die allgemeine Zuverlässigkeit der Berechnungen zu erhöhen.

3. Was kann Deutschland im Bereich quantenunterstützter KI tun?

Folgende Aspekte müssen in Bezug auf den aktuellen Stand der Technologieentwicklung klar benannt werden. Daraus ergeben sich eindeutige Handlungsempfehlungen, die im Anschluss aufgelistet werden.

- › Realistischer Ausblick – Grenzen des Einsatzes
 - › Aktuell hat man mit einer großen Instabilität der Qubits zu kämpfen.
 - › Die Ergebnisse sind oft unzuverlässig.
 - › Die Anzahl der Qubits ist immer noch sehr niedrig.
 - › Die Kohärenzzeiten für Quantenschaltungen sind nicht ausreichend, um lange und skalierbare Berechnungen durchzuführen.
 - › Durch das Fehlen ausgereifter Quantenspeicher (Quantum Memory) ist die Berechnung/Lösung großer Probleminstanzen für viele Algorithmen schwierig bzw. unmöglich.
- › Handlungsbedarf im deutschen Mittelstand im Bereich QKI
 - › Fachkräftemangel und Ausbildung
 - › Identifikation von anwendbaren Lösungsansätzen und fehlende Wissens- und Datenbasis – Ausbau/Weiterförderung von Fraunhofer-Kompetenznetzwerk QC und Plattformen wie PlanQK
 - › Herstellerunabhängiger Zugang zu QKI – Etablierung von Standards
 - › Zertifizierungsunterstützung für Schnittstellen, Algorithmen und Quanten-KI-basierte Systeme
 - › Methoden, Techniken und Werkzeuge zur Qualitätssicherung und zur systematischen Gestaltung von Quanten-KI-Algorithmen
 - › Methoden und Techniken zur Minimierung der Qubit-Fehlerraten
 - › Integrative Entwicklungs- und Qualitätssicherungsansätze wie Quantum DevOps

Die oben genannten Punkte sind in dem spezifischen Kontext der aktuellen Technologielandschaft und Entwicklungsprozesse zu betrachten. Weltweit hat das Rennen um die Entwicklung skalierbarer Quantenrechner begonnen, die in der Praxis für wirtschaftliche und industrielle Anwendungen eine relevante Rolle spielen und insbesondere auch im Zusammenspiel mit Technologien der Künstlichen Intelligenz genutzt werden können. Bedingt durch die Fortschritte in der Quantenhardwaretechnologie ist zu erwarten, dass reale QKI-Anwendungen und QKI-Angebote mit kommerzieller Wertschöpfung ein hohes Potenzial entfalten werden.

Europa und im speziellen Deutschland sind hier in keiner schlechten Ausgangsposition. In Deutschland hat Quantenphysik eine lange wissenschaftliche Tradition. Die akademische Quantentechnologieforschung in Europa und in Deutschland gehört zur Weltspitze. In den vergangenen Jahren haben sich in Deutschland größere Institute, Exzellenzinitiativen und Kooperationen gebildet, die sich der Forschung zum Thema Quantentechnologien widmen. Darunter sind z. B. das Fraunhofer-Kompetenznetzwerk für QC, das Center for Integrated Quantum Science and Technology (IQST) in Stuttgart und Ulm, das Hannover Institut für Technologie (HITec), das Helmholtz Quantum Center (HQC) am Forschungszentrum Jülich oder das Center for Optical Quantum Technologies in Hamburg.

Allerdings gilt es, dieses reichliche Expertinnen- und Expertenwissen in Bezug auf die Algorithmenentwicklung, -implementierung und -anwendung der neuen Technologie QC und deren Kombination mit KI praxistauglich und für Unternehmen nutzbar zu machen. Vor allem kleine und mittelständische Unternehmen (KMU), die zwar das Domänenwissen, aber keine Forschungs- und Bildungsmittel für solche innovativen, aber auch

risikobehafteten Technologien besitzen, profitieren von einer regen Zusammenarbeit mit den Expertinnen und Experten aus angewandten Forschungseinrichtungen, wie z. B. mit dem Fraunhofer-Kompetenznetzwerk für QC und dem Zugang zu für Unternehmen aufbereiteten QC- und KI-Wissen über Plattformen wie PlanQK. Solche Aktivitäten gilt es in Zukunft im Rahmen von Forschungs- und Innovationsförderprogrammen noch weiter auszubauen.

Eine bedeutende Rolle spielt – neben dieser angewandten Forschungszusammenarbeit und dem Wissenstransfer – die praxisnahe Ausbildung, wie sie bspw. Fraunhofer in seinen Fraunhofer-Akademieprogrammen und über die Anbindung an die universitäre Lehre bietet. Da hier ein stark wachsender Bedarf an Fachkräften im Bereich QC und QKI zu erwarten ist, müssen entsprechende Lehrprogramme in der Nachwuchsausbildung und der professionellen Mitarbeiterinnen- und Mitarbeiterschulung aufgebaut werden.

Ein technischer Erfolgsfaktor wird sein, die Standardisierungsentwicklung im Quantumcomputing in Einklang mit den existierenden Standards im breiten KI-Markt zu bringen, um so u. a. Kompatibilität, Erweiterbarkeit, Austausch und Vergleichbarkeit der Quanten-KI zu gewährleisten und eine leichtere Integration in gängige KI-Werkzeuge und Anwendungen zu ermöglichen. Europa und Deutschland sind hier bereits mit ihren KI-Standards und Richtlinien aktiv und können so eine führende Position im standardisierten Anschluss dieser neuen Technologien einnehmen. Auf diese Weise kann Deutschland im weltweiten Hardwarewettbewerb kooperativ mit führenden Anbieterinnen und Anbietern zusammenarbeiten und trotzdem sicherstellen, dass die digitale Souveränität und die europäischen Standards für den Einsatz von (Q)KI-Technologien eingehalten werden.

Zusammengefasst kann so ein Mehrwert durch QKI-Innovation für die deutsche Wirtschaft und Industrie in den nächsten Jahren entstehen, der auf dem notwendigen Aufbau von Expertise in der Entwicklung und Nutzung von QKI sowie auf Plattformtechnologien und Standards für QKI basiert.

Was macht das Fraunhofer-Institut FOKUS im Bereich quantenunterstützte KI?

Das Fraunhofer-Institut FOKUS engagiert sich in mehreren Bereichen, um einen Beitrag dazu zu leisten, dass sich Deutschland bei der Entwicklung von QC an die Spitze setzt, um nicht in Abhängigkeit von anderen Ländern zu geraten und dem technologischen Fortschritt hinterherzulaufen:

BMWi PlanQK – Plattform für quantenunterstützte KI

Gefördert durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) wird in diesem Projekt eine Plattform für quantenunterstützte KI – kurz QKI – entwickelt, die zugleich zur Schaffung und Förderung eines QC-Ökosystems beitragen soll. Hierbei wird unterschiedliche Expertise zusammengeführt, die für die Entwicklung von KI-Anwendungen, die von Quantencomputern profitieren können, notwendig ist. Zugleich wird ein Netzwerk aufgebaut, das aus Spezialistinnen und Spezialisten für KI und QC, Entwicklerinnen und Entwicklern konkreter QKI-Anwendungen sowie Nutzerinnen und Nutzern, Kundinnen und Kunden, Dienstleisterinnen und Dienstleistern und Beraterinnen und Beratern besteht. Ziel dieses Netzwerkes ist es, zum Erfolg Deutschlands im Bereich QC beizutragen. Wenn Sie mehr über dieses spannende Projekt erfahren wollen, folgen Sie diesem Link: <https://planqk.de/>

Fraunhofer-Kompetenznetzwerk QC

Parallel zu PlanQK haben sich mehrere Fraunhofer-Institute zu dem Fraunhofer-Kompetenznetzwerk für Quantencomputing zusammengeschlossen, um die Vernetzung und Forschungsexzellenz zu stärken. Aufgrund der Vielfalt der bei diesem Thema notwendigen Expertise werden im Fraunhofer-Kompetenznetzwerk eine Vielzahl unterschiedlicher Themengebiete und Disziplinen zusammengeführt. Im Rahmen des Netzwerkes wird die Fraunhofer-Strategieentwicklung im Bereich Quanten-IT bestimmt, Roadmaps und Strategie-papiere werden ausgearbeitet und der Zugang zu der IBM-Quantum-Infrastruktur wird geregelt. So baut die Fraunhofer-Gesellschaft zusammen mit IBM ein „IBM Q System One“ in Deutschland auf, das für Forschungsarbeiten im Bereich Quantum Machine Learning und KI mit Bezug zu konkreten

Anwendungsszenarien aus Wissenschaft und Industrie ab 2021 genutzt werden kann. Es dient als zentrale Anlaufstelle für die Wirtschaft, und zwar unter dem Dach des europäischen Datenschutzes und der technologischen Souveränität. Dabei geht es um die Stärkung des deutschen Forschungsstandortes als Gemeinschaftswerk von Wissenschaft und Wirtschaft. Wenn Sie mehr über dieses Netzwerk erfahren wollen, folgen Sie diesem Link: <https://www.ibm.com/de-de/blogs/think/2020/11/03/fraunhofer-kompetenznetzwerk-quantencomputing/>

Die regionalen Kompetenzzentren

Insgesamt sind derzeit sieben regionale Kompetenzzentren Quantencomputing geplant. Sie liegen in den Bundesländern Baden-Württemberg, Bayern, Berlin, Hessen, Nordrhein-Westfalen, Rheinland-Pfalz und Sachsen und haben unterschiedliche Schwerpunkte.

Die Zentren in Baden-Württemberg und Rheinland-Pfalz haben ihre Arbeit bereits aufgenommen. Die anderen Zentren befinden sich im Aufbau und werden folgen. Sie dienen alle als Anlaufstelle vor Ort und haben jeweils unterschiedliche Schwerpunkte: Baden-Württemberg mit dem Schwerpunkt Quantencomputing mit Quantenhardware und Quantensoftware Co-Design für die nächste Generation von QC, Bayern mit dem Schwerpunkt Quantensicherheit, Berlin unter Federführung von Fraunhofer FOKUS mit dem Schwerpunkt Quantenplattformen, Sachsen mit dem Schwerpunkt siliziumbasierte Quantenhardware, NRW mit dem Schwerpunkt Quanten-KI, Rheinland-Pfalz mit dem Schwerpunkt Quanten-High-Performance-Computing und Hessen mit dem Schwerpunkt Quanten-ATHENE im Bereich Cybersicherheit, Datenschutz und Schutz von kritischer Infrastruktur.

Ziel der Kompetenzzentren ist es, mit Quantencomputing eine entscheidende Zukunftstechnologie erfolgreich zu gestalten sowie durch den frühzeitigen Aufbau von Fachkompetenzen in Deutschland schon heute an der Wertschöpfung dieser neuen Technologie teilzuhaben. Hierfür erhalten Mitglieder sowie Partnerinnen und Partner des Fraunhofer-Kompetenznetzwerkes aus Forschung und Industrie Zugriff auf die IBM-Quantencomputer und können von einem Schulungsangebot, das aktuell im Kompetenznetzwerk aufgebaut wird, profitieren.

Autoren



Prof. Dr. rer. nat. Adrian Paschke ist Leiter des Data Analytics Center (DANA) am Fraunhofer-Institut für Offene Kommunikationssysteme (FOKUS) und Lehrstuhlinhaber für semantische Datenintelligenz am Institut für Informatik der Freien Universität Berlin (FUB). Darüber hinaus ist er u. a. professorales Mitglied am Einstein Center Digital Future (ECDF) und dem Dahlem Center for Machine Learning and Robotics (DCMLR). Weiterhin leitet Herr Prof. Dr. rer. Nat. die Corporate Semantic Web Gruppe (AG CSW) und ist Gründer der Berlin Semantic Web Meetup und der Semantic Web Applications and Tools for the Life Sciences (SWAT4HCLS) Gruppe.



Dr. Nikolay Tcholtchev ist promovierter Ingenieur und Diplom-Informatiker der Technischen Universität Berlin. Derzeit arbeitet er für das Fraunhofer-Institut für Offene Kommunikationssysteme (FOKUS), wo er Projekte u. a. in den Bereichen Smart Cities (Open Urban Platforms), Netzwerk- und Systemmanagement, Cybersecurity, Blockchain, Smart Energy, IoT, Künstliche Intelligenz, Model-basiertes Testen und Testen für Sicherheitsaspekte kritischer Infrastrukturen leitet bzw. an diesen mitwirkt.

