

Quantencomputing in Deutschland: Potenziale erschließen und die Wirtschaft aktivieren

Erfolgsfaktoren und Handlungsempfehlungen

Auf einen Blick

Quantencomputing in Deutschland: Potenziale erschließen und die Wirtschaft aktivieren

Ausgangslage

Das Quantencomputing (QC) hat in den letzten Jahren Fortschritte gemacht und nähert sich zunehmend der wirtschaftlichen Relevanz. Die beträchtliche öffentliche Förderung in Deutschland und Europa schafft gute Voraussetzungen für ein wettbewerbsfähiges QC-Ökosystem. Es besteht aber die Gefahr, dass die Investitionen zurückgehen und Fortschritt stagnieren könnte, wenn der konkrete wirtschaftliche Nutzen des QCs für die Wirtschaft in den kommenden paar Jahren nicht nachgewiesen wird.

Bitkom-Bewertung

Der akademische Sektor ist bereits gut aufgestellt und es werden zunehmend Startups gegründet. Die Einbindung von großen und mittelständischen Unternehmen insbesondere aus der potenziellen Anwenderschaft ist aber noch begrenzt. Zudem sind die derzeitigen Förderstrukturen noch heterogen, es fehlt an einer konsequenten nationalen Strategie. Um Technologieführer im Bereich in QC zu werden, muss der Nachweis von wirtschaftsrelevantem Quantenvorteil in den kommenden Jahren zu einem vorrangigen Ziel werden und die strategische Richtung vorgeben.

Das Wichtigste

Für eine holistische und wirtschaftsorientierte Entwicklung des QC-Ökosystems ist es zum einen notwendig, europäische und deutsche führende Technologieanbieter entlang der Wertschöpfungskette zu etablieren. Zum anderen soll das breite Spektrum von deutschen und europäischen Anwenderunternehmen in der Lage sein, die Technologieangebote von marktführenden europäischen und nicht-europäischen Unternehmen souverän einzusetzen und dabei vertrauliches Know-how über die Anwendung zu bewahren. Folgende Faktoren sind dabei erfolgsentscheidend:

- **Parallel zur Hardware-Entwicklung soll ein stärkerer Fokus auf Software-Stack und industrierelevante Anwendungen inklusive Infrastrukturen gelegt werden**
- **Die Unterstützung potenzieller Anwenderunternehmen, u. a. durch einen niederschweligen und standardisierten Zugang zu verfügbaren Anwendungen und Lösungsangeboten, Beratungsleistungen sowie modulare Aus- und Weiterbildungsprogramme**
- **Der Aufbau einer bundesweiten und ressortübergreifenden Plattform zur Koordination und Ergebnismonitoring von Förderaktivitäten sowie die Abstimmung mit europäischen Initiativen**

Bitkom-Zahl

2%

der Unternehmen in Deutschland probieren die Quantencomputing-Technologie in der Praxis aus und experimentieren mit möglichen Anwendungsszenarien. *

* lt. einer repräsentativen Befragung im Auftrag des Digitalverbands Bitkom im Mai 2022)

Inhalt

Einführung	4
1 Ökosystem & Technologie	5
Unterstützung von potenziellen Anwendern	5
Use-Case-Entwicklung	6
Cloud-Zugang & Datenschutz	7
Stärkung der Wertschöpfungskette	8
Standards	9
Fachkräfte & Ausbildung	10
2 Bitkom Einschätzungen zu aktuellen Fördermaßnahmen	12
3 Handlungsempfehlungen	15

Einführung

Die Entwicklung von **Quantencomputing (QC)** hat in den letzten Jahren enorme Fortschritte gemacht, so dass sich diese Technologie **zunehmend der wirtschaftlichen Relevanz nähert**. Die beträchtliche öffentliche Förderung von Quantentechnologien, u. a. im Rahmen der Europäischen Quantum-Flagship-Initiative sowie nationale Fördermaßnahmen, schaffen gute Voraussetzungen für ein wettbewerbsfähiges deutsches und europäisches Ökosystem und eine führende Position in diesem Technologieumfeld.

Insbesondere das akademische Quanten-Ökosystem ist in Deutschland und Europa bereits gut aufgestellt und vernetzt, mit starkem Fokus auf die Grundlagenforschung. Auf Seiten der Industrie werden zunehmend Startups gegründet. Die Beteiligung an der Hardware-Entwicklung für QC-Systeme von großen und mittelständischen Unternehmen ist in den letzten Jahren gestiegen, aber immer noch begrenzt. Es fehlt jedoch an Unternehmen, die sich an der Entwicklung von Software-Stacks beteiligen. So gibt es das 2021 gegründete Quantum Technology & Application Consortium (QUTAC), welches die vorwettbewerbliche Entwicklung von Anwendungen und Algorithmen zum Ziel hat, jedoch bleibt QUTAC auf große deutsche Unternehmen beschränkt. **Das breite Spektrum der potenziellen Anwenderlandschaft ist noch nicht integriert**. Zudem mangelt es in Deutschland und Europa an Unternehmen, die als Systemintegratoren auftreten.

In Europa gibt es derzeit nur wenige Akteure, die bereits heute vergleichbare Hardware-Lösungen wie führende US-amerikanische oder kanadische Unternehmen anbieten bzw. die bereit sind, intensiv in QC-Technologie zu investieren. Dies ist ein Wettbewerbsnachteil. Nicht nur die USA und Kanada, auch China investiert stark in die Entwicklung von Quantentechnologien: im Rahmen des aktuellen Fünfjahresplans hat China mit 15,3 Milliarden US-Dollar bisher die meisten öffentlichen Mittel aller Länder angekündigt¹. **Es ist eine herausfordernde Aufgabe, mit den globalen Entwicklungen und privaten und öffentlichen Investitionen Schritt zu halten.**

Aufgrund des weltweiten Rückgangs der Wirtschaftsdynamik besteht die reale Gefahr, dass die Investitionen zurückgehen und der Fortschritt stagnieren könnte, wenn der konkrete wirtschaftliche Nutzen des QCs für die Industrie nicht kurzfristig, d. h. in den kommenden Jahren nachgewiesen wird. Um dies zu vermeiden und sicherzustellen, dass Europa und Deutschland in diesem Bereich auch in Zukunft nachhaltig souverän handeln können, ist **eine holistische, langfristige, wirtschaftsorientierte und sozialverantwortliche Betrachtung und Förderung des QC-Ökosystems notwendig**. In diesem Zusammenhang ist eine klare Formulierung von Förderzielen und -strategien sowie eine bessere Koordination der Initiativen seitens der deutschen und der europäischen Politik geboten.

105

Patentfamilien sind im Bereich Quantencomputing registriert bei denen sich die Behörde des Antragstellers in Deutschland befindet.*

* [KPIs - QUTAC](#) (Stand: Oktober 2022)

¹ [McKinsey Quantum Technology Monitor 2023 | McKinsey & Company](#)

In diesem Papier stellen wir Faktoren vor, die, aus Bitkom-Sicht, erfolgsentscheidend für eine breite wirtschaftliche Wirkung der Quantencomputing-Technologie in Deutschland sind. Darüber hinaus geben wir eine Einschätzung über den derzeitigen Stand des Ökosystems und die Schwerpunkte der aktuellen Fördermaßnahmen. Außerdem identifizieren wir Bereiche, in denen aus Sicht des Bitkom ein verstärkter Handlungsbedarf besteht.

1 Ökosystem & Technologie

Für eine holistische und wirtschaftsorientierte Entwicklung des QC-Ökosystems ist es zum einen notwendig, **europäische und deutsche Marktführer entlang der Wertschöpfungskette zu etablieren, die Technologielösungen mit einem klaren Nutzen für die Anwenderbranchen anbieten.**

Zum anderen sollen deutsche und europäische Anwenderunternehmen, von Großkonzernen bis hin zu KMUs und Startups, in der Lage sein, die **Technologieangebote von marktführenden europäischen und nicht-europäischen Unternehmen im Quantencomputing souverän einzusetzen und zu nutzen** und dabei vertrauliches Know-how über die Anwendung zu bewahren. Dies erfordert z. B. ein Hinarbeiten auf offene standardisierte Schnittstellen über dem gesamten Stack, um ein Vendor Lock-in zu vermeiden sowie einen Rahmen für die Vergleichbarkeit verschiedener Produkte und Services bereitzustellen.

Mehrere Faktoren, die sowohl Technologiehersteller als auch Anwenderindustrie betreffen, tragen zu einer solchen Entwicklung bei und sollten möglichst frühzeitig aufgegriffen werden.

Unterstützung von potenziellen Anwendern

Das Bewusstsein für das Potenzial von QC-Anwendungen hat in den letzten Jahren zugenommen, und große Unternehmen in Deutschland untersuchen vermehrt potenzielle Anwendungsfälle. Um eine Breitenwirkung in der deutschen Wirtschaft zu erzielen, ist es notwendig, dieses Bewusstsein in der breiten Anwenderlandschaft (d. h. auch in den KMUs) zu wecken. Hierbei ist ein **niederschwelliger, verteilter und standardisierter Zugang zu den verfügbaren Lösungsangeboten und Systemen** von zentraler Bedeutung. Wichtig sind außerdem gezielte Maßnahmen, die Unternehmen dabei unterstützen, potenzielle Anwendungsfälle für das QC zu identifizieren und zu klären, ob und wie QC einen Vorteil bieten kann.

Obwohl es noch keinen Quantencomputer gibt, der wirtschaftsrelevante Probleme lösen kann, sind bereits viele erste Lösungsangebote entstanden. Diese verfügen jedoch nicht über allgemeine Standards und sind hochkomplex. Um ein Problem auf einem Quantencomputer zu lösen, müssen Anwenderinnen und Anwender zurzeit viel über die Hardware und das jeweilige Framework verstehen. Außerdem sind die Algorithmen nicht leicht von einem System auf ein anderes übertragbar. Stattdessen muss jede Lösung auf einer neuen Plattform neu implementiert und optimiert werden. (weitere Details über die Rolle von Integrations- und Portabilitätsstandards sind im Abschnitt „[Standards](#)“ aufgeführt.)

Für Anwenderinnen und Anwender, insbesondere aus kleinen und mittleren Unternehmen ohne Quantenexpertise, ist es sehr schwierig, die Angebote zu bewerten und zu vergleichen, was eine hohe Hürde für den Einstieg darstellt.

Um dies zu erleichtern, könnten **gut dokumentierte Anwendungsfälle für die wichtigsten Plattformen** bereitgestellt werden. Diese sollten ein gewisses Potenzial für den Transfer haben und sich auf Endanwendungen und konkrete Probleme beziehen, weniger auf Algorithmen. Daraus basierend gilt es, nachvollziehbare **Benchmarking-Sets** zu entwickeln, die es Endanwenderinnen und -anwendern erleichtern, Lösungen und Angebote zu vergleichen.

Es ist wichtig, dass die hier vorgestellten Lösungsangebote und Systeme auf ihre **wissenschaftliche Fundiertheit** geprüft sind. Dies kann z. B. durch Selbstverpflichtung zu Transparenz und «peer-reviewed» Standards derer, die Lösungen und System anbieten, ermöglicht werden. Ein unabhängiges und diverses Gremium kann darüber hinaus das Einhalten der Standards und die Validierung von Algorithmen punktuell überprüfen.

Use-Case-Entwicklung

Bislang ist ein bedeutsamer Quantenvorteil für die Wirtschaft noch nicht nachgewiesen worden. Derzeit wird eine Vielzahl von Anwendungsfällen erforscht und als Proof of Concepts demonstriert. Allerdings sind keine Anwendungsfälle in realen Größenordnungen bekannt, in denen der Mehrwert des QCs in Bezug auf Leistung, Beschleunigung, Kosten- oder Ressourcenaufwand in einem echten Geschäftsfall nachgewiesen wurde.

Die Suche nach potenziellen Anwendungen wird durch das komplett unterschiedliche Rechenmodell von Quantencomputern gegenüber herkömmlichen Rechnersystemen deutlich erschwert. Dies ist ein großes Hindernis sowohl für Anwenderunternehmen als auch für private Investoren in diesem Bereich. Für die Markterschließung und zur Sicherung von Risikokapital sind Programme mit einer starken Ausrichtung auf die Anwendungs- und Algorithmen-Entwicklung erforderlich.

Insbesondere sollten die Potenziale von Brückentechnologien, Simulatoren und hybriden Lösungen dringend verstärkt genutzt werden. Die Integration der Quantencomputer als Beschleuniger in eine Hochleistungsrechnerinfrastruktur (HPC-

Infrastruktur) ist ein zentraler Bereich für die Anwendungsentwicklung von Quantencomputern. Dabei gibt es drei Phasen:

- Zuerst muss die Quantencomputernutzung in die HPC-Anwendungsentwicklung integriert werden.
- Dafür ist die zweite Phase, die Middleware, notwendig: Sie ermöglicht die Programmier- und Infrastrukturabstraktion.
- Zuletzt müssen die Anwendungen durch die sogenannten Ressource-Management-Schicht effizient auf der klassischen und der Quanteninfrastruktur koordiniert ausgeführt werden können. So können die verfügbaren Rechnerressourcen optimal genutzt und die spezifischen Anforderungen wie z. B. Rekalibrierungen von Quantum-Devices erfüllt werden.

Diese hochkomplexe Schnittstellen-Architekturen werden in unterschiedlichsten Projekten in Forschung und Wirtschaft entwickelt. Es ist wichtig, weiter die **Harmonisierung, Bündelung und Entwicklung dieser Integration von Quantencomputer in HPC-Umgebungen** zu unterstützen, da diese Hochleistungsrechneranwendungen und -umgebungen sehr hohes Potential für erstmalig nachgewiesenen Quantenvorteil in Deutschland in der nahen Zukunft bieten.

Cloud-Zugang & Datenschutz

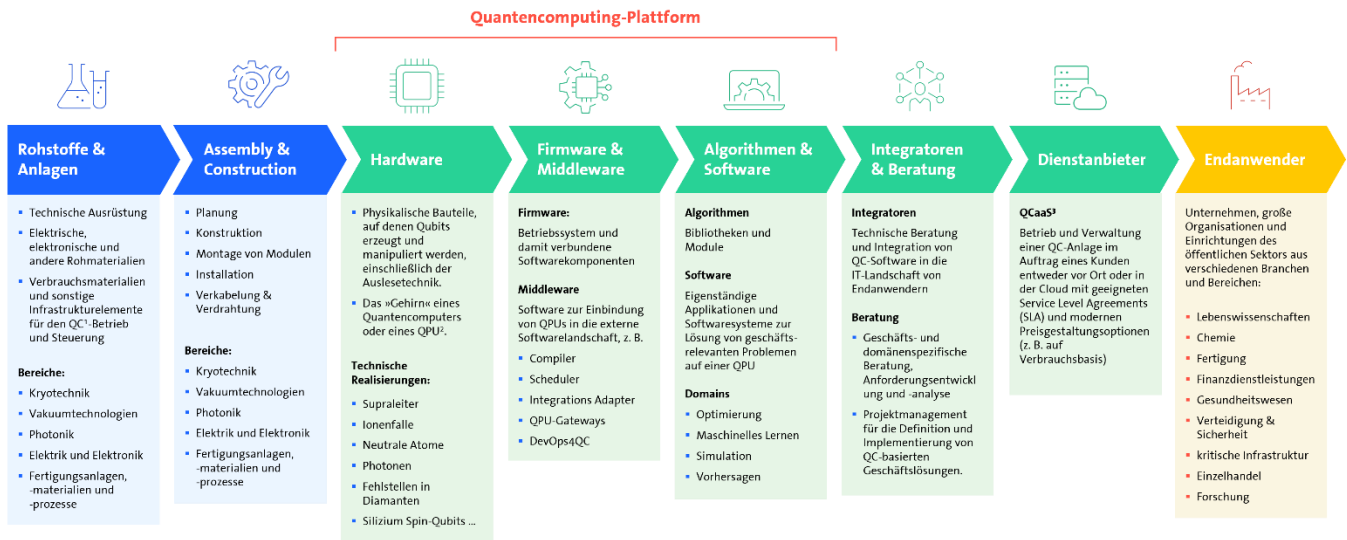
Es ist anzunehmen, dass Quantencomputer in vielen Einsatzszenarien in einem hybriden Verbund mit klassischen Computern als „Quantum-Coprozessor“ in Form eines Cloud-Service genutzt werden. Ein Betrieb von großen stationären Quantencomputern in eigenen Rechenzentren vor Ort wird auf absehbare Zeit vermutlich nur für wenige Großunternehmen, Forschungseinrichtungen und Organisationen mit speziellen Anforderungen (Militär, Teile der öffentlichen Verwaltung) möglich sein. Gründe sind die aktuell noch komplexe Infrastruktur und schnelle Innovations-Zyklen, verbunden mit hohen Investitionskosten. **Eine Bereitstellung als Cloud-Service wird einem breiten Kreis von Anwenderinnen und Anwenden niedrigschwelligen Zugang bieten.**

Bedenken bezüglich Datensicherheit bei Cloud-Nutzung stellen bei vielen Anwenderunternehmen ein großes Hindernis dar. Allerdings ist ein früher Zugang zu Cloud-Lösungen für den Aufbau eigener Kompetenzen zum zukünftigen souveränen Einsatz von Quantencomputern unabdingbar. In diesem Zusammenhang ist die **Bereitstellung datenschutzkonformer Lösungen und die Diversifizierung des Angebots von Plattformdiensten von zentraler Bedeutung für die europäische Souveränität im Quantencomputing.**

Ansätze für kleinere, mit vertretbarem Aufwand zu administrierende (z. B. Rack-based) Quantencomputing-Systeme werden derzeit nicht ausreichend berücksichtigt. Ähnlich zum Mikroprozessor in der Halbleitertechnologie wird es auch für einen Quantenprozessor in verschiedenen Industrien eigene Anwendungsbereiche geben. Der alleinige Fokus auf Cloud-Anwendungen birgt die Gefahr, das Potential dieser Technologie zu unterschätzen und damit das Abwandern in andere Regionen zu begünstigen. **Das Einbeziehen nicht Cloud-gebundener, nicht-stationärer und ggf.**

mobiler Quantencomputer in die Diskussionen ist daher eine Voraussetzung für die Bewertung des zukünftigen Nutzens der Technologie.

Stärkung der Wertschöpfungskette



¹Quantencomputing
²Quantum Processing Unit
³Quantencomputing-as-a-Service

Abbildung 1 Wertschöpfungskette des Quantencomputings

Für das Erreichen der technologischen Souveränität im Bereich des QCs ist eine ganzheitliche Betrachtung der Wertschöpfungskette notwendig. Dies beginnt mit der Kompetenz, komplette Quantencomputer zu bauen, die skalierbar sind. Darüber hinaus müssen neben der Entwicklung skalierbarer Hardware-Prototypen auch **Softwarelösungen, die Algorithmen-Entwicklung und die Integration von Quantencomputer-Hardware in bestehende HPC²- und Unternehmensarchitekturen** berücksichtigt und unterstützt werden.

Aktuell mangelt es Deutschland an Hardware-Software-**Technologieintegriertoren** und **Plattformdiensten**, die Cloud-Zugang zu verschiedenen QCs-Systemen inklusive der in der Entwicklung befindlichen europäischen Quantencomputer ermöglichen. **Kriterien wie z. B. einfacher Zugang, flexible Vertragsoptionen für unterschiedliche Firmengrößen (pay as you go), Datenschutz sowie Beratungsangebote spielen dabei eine wichtige Rolle.**

Darüber hinaus ist eine frühzeitige Sicherung von Kompetenzen in Design und Fertigung von spezialisierten **mikroelektronischen Komponenten und Systemen** für Quantentechnologien von zentraler Bedeutung. So lassen sich Abhängigkeiten in diesem Bereich künftig vermeiden. Beispielsweise sind im Bereich QC sowohl die Ausgangsmaterialien für die physische Herstellung von stabilen Quantencomputern³

² High-Performance Computing
³ Abhängig von der gewählten Technologie sind zurzeit die einzelnen Qubits in einem QC nur über sehr geringe Zeiten (Millisekunden bis Sekunden) stabil und „brechen“ nach dieser Zeitspanne (die sogenannte *decoherence time*) zusammen und verlieren unwiederbringlich alle Informationen.

als auch die notwendigen Schnittstellen zu klassischen Halbleitern sowie die Möglichkeit ihrer Integration von strategischer Bedeutung für Deutschland und Europa. Besonders im Bereich der Photonik hat Deutschland gute Voraussetzungen, die es weiter zu stärken und auszubauen gilt.

Quantencomputer sind nur ein Bereich der Quantentechnologie neben Quantenkommunikation, -Sensorik und -Bildgebung. Es sollte mehr in die Modularisierung von Komponenten und deren Verschaltung investiert werden, um Synergien zu nutzen. Dies würde den Aufbau eines **Zulieferer-Ökosystems** durch Partnerschaften unterstützen, die für eine erfolgreiche Skalierung von Qubit-Plattformen erforderlich sind. Darauf basierend ließen sich Standards entwickeln, die für eine Verbreiterung des Ökosystems unerlässlich sind.

Neben dem Ausbau der Lieferketten ist die Schaffung von günstigen Bedingungen für den Aufbau von **Pilotlinien für die Produktion** wichtig. Hier bietet sich die Chance, frühzeitig neue Produktionsfelder zu besetzen. Damit wird die Basis für die zukünftige Produktion gelegt.

Parallel zur Stärkung der nationalen und europäischen Lieferketten und Produktion gilt es, die **Lieferketten zu diversifizieren**; Partnerschaften mit vertrauenswürdigen Partnern aufzubauen und **Hürden bei der Beschaffung von Komponenten**, z. B. durch restriktive Exportvorschriften systematisch abzubauen.

Governance & Standards

Da die Forschung und Entwicklung von QC vor allem überregional geschieht, **ist es wichtig, dass Governance-Themen in europäischen und internationalen Gremien und Institutionen behandelt werden und die globale Vernetzung der Forschungs- und Entwicklungslandschaft politisch widergespiegelt wird** und entsprechend gültige Rahmenbedingungen geschaffen werden können. Es ist dabei vor allem auch wichtig, dass Vertreterinnen und Vertreter des Gesetzgebers im engen Austausch mit der Wissenschaft stehen, um sicherzustellen, dass Gesetzgebungen den aktuellen Stand der Forschung berücksichtigen. Hersteller und Anwender von QC sollten dabei unterstützt werden, ihre gesellschaftliche Rolle wahrzunehmen, so dass Politik und Gesellschaft über den aktuellen Stand der Forschung und Entwicklung informiert werden und die Einschätzung der Potenziale und Risiken von QC geteilt werden.

Die industrielle Nutzung von QC wird voraussichtlich derart erfolgen, dass klassische (d. h. nicht-QC) Applikationen für bestimmte (Teil-)Probleme und (Spezial-)Algorithmen geeignet an die tatsächlichen QC-Systeme (i. d. R. in der Cloud) gekoppelt werden. Ähnlich der heutigen Integration von Cloud-/SaaS-Applikationen in die IT-Landschaft von Unternehmen, gehen wir davon aus, dass Organisationen auch mehrere Quantencomputer an verschiedene Anwendungen im gesamten Cloud-to-Edge (C2E)-Kontinuum anbinden wollen. Die ökonomisch-wirtschaftliche Lösung dieses Integrationsproblems setzt daher passende **offene herstellerunabhängige Integrations- und Portabilitätsstandards** voraus.

Integrationsstandards betreffen dabei den Datenaustausch zwischen Applikation und QC-System, während Portabilitätsstandards sich auf das Portieren von Daten und

Algorithmen von einem QC-System auf ein anderes beziehen und etwa die Quantenalgorithmen selbst sowie entsprechende (Meta-)Daten und Algorithmen rund um die Initialisierung, das Pre- und das Post-Processing umfassen.

Es sind die ersten Standardisierungsprozesse in den Normungsinstituten (DIN⁴, ISO/IEC⁵, CEN/CENELEC⁶) angelaufen. Die Teilnahme an den Projekten sind potenziellen Marktteilnehmer durch den Beitritt in die entsprechenden Gremien und Komitees möglich. Gleichzeitig gilt es, durch Normung und Standardisierung die Innovationen in diesem Bereich weiter zu ermöglichen und voranzutreiben. Dafür soll der regelmäßige und enge Austausch von regulatorischen Institutionen, Herstellern und Anwendern von QC sowie breiter Öffentlichkeit initiiert und laufend unterstützt werden. Dies sollte auch in Abstimmung mit entsprechenden internationalen Gremien geschehen.

Fachkräfte & Ausbildung

Aus- und Weiterbildung im Bereich QC sind von zentraler Bedeutung, um Technologieentwicklung und -einsatz voranzutreiben sowie eine breite Wirkung und souveräne Nutzung sicherzustellen.

Die Technologie kann nur Fahrt aufnehmen, wenn der Nutzen im Vordergrund steht. Eine Übersetzung von Businessanforderungen in quantenbasierte Algorithmen und Lösungen erfolgt in den Unternehmen aktuell sehr *ad hoc* und wenig formalisiert, falls derartige Initiativen überhaupt schon aufgesetzt sind. Vereinzelt werden sogenannte Quantum Ambassadors eingesetzt; eine fachlich fundierte Aus- und Weiterbildung von Beratern ist wünschenswert, um Hype von Realität unterscheiden zu können.

Gegenwärtig haben die Quantencomputing-Fachleute i. d. R. theoretischen Physik oder Mathematik Hintergrund. Hier fehlt oft das Domänenwissen der anwendenden Industrie. Bei Informatikerinnen und Informatikern fehlt meist der Hintergrund zur Quantentheorie. Zurzeit erfordert die noch sehr niedrige technische Einsatzreife (*technology readiness level*, TRL) von QC noch tiefe Kenntnisse in dem Bereich – auch wenn man QC „nur“ programmieren möchte. **Der Betrieb von Quantencomputern verlangt außerdem nach einem neuen Profil für Administratoren, mit Fähigkeiten, die noch kaum in deren Ausbildung adressiert wurden.**

Um die Entwicklung und Implementierung von Lösungen zu wirtschaftlich relevanten Problemen zu fördern, sind **Ausbildungsangebote in den Bereichen Betriebswirtschaftslehre, Hard- und Softwareentwicklung, sowie den Betrieb der (QC-)Anwendungen** unabdinglich. Ein Studiengang Quanteninformatik ist erforderlich, um die Synergien aus Physik, Mathematik und Informatik in Universitäten und Fachhochschulen aufzubauen. Derzeit gibt es in der Industrie eine Vielzahl von Stellen für Doktoranden, die aber nicht oder nur schwer besetzt werden können, da Kandidatinnen und Kandidaten mit den entsprechenden Fähigkeiten fehlen.

⁴ Als deutscher Vertreter für ISO und CEN

⁵ ISO/IEC DIS 4879 Information technology — Quantum computing — Terminology and vocabulary. ISO/IEC AWI TR 18157 ist eine (einführende) *Technical Recommendation* und kein Standard.

⁶ vor allem in der Focus Group Quantum Technologies (FGQT), bei der das DIN den Secretary stellt.

Spezielle **Studiengänge mit entsprechendem Anwendungsschwerpunkt (etwa Wirtschaftsquanteninformatiker mit Schwerpunkt Quanteninformatik)** sind für den Aufbau einer wettbewerbsfähigen Industrie erforderlich.

Ein wichtiger Schritt, um die Akzeptanz und den Nutzwert der entwickelten Programme für die Industrie zu erhöhen, ist die **Ausarbeitung eines einheitlichen Zertifizierungsrahmens**. Die Zertifizierungsstufen und die entsprechenden Inhalte sollten unter Einbeziehung der Programmanbieter und der industriellen Nutzer entwickelt werden.

Es wird erwartet, dass mit wachsender Reife der Entwicklungsumgebungen und Entwicklungswerkzeuge ein tieferes Verständnis auf der Ebene der Quantenschaltkreise zunehmend unwichtiger wird. Daher wird auch die Nachqualifizierung von Arbeitskräften in Unternehmen wünschenswerter.

2 Bitkoms Einschätzungen zu aktuellen Fördermaßnahmen

Aktuell laufen zahlreiche Förderaktivitäten auf regionaler, nationaler und europäischer Ebene.

Auf Bundesebene wurde 2018 das [Rahmenprogramm der Bundesregierung „Quantentechnologien – von den Grundlagen zum Markt“](#) im Rahmen der Hightech-Strategie veröffentlicht. Das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) hat die Federführung der bis 2022 geplanten Maßnahmen übernommen. Im Jahr 2020 hat der Koalitionsausschuss im Rahmen des Zukunftspaketes zusätzlich 2 Milliarden Euro für die Entwicklung von Quantencomputern und zugehöriger Software in Deutschland vorgesehen. Die Summe wurde zwischen dem BMBF, dem Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) und dem Bundesfinanzministerium (BMF) aufgeteilt.

Zu den größten aktuell laufenden deutschen und europäischen Initiativen gehören zum Beispiel:

- Projekte vom BMBF und BMWK zum Aufbau von Quantencomputer-Demonstratoren⁷,
- Projekte vom BMBF, BMWK und Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) mit dem Schwerpunkt auf Entwicklung von Software und Algorithmen sowie Plattformen für die Erschließung und Integration von wirtschaftlichen Anwendungen des QC und
- eine Europäische Quantum Flagship Initiative, die sämtliche Quantentechnologien abdeckt, u. a. den Bau von QC-Demonstratoren verschiedener Technologien und die Entwicklung von Anwendungen und Algorithmen.

Hinzu kommen zahlreiche Förderinitiativen der einzelnen Bundesländer, Quanteninitiativen der [Fraunhofer-Gesellschaft](#), [Helmholtz-Gemeinschaft](#), Max-Planck-Gesellschaft und Leibniz-Gemeinschaft sowie diverse kleinere Förderaufrufe wie z. B. von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG).

Zunächst möchten wir festhalten, dass wir die **Vielzahl der Programme und die ausgeprägte Schwerpunktsetzung der vorherigen und aktuellen Bundesregierung auf Quantentechnologien und insbesondere auf den Bau von Quantencomputern sehr begrüßen**. Gerade die Förderung der Grundlagenforschung durch das BMBF und die

⁷ Die Quantencomputertechnologie hat noch einen sehr geringen Reifegrad. Gegenstand der aktuellen Förderinitiativen sind daher Quantencomputer der ersten Generation, auch als „Noisy Intermediate Scale Quantum“ (NISQ)-Technologie bezeichnet. Diese Quantencomputer haben in der Regel zwischen einer Handvoll und ein paar hundert Qubits, die stark verrauscht sind. Diese Systeme sind noch nicht geeignet, um einen Quantenvorteil für wirtschaftlich relevante Anwendungen in realen Größenordnungen zu erzeugen. Sie sind jedoch ein wichtiges Instrument, um erste Erfahrungen zu sammeln, Kompetenzen aufzubauen und erste Proof-of-Principle-Algorithmen entwickeln und auf Quantencomputern auszuführen. NISQ-Systeme gelten als ein Zwischenschritt auf dem Weg zu fehlertoleranten, hochskalierbaren Quantencomputern.

Anschubfinanzierung durch die Beauftragung von Industrie und Startups durch das BMWK sind wichtig, um das häusliche Grundproblem der Direktbeauftragung von vorwettbewerblichen Produkten zu umgehen.

Aus Sicht des Bitkom sind die derzeit bestehenden Strukturen noch zu heterogen und fragmentiert. Es fehlt eine **gemeinsame und konsequent umgesetzte Strategie auf nationaler Ebene**. Das betrifft vor allem ein übergeordnetes, ergebnisorientiertes und weisungsbefugtes Programmmanagement.

Der fragmentierte Ansatz und die fehlende Abstimmung zwischen den Initiativen bergen ein hohes Risiko von Überschneidungen und Doppelarbeit, da Projekte von verschiedenen Fördergebern ähnliche technologische und auch fachliche Ansätze verfolgen. Dies führt zu einer ineffizienten Nutzung der verfügbaren Ressourcen, insbesondere der begrenzten Personalressourcen im Bereich Quantentechnologie. Die Abstimmung der Aktivitäten von Beteiligten aus der Industrie ist aufgrund der teilweise widersprüchlichen rechtlichen Rahmenbedingungen, sehr zeitaufwändig und langwierig. Bei mehreren Lösungsansätzen, die sich derzeit in der Entwicklung befinden, könnte es zu einem Tauziehen kommen, wenn es darum geht, Anwenderunternehmen zum Testen und Benutzen der Systeme einzubinden.

Darüber hinaus besteht derzeit ein erhebliches **Missverhältnis zwischen der starken Förderung von F&E-Hardwareprojekten und der Entwicklung von wirtschaftsbezogenen Lösungen**. Gerade die Übersetzung von technologischen Fortschritten in Richtung wirtschaftlicher Betrachtung ist ein wichtiger Baustein in der Weiterentwicklung von Quantencomputern. Hier sollten insbesondere die Möglichkeiten und Grenzen der aktuellen „Noisy Intermediate Scale Quantum“ (NISQ) Technologien in machbare Anwendungsszenarien übersetzt werden, die den Wert der Technologie im jeweiligen Entwicklungsstand den Unternehmen transparent machen.

Eine strategische Entscheidung über die **Entwicklung einer Plattform, die die Nutzung von verschiedenen Hardwarelösungen für alle Fördermaßnahmen und die Industrie ermöglichen soll**, steht noch aus. Plattformen wie [PlanQK](#), welche vom BMWK initiiert wurde, sind ein möglicher Lösungsansatz. Es gilt zu prüfen, ob die Weiterentwicklung solcher Plattformen in die zentrale Strategie der Bundesrepublik Deutschland aufgenommen werden sollte.

Die Kaufkraft der öffentlichen Hand wird bei den derzeitigen Maßnahmen für kommerzielle Anreize noch nicht ausreichend genutzt. Der öffentliche Sektor könnte auch als potenzieller Nutzer die Nachfrageseite stärken, z. B. über Evaluationsprojekte und Challenges zu konkreten Anwendungen. Dadurch können entstehende Industrien gefördert werden. Es ist jedoch wichtig, **ein transparentes und agiles Antragsverfahren sowie faire und unternehmensfreundliche Rahmenbedingungen (z. B. IP-Regelungen)** zu etablieren. Diese Maßnahmen können den entstehenden Technologien mit geringem Reifegrad wie dem QC gerecht werden.

Zudem ist es nötig, Unternehmen des gehobenen Mittelstandes in die aktuellen Förderprogramme stärker einzubinden. Diese Unternehmen verfügen über weniger

Finanzmittel als Großkonzerne, zählen jedoch nicht als KMU und rücken dadurch in Konsortien häufig in den Hintergrund.

Die Startup-Initiative des BMBF „[Enabling Startup](#)“ zielt darauf ab, Ausgründungen im frühen Technologie-Reifegrad bis hin zur Prototypenentwicklung und zum Proof of Principle zu unterstützen. Dadurch lässt sich der Technologietransfer aus den Hochschulen ermöglichen. Dies ist zu begrüßen und sollte fortgesetzt werden. Das reicht jedoch nicht aus, um globale Technologieführer zu schaffen. Es besteht ein großer Bedarf, die weitere Skalierung von **Startups durch langfristige Investitionen angemessenen Umfangs zu fördern**, einschließlich des Aufbaus geeigneter Lieferketten, um Technologieführer in Europa und Deutschland zu schaffen. Hindernisse für das Wachstum von Startups müssen adressiert und beseitigt werden, so z. B. Probleme bei der Übertragung von IP von Universitäten zu den Startups.

Die Ausbildungsprojekte im Rahmen der BMBF-Initiative „Quantum Futur Education“ decken den Bedarf an Quantum Workforce nur teilweise ab. Der Schwerpunkt liegt auf der langfristigen akademischen Ausbildung an Hochschulen. Die Einbindung der (Anwender-)Industrie in die Kursentwicklung ist zu gering und auch der Praxisbezug fehlt weitgehend. Es besteht Bedarf an **modularen Programmen, die unterschiedliche Zielgruppen und Industrieanforderungen abdecken und praktische Erfahrungen im QC vermitteln**. Hier ist es empfehlenswert, international verfügbare Programme, die z. B. auch durch die Industrie oft kostenfrei angeboten, besser zu integrieren.

3 Handlungsempfehlungen

- 1. Einen stärkeren Fokus auf die oberen Schichten der QC-Wertschöpfungskette,** parallel zur Entwicklung von Hardware-Technologie legen. D. h. **Software-Stack und industrierelevante Anwendungen, die auf realen Geschäftsfällen basieren, inklusive Infrastrukturen und Umgebungen für Anwendungsforschung entwickeln.** Der Nachweis von Quantenvorteilen muss in den kommenden Jahren ein vorrangiges Ziel sein.
- 2. Unterstützung von potenziellen Anwendern bei der Einführung und Anwendung von QC.** Dabei ist ein **niederschwelliger und standardisierter Zugang zu den verfügbaren Anwendungs- und Lösungsangeboten** z. B. über Plattformdienste sowie Beratungs-Angebote von zentraler Bedeutung. Außerdem wichtig dabei ist die Entwicklung & Unterstützung von **modularen Aus- und Weiterbildungsprogrammen inklusive eines Zertifizierungs-Frameworks**, die verschiedene Zielgruppen und Anforderungen der Industrie abdecken. Von der Industrie bereits zur Verfügung gestellte Programme sollten dabei stärker integriert werden.
- 3. Langfristige Förderung der Beteiligung von Startups und mittelständischen Unternehmen** an der Entwicklung von Hard- und Software durch den Abbau von Hürden (z. B. Sicherung der IP-Rechte) und Schaffung attraktiver Bedingungen für die Teilnahme an Ausschreibungen und Förderprogrammen.
- 4. Fortgeführte Stärkung der nationalen und europäischen Lieferketten** für Komponenten für Quantentechnologien und **Pilotlinien für Produktion** für verschiedene Technologie-Plattformen sowie eine parallele **Diversifizierung** und Aufbau von Partnerschaften mit globalen Playern.
- 5. Die Kaufkraft der öffentlichen Hand nutzen,** um die Nachfrageseite weiterhin zu stärken, z. B. über konkrete Evaluationsprojekte und Challenges zu konkreten Anwendungen.
- 6. Unterstützung von Aktivitäten zur frühzeitigen Entwicklung von Integrations- und Portabilitätsstandards,** einschließlich **offener Schnittstellen** zwischen QC und klassischer IT sowie offener Schnittstellen zur Sicherung der nationalen und europäischen Souveränität.
- 7. Aufbau einer bundesweiten und ressortübergreifenden Plattform für Quantentechnologien zur Koordination von Förderaktivitäten auf der nationalen Ebene** sowie Abstimmung mit europäischen Initiativen. Dabei sollte u. a. ein **ressortübergreifende Monitoring-Framework** mit wirtschaftlich relevanten Indikatoren entwickelt werden, um die Messbarkeit der Maßnahmen und die Bewertung der Fortschritte zu ermöglichen.
- 8. Governance und verantwortungsvolle Forschung und Entwicklung.** Frühzeitiger Aufbau von (überregionalen) Governance-Strategien für QC. Neben Standardisierungsprozessen sollte dies auch das Einbinden von verbindlichen Responsible Research and Innovation (RRI) Prinzipien in die Fördermaßnahmen beinhalten.

Bitkom vertritt mehr als 2.000 Mitgliedsunternehmen aus der digitalen Wirtschaft. Sie erzielen allein mit IT- und Telekommunikationsleistungen jährlich Umsätze von 190 Milliarden Euro, darunter Exporte in Höhe von 50 Milliarden Euro. Die Bitkom-Mitglieder beschäftigen in Deutschland mehr als 2 Millionen Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter. Zu den Mitgliedern zählen mehr als 1.000 Mittelständler, über 500 Startups und nahezu alle Global Player. Sie bieten Software, IT-Services, Telekommunikations- oder Internetdienste an, stellen Geräte und Bauteile her, sind im Bereich der digitalen Medien tätig oder in anderer Weise Teil der digitalen Wirtschaft. 80 Prozent der Unternehmen haben ihren Hauptsitz in Deutschland, jeweils 8 Prozent kommen aus Europa und den USA, 4 Prozent aus anderen Regionen. Bitkom fördert und treibt die digitale Transformation der deutschen Wirtschaft und setzt sich für eine breite gesellschaftliche Teilhabe an den digitalen Entwicklungen ein. Ziel ist es, Deutschland zu einem weltweit führenden Digitalstandort zu machen.

Herausgeber

Bitkom e.V.
Albrechtstr. 10 | 10117 Berlin

Ansprechpartner

Dr. Natalia Stolyarchuk | Referentin Future Computing & Microelectronics
T 030 27576-187 | n.stolyarchuk@bitkom.org

Verantwortliches Bitkom-Gremium

AK High Performance Computing & Quantum Computing

Copyright

Bitkom 2022

Diese Publikation stellt eine allgemeine unverbindliche Information dar. Die Inhalte spiegeln die Auffassung im Bitkom zum Zeitpunkt der Veröffentlichung wider. Obwohl die Informationen mit größtmöglicher Sorgfalt erstellt wurden, besteht kein Anspruch auf sachliche Richtigkeit, Vollständigkeit und/oder Aktualität, insbesondere kann diese Publikation nicht den besonderen Umständen des Einzelfalles Rechnung tragen. Eine Verwendung liegt daher in der eigenen Verantwortung des Lesers. Jegliche Haftung wird ausgeschlossen. Alle Rechte, auch der auszugsweisen Vervielfältigung, liegen beim Bitkom oder den jeweiligen Rechteinhabern.