

Von Superposition zu Superstrategie?

Wie die EU ihre neue Politik für Quantentechnologien ausrichten sollte

Anselm Küsters



Ocelot, Majorana, Willow: Die neuesten Quantenchips amerikanischer Big-Tech-Unternehmen haben Spekulationen über einen Durchbruch in der Quantentechnologie angeheizt. Während China und die USA massiv in heimische Quantenprogramme investieren, sucht Europa einen eigenen Weg zwischen Grundlagenforschung, Autonomie und Industriestrategie. Wie sollte sich die EU mit der anstehenden Quantenstrategie positionieren? Dieser ceplnput empfiehlt einen dreigleisigen Ansatz, um die gute Ausgangslage nicht zu gefährden.

- ▶ **Vielfalt bei der Hardwareentwicklung:** Europa sollte einen „qubit-agnostischen“ Ansatz verfolgen, der die parallele Erforschung verschiedener Hardwaretechnologien wie supraleitende Qubits, Ionenfallen und photonische Systeme fördert. Diese Vielfalt erhöht die Resilienz gegenüber Forschungssackgassen und ermöglicht hybride Infrastrukturen, in denen Quantenprozessoren flexibel mit Supercomputern gekoppelt werden.
- ▶ **Eigenständige Software-Infrastruktur:** Um die digitale Souveränität zu sichern, muss Europa auf offene Standards und eigene Softwarelösungen setzen. Dazu gehören Quantenprogrammiersprachen, Betriebssysteme und Fehlerkorrekturverfahren, die die Skalierbarkeit und Zuverlässigkeit von Quantencomputern verbessern. Eine enge Abstimmung mit Initiativen wie dem EU Chips Act bietet zusätzliche Chancen, die europäischen Stärken in der Halbleiterindustrie und der Grundlagenforschung zu nutzen.
- ▶ **Koordinierte Marktinkubation:** Europa sollte eine koordinierte Beschaffungspolitik entwickeln, um die Nachfrage nach Quantenlösungen zu steigern und die Kommerzialisierung zu beschleunigen. Durch die Identifizierung industrieller Referenzprobleme und Benchmarks kann wirtschaftlicher Nutzen demonstriert werden.

Inhaltsverzeichnis

1	Ein weiterer Weckruf: Europas Quantenambitionen auf dem Prüfstand.....	3
2	Wie funktioniert ein Quantencomputer? Der Forschungsstand.....	4
3	Europas strategische Position im Quanten-Ökosystem	9
4	Vorschläge für die nächste EU-Quantenstrategie.....	11
5	Quantenordnung: Wie Quantencomputing die Spielregeln verändert	15
6	Fazit.....	16

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1:	Was ist Quantum Computing?	4
Abb. 2:	Moore's Gesetz für Quantencomputer?	5

Tabellenverzeichnis

Tab. 1:	Vergleich der Hardware-Technologien	6
---------	---	---

1 Ein weiterer Weckruf: Europas Quantenambitionen auf dem Prüfstand

Angesichts aktueller Forschungstrends ist es zunehmend wahrscheinlich, dass Quantencomputer mittelfristig zu den bedeutendsten Treibern des technologischen Wandels zählen werden. Die Vereinten Nationen haben das Jahr 2025 zum **Internationalen Jahr der Quantentechnologie** erklärt: Quantenphysikalische Erkenntnisse bilden die Grundlage für Computerprozessoren, Laser und Satellitennavigation, während sich neue Quantensysteme schon für innovative Anwendungen steuern lassen. Insbesondere das sogenannte Quantencomputing hat in den letzten Jahren Aufmerksamkeit erregt, weil es für bestimmte Problemstellungen asymptotisch schnellere Lösungen liefern kann als die derzeit besten bekannten Algorithmen.¹ Von einem funktionierenden, skalierbaren Quantencomputer erhofft man sich Durchbrüche in Bereichen wie der wissenschaftlichen Forschung, der Materialforschung, der Chemie und der Medikamentenentwicklung. Und auch Big Tech scheint auf den Geschmack gekommen zu sein: Neben IBM, das schon seit längerem immer größere Quantencomputer entwickelt, haben zuletzt Amazon (Ocelot), Microsoft (Majorana) und Google (Willow) eigene Quantenchips vorgelegt.

Europa kann in diesem Bereich durchaus stolz auf ein Erbe bahnbrechender Grundlagenforschung zurückblicken – man denke an die Arbeiten von Max Planck, Werner Heisenberg oder Erwin Schrödinger. Der Kontinent verfügt zudem über eine bessere Ausgangssituation als bei anderen geopolitisch umkämpften Schlüsseltechnologien wie etwa der Künstlichen Intelligenz (KI). Doch nicht alles ist rosig: die fehlenden industriellen Anwendungen sowie die mangelnde Einbindung privater Investoren könnten sich als Achillesferse der europäischen Strategie entpuppen. Wenn europäische Politiker **am 14. April 2025 den Weltquantentag** begehen, sollten sie deswegen Selbstbeweihräucherung vermeiden und sich stattdessen fragen, wie der Kontinent seine gute Position festigen oder gar ausbauen kann. Das jüngste Jahresgutachten der Expertenkommission Forschung und Innovation fordert eine umfassendere Strategie für Quantentechnologien, die das Thema „konsequent europäisch“ denkt, um die starke Ausgangsposition zu verteidigen und gegenüber den USA und China wettbewerbsfähig zu bleiben.²

Mit dem **Arbeitsprogramm 2025** möchte die neue Europäische Kommission dem Anspruch, eine Vorreiterrolle in der Quantenforschung einzunehmen, gerecht werden.³ Geplant sind Investitionen in Supercomputer, Quantenkommunikation und Verschlüsselungstechnologien sowie die Entwicklung und Erprobung von KI-Modellen auf europäischen Hochleistungsrechnern. Der Anspruch dahinter ist klar: Europa will sich aus sicherheitspolitischen und strategischen Gründen unabhängiger von außereuropäischen Akteuren machen und die eigene technologische Souveränität stärken. Dazu soll **im zweiten Quartal 2025 eine umfassende EU-Quantenstrategie** vorgelegt werden, die bestehende Initiativen wie die Integration von Quantencomputern in das EuroHPC-Netzwerk bündelt. Diese Maßnahmen ergänzen eine seit Jahren wachsende Zahl von Leuchtturmprojekten aus der Quantum Technologies Flagship Initiative, einem milliardenschweren Förderprogramm. Gleichzeitig nimmt die Diskussion über einen EU-Quantenchip-Plan und einen möglichen „Quantum Act“ an Fahrt auf. Langfristiges Ziel: Europa soll zum weltweit führenden „Quantum Valley“ werden. Wie kann das gelingen?

¹ Die klassische Einführung ist: Michael A. Nielsen and Isaac L. Chuang, *Quantum Computation and Quantum Information: 10th Anniversary Edition* (Cambridge University Press, 2010).

² https://www.e-fi.de/fileadmin/Assets/Gutachten/2025/EFI_Gutachten_2025_30125.pdf, S. 78.

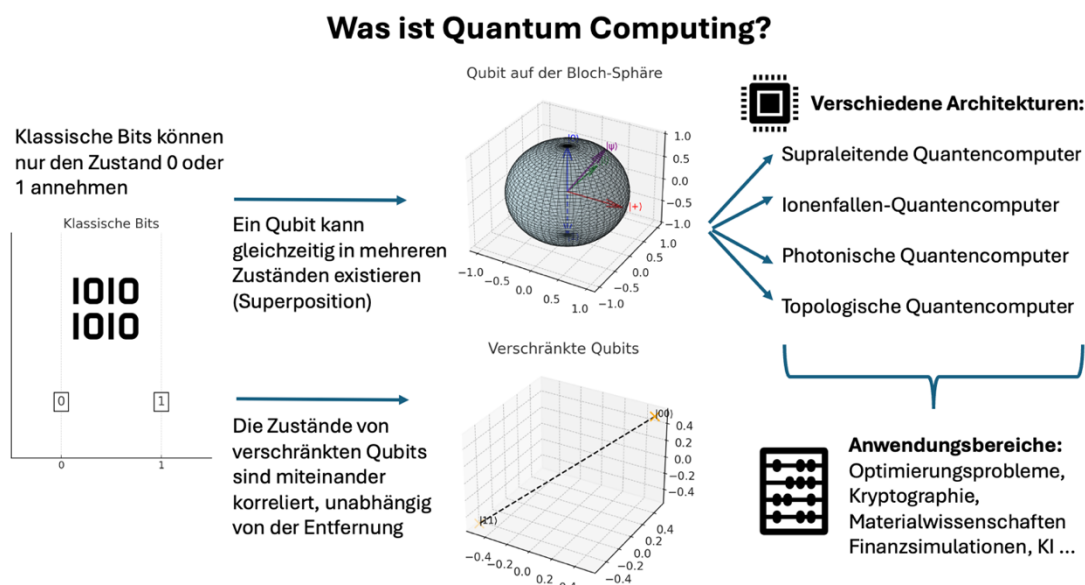
³ Siehe die Zusammenfassungen in: https://qt.eu/news/2024/2024-02-14_new-roadmap-to-position-europe-as-the-quantum-valley-of-the-world/; <https://thequantuminsider.com/2024/11/18/eus-new-technology-chief-prioritizes-quantum-for-europes-sovereignty/>; <https://www.scl.org/european-commission-issues-work-programme-for-2025/>.

Angesichts der sicherheitspolitischen Dimension der Post-Quantum-Kryptographie und der zahlreichen Anwendungsfälle des Quantencomputing in strategisch relevanten Bereichen wie Gesundheit, Verteidigung und Finanzen ist die jüngste Hinwendung der europäischen Politik zur Quantentechnologie sicherlich richtig – doch die entscheidende Frage ist das *Wie*. **Welchen Ansatz sollte die EU mit ihrer Quantenstrategie verfolgen?** Die jüngsten Fortschritte in Hardware und Wissenschaft, die in diesem **ceplnput** vorgestellt werden, zeigen eines deutlich: Die Quantentechnologie ist noch ein rätselhaftes Feld, in dem niemand mit letzter Sicherheit sagen kann, wann und wie klassische Computer tatsächlich überholt werden und vor allem, welche Architektur für die Skalierung von Qubits das Rennen machen wird. Wer allein auf Prototypen und atemlose Fortschrittsmeldungen setzt, verkennt die Feinheiten dieser Zukunftstechnologie. Diese Erkenntnis spricht gegen eine zentrale Steuerung von Forschungsförderung und Forschungszielen und gegen das Narrativ eines uns enteilenden Wettlaufs, bei dem es schon um Marktmacht geht. Angesichts der Unsicherheiten erscheint es erfolgsversprechender, ein nachhaltiges Ökosystem zu entwickeln, in dem ausreichend privates Kapital den Wettbewerb zwischen den vielen möglichen Architekturen vorantreibt und Hybridsysteme für die industrielle und staatliche Anwendung ermöglicht, die uns bereits heute konkrete Vorteile schaffen können.

2 Wie funktioniert ein Quantencomputer? Der Forschungsstand

Die sprichwörtliche Magie eines Quantencomputers basiert auf einem einzigen Element: dem Qubit. Statt nur die binären Zustände 0 oder 1 zu repräsentieren (wie es ein klassischer Computer macht), kann dieses Quantenbit zwei Zustände gleichzeitig einnehmen – ein Phänomen, das in der Quantenphysik als Superposition bekannt ist (Abbildung 1). Erst sobald man das Qubit misst, resultiert ein konkreter Wert. Was zunächst wie eine Kuriosität klingt, eröffnet neue Formen der Informationsverarbeitung. In Kombination mit der Verschränkung, bei der die Zustände mehrerer Qubits unauflöslich miteinander verknüpft sind, ergeben sich Möglichkeiten, die mit klassischen Computern kaum vorstellbar sind. Denn jeder zusätzliche Qubit verdoppelt dabei die „Recheneinheiten“ des Systems – bei 50 Qubits ergeben sich beispielsweise bereits 2^{50} mögliche Zustände. Das bedeutet, dass ein Quantencomputer prinzipiell eine sehr große Anzahl von Operationen gleichzeitig ausführen kann.

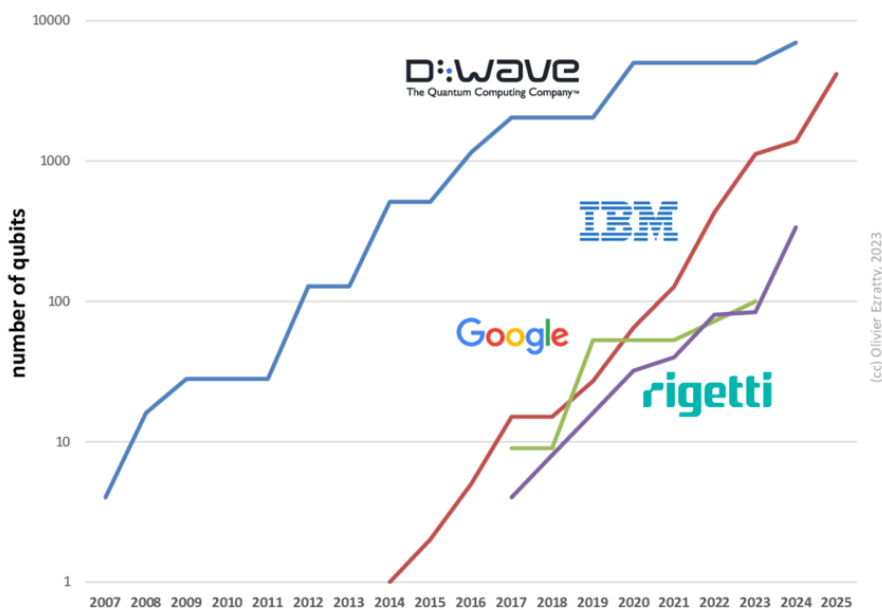
Abb. 1: Was ist Quantum Computing?



Quelle: Eigene Darstellung.

Der öffentliche und mediale Fokus lag in den vergangenen Jahren entsprechend auf den steigenden Qubit-Zahlen – mit der Intuition, dass „mehr Qubits automatisch bessere Quantencomputer“ bedeuten (Abbildung 2). IBM stellte 2016 das erste Cloud-Quantencomputersystem mit nur 5 supraleitenden Qubits zur Verfügung.⁴ Seither folgten fortlaufend größere Prozessoren: 2019 der „Falcon“ mit 27 Qubits, 2020 „Hummingbird“ mit 65 Qubits, 2021 „Eagle“ als erster Chip mit mehr als 100 Qubits (127 insgesamt) und 2022 schließlich „Osprey“ mit 433 Qubits. IBM treibt die Entwicklung weiter voran und verfolgt das ehrgeizige Ziel, Systeme mit über 4.000 Qubits in absehbarer Zeit einsatzbereit zu machen. Diese stetige Erhöhung der Qubit-Anzahl ist ein wichtiger Schritt, um Quantenrechner eines Tages für umfangreichere Problemstellungen nutzbar zu machen. Neben den stetig wachsenden Qubit-Zahlen sind in den vergangenen Jahren einige spektakuläre Einzelleistungen bekannt geworden. So sorgte Google 2019 mit einer Demonstration der sogenannten „Quantenüberlegenheit“ (*quantum supremacy*) weltweit für Aufsehen: Ein eigens konstruierter Quantenprozessor löste innerhalb weniger Minuten eine Aufgabe, für die klassische Supercomputer mehrere Tausend Jahre benötigt hätten.⁵ Diese Meilensteine verdeutlichen, dass die praktische Nutzbarkeit von Quantencomputern immer näher rückt – wenngleich zahlreiche technische und wissenschaftliche Hürden weiterhin bestehen.

Abb. 2: Moores Gesetz für Quantencomputer?



Quelle: Is there a Moore’s law for quantum computing?, Abbildung von [ResearchGate](https://www.researchgate.net/publication/358111111).

Der Wettlauf um praxistaugliche Quantenrechner konzentriert sich derzeit im Wesentlichen auf drei grundlegende Ansätze (Tabelle 1). Erstens arbeiten IBM und Google mit supraleitenden „Superchips“, die im ultrakalten Bereich nahe dem absoluten Nullpunkt betrieben werden und dadurch sehr präzise sind, allerdings Kühlanlagen und enorme Energiemengen erfordern. Zweitens setzen Unternehmen wie IonQ und Honeywell auf sogenannte Ionenfallen, bei denen elektrisch geladene Atome (Ionen) mithilfe von Laserstrahlen in Schach gehalten und gezielt manipuliert werden, was eine besonders geringe Fehlerquote ermöglicht – allerdings ist die Vernetzung dieser Systeme komplex. Drittens nutzen Entwickler wie PsiQuantum Photonen, also Lichtteilchen, als Qubits; diese photonenbasierten Ansätze lassen sich in herkömmlichen Chipfabriken massenhaft herstellen, was eine potenziell schnelle

⁴ Die IBM zahlen sind entnommen aus: <https://spectrum.ieee.org/ibm-condor>.

⁵ Siehe: <https://www.geekwire.com/2025/microsoft-quantum-breakthrough-promises-to-usher-in-the-next-era-of-computing-in-years-not-decades/>; <https://www.ft.com/content/b9bb4e54-dbc1-11e9-8f9b-77216ebe1f17>.

Skalierung verspricht.⁶ Während supraleitende Chips momentan bei der Zahl verfügbarer Qubits führen, könnten sich lichtbasierte Quantenrechner aufgrund dieser Massenproduktion langfristig durchsetzen. Auch in Europa, etwa am Fraunhofer-Institut IPMS (Projekt PhoQuant), treibt man photonische Lösungen voran.⁷ Dennoch hat jede Technologie ihre Schattenseiten: Superchips schlucken viel Energie durch die aufwendige Kühlung, Ionenfallen lassen sich nur mühsam verknüpfen und photonische Quantenrechner kämpfen noch mit vergleichsweise hohen Fehlerraten. Welche Architektur sich am Ende durchsetzen wird, ist daher offener, als es vielleicht vor einigen Jahren noch erschien.

Tab. 1: Vergleich der Hardware-Technologien

	Supraleiter	Ionenfallen	Photonik
Qubit-Zahl	Bis 4.158 (IBM)	Etwa 100 (Quantinuum)	100 (PhoQuant)
Fehlerrate	0,1%–1%	0,01%–0,1%	0,02%–0,8%
Skalierbarkeit	Chip-begrenzt	Modular	Fab-basiert
Energiebedarf	Hoch (Kryogenik)	Mittel (Laser)	Niedrig (Faseroptik)
Reifegrad	Industrieführend	Laborexperimente	Prototypenphase

Quelle: cep-Research.

In der Summe zeigen diese Entwicklungen, dass reine Qubit-Zahlen trügerisch sein können. So erreichen PsiQuantums photonische Chips zwar nur rund 100 Qubits, lassen sich aber bereits millionenfach in Halbleiterfabriken fertigen – ein klarer Vorteil für industrielle Anwendungen. Hinzu kommt: Die Quantenrevolution wird nicht vom schnellsten, sondern vom praxistauglichsten System gewonnen – denn Superposition und Verschränkung allein erzeugen noch keine „magische Rechenleistung“. Erst wenn präzise Algorithmen und Fehlerkorrektur integriert werden, kann das quantenmechanische Potenzial tatsächlich in konkrete Anwendungen übersetzt werden. Diese Korrekturmechanismen sind nötig, weil Qubits sehr empfindlich auf Störungen reagieren: Bereits winzige Temperaturschwankungen oder elektrische Störfelder können den Quantenzustand zerstören (Dekohärenz) und so die Berechnungen fehlerhaft machen. Die jüngste Forschung demonstriert jedoch, dass sich mithilfe spezieller Verfahren – zum Beispiel durch gezielte Isotopen-Anreicherung in Silizium – äußerst stabile Qubits herstellen lassen, was den störungsanfälligen Prozess der Dekohärenz deutlich verlangsamt.⁸

Nach den drei etablierten Hardware-Ansätzen – supraleitende Schaltkreise, Ionenfallen und photonische Systeme – erforschen einige Gruppen auch sogenannte topologische Qubits. Microsoft verfolgt hier den Ansatz, in extrem dünnen „Nanodrähten“ (beispielsweise aus Indiumarsenid und Aluminium) sogenannte Majorana-Quasiteilchen zu erzeugen, die eine besonders robuste Form von Qubits ermöglichen sollen.⁹ Theoretisch wäre ein solches Qubit von Natur aus widerstandsfähiger gegen Störungen, weil Fehler erst die „Topologie“ der Quantenzustände verändern müssten – und das gilt als sehr schwer zu bewerkstelligen. Microsofts Forschungsteam hat kürzlich Ergebnisse veröffentlicht, die auf das Vorhandensein dieser Majorana-Zustände hinweisen.¹⁰ Allerdings sind viele Experten skeptisch, ob diese

⁶ PsiQuantum Team et al., ‘A Manufacturable Platform for Photonic Quantum Computing’, *Nature*, 26 February 2025, <https://doi.org/10.1038/s41586-025-08820-7>. Siehe hierzu auch die Erläuterungen in: <https://theconversation.com/a-quantum-computing-startup-says-it-is-already-making-millions-of-light-powered-chips-251057>.

⁷ Siehe: <https://www.ipms.fraunhofer.de/de/Strategic-Research-Areas/Quantum-Computing/PhoQuant.html>.

⁸ Ravi Acharya et al., ‘Highly 28Si Enriched Silicon by Localised Focused Ion Beam Implantation’, *Communications Materials* 5, no. 1 (7 May 2024): 57, <https://doi.org/10.1038/s43246-024-00498-0>.

⁹ Davide Castelvecchi, ‘Microsoft Claims Quantum-Computing Breakthrough — but Some Physicists Are Sceptical’, *Nature* 638, no. 8052 (27 February 2025): 872–872, <https://doi.org/10.1038/d41586-025-00527-z>.

¹⁰ Microsoft Azure Quantum et al., ‘Interferometric Single-Shot Parity Measurement in InAs–Al Hybrid Devices’, *Nature* 638, no. 8051 (20 February 2025): 651–55, <https://doi.org/10.1038/s41586-024-08445-2>.

Daten bereits den endgültigen Nachweis liefern.¹¹ Da sich viele Effekte nur schwer eindeutig messen lassen, wird erst die Weiterentwicklung und Skalierung entsprechender Bauteile zeigen, ob sich topologische Qubits wirklich als deutlich fehlertoleranter herausstellen.

Es ist wichtig zu betonen, dass Europa bei diesem Rennen um die besten Architekturen durchaus mithalten kann. So hat etwa vor kurzem ein Team der TU Darmstadt als erstem weltweit geschafft, über 1.000 einzeln kontrollierbare Atom-Qubits in einem zweidimensionalen „Optical Tweezer Array“ anzuordnen.¹² Dazu nutzten die Forschenden fokussierte Laserstrahlen, um einzelne Atome an ganz bestimmten Positionen festzuhalten. Jeder dieser Laserfallen-Plätze fungiert als eigenes Qubit. Dank einer neuen Technik, bei der mehrere Laserquellen gleichzeitig zum Einsatz kommen, ließ sich die bisherige Leistungsgrenze erheblich ausweiten: Insgesamt konnten die Forschenden 1.305 Atome einfangen und daraus äußerst stabile Zielstrukturen mit bis zu 441 defektfreien Atom-Qubits erzeugen. Wenn der Schritt von einigen hundert zu mehreren tausend Qubits in absehbarer Zeit möglich wird, dürfte ein Quantencomputer erstmals signifikante Vorteile gegenüber klassischen Rechnern entfalten – etwa bei der Simulation chemischer Prozesse (mehr Beispiele werden unten diskutiert).

Parallel dazu entwickeln Forschende neuartige Quantencodes, die zu einer hohen Fehlertoleranz führen und es erlauben, umfangreiche Algorithmen bei relativ moderaten Hardware-Anforderungen auszuführen.¹³ Bei diesen Codes wird die Information in redundanter Form auf viele physische Qubits verteilt, sodass lokale Fehler erkannt und korrigiert werden können, bevor sie sich auf den gesamten Rechenprozess auswirken. Hinzu kommt die Möglichkeit, auch Quanten-Prozessoren so zu konstruieren, dass bestimmte Fehler abgefangen und korrigiert werden, ohne das gesamte System zu destabilisieren. Genau hier haben einige Teams vor Kurzem konkrete Erfolge erzielt: Ein Forschungsteam nutzte rekonfigurierbare Atom-Arrays und konnte so ein Beispiel von fehlerkorrigierendem Quantencomputing präsentieren¹⁴ – ein Durchbruch, den der renommierte Informatiker Scott Aaronson zu den wichtigsten experimentellen Fortschritten des Jahres 2023 zählt.¹⁵ Ein weiterer Ansatz, um mit den steigenden Anforderungen umzugehen, ist das Verteilen der Quantenrechnung auf mehrere kleinere Einheiten anstatt auf ein einziges großes Gerät. Dieses Konzept wird „Distributed Quantum Computing“ genannt und zielt darauf ab, größere logische Quantencomputer aus mehreren physisch getrennten Modulen aufzubauen, die über verschränkte Qubit-Paare miteinander kommunizieren. Jüngste Simulationsergebnisse legen nahe, dass sich auf diese Weise erhebliche Redundanz beim Fehlerausgleich erreichen lässt, ohne dass die Hardware-Anforderungen explodieren.¹⁶

Auch wenn die Grundlagen der Quantenphysik solide sind und die hier vorgestellten Forschungen beachtliche Fortschritte aufzeigen, ist der Schritt hin zu einer industriell nutzbaren Quantenanlage noch lang und kostspielig. Neben der im medialen Scheinwerferlicht stehenden Suche nach universellen

¹¹ Siehe die Diskussion auf Scott Aaronsons Blog: <https://scottaaronson.blog/?p=8669>, sowie: Dan Garisto, 'Microsoft Quantum Computing "breakthrough" Faces Fresh Challenge', *Nature*, 7 March 2025, d41586-025-00683-2, <https://doi.org/10.1038/d41586-025-00683-2>.

¹² Lars Pause et al., 'Supercharged Two-Dimensional Tweezer Array with More than 1000 Atomic Qubits', *Optica* 11, no. 2 (20 February 2024): 222, <https://doi.org/10.1364/OPTICA.513551>. Siehe auch die Berichterstattung in: https://www.tu-darmstadt.de/matter-and-materials/forschungsfeld_mm/news_mm/newsdetails_439104.en.jsp.

¹³ Sergey Bravyi et al., 'High-Threshold and Low-Overhead Fault-Tolerant Quantum Memory', *Nature* 627, no. 8005 (28 March 2024): 778–82, <https://doi.org/10.1038/s41586-024-07107-7>.

¹⁴ Dolev Bluvstein et al., 'Logical Quantum Processor Based on Reconfigurable Atom Arrays', *Nature* 626, no. 7997 (1 February 2024): 58–65, <https://doi.org/10.1038/s41586-023-06927-3>.

¹⁵ Siehe: <https://www.politico.com/newsletters/digital-future-daily/2024/08/08/quantums-big-numbers-game-00173281>.

¹⁶ Evan Sutcliffe et al., 'Distributed Quantum Error Correction Based on Hyperbolic Floquet Codes' (arXiv, 2025), <https://doi.org/10.48550/ARXIV.2501.14029>.

Quantencomputer (die ähnlich wie klassische Computer auf logischen Gattern arbeiten), gibt es deshalb pragmatischere Ansätze wie Quantenannealing, die für Spezialanwendungen interessant sind. Deutsche Autobauer wie VW und BMW nutzen solche Quantenannealer schon seit einigen Jahren, um etwa die Simulation von Verkehrsflüssen oder Arbeitsschritte von Fertigungsrobotern zu optimieren.¹⁷ Große Cloud-Provider wie Google, Amazon oder Microsoft bieten zudem bereits „Quantum-as-a-Service“ an, flankiert von Start-ups wie D-Wave oder IonQ. Die aktuelle Forschung zeigt, dass Quantenannealer bereits konkrete praktische Anwendungen erschließen: Eine im März 2025 in *Science* veröffentlichte Studie demonstriert erstmals, dass D-Waves Quantenannealer echte physikalische Probleme schneller lösen können als führende klassische Methoden.¹⁸ Der hybride Ansatz, der klassische Molekulardynamik mit Quantenannealing kombiniert, zeigt ebenfalls vielversprechende Ergebnisse bei der Lösung von Optimierungsproblemen und verbessert sich sogar mit zunehmender Systemgröße.¹⁹

Dennoch unterscheiden sich alle diese Angebote deutlich von dem, was einmal wirklich nützlich sein wird, wenn Quantencomputing sein volles Potenzial entfaltet.²⁰ Obwohl heutige Quantencomputer ingenieurtechnische Meisterleistungen sind, sind sie durch ihre geringe Fehlertoleranz und ihre extreme Sensibilität gegenüber Störeinflüssen noch stark limitiert. Darüber hinaus verlassen sie sich vielfach auf klassische Rechenarchitekturen, was Geschwindigkeitsengpässe verursacht. Aktuelle Systeme sind daher experimentelle Prototypen. Experten sprechen von sogenannten NISQ-Systemen (*Noisy Intermediate-Scale Quantum*), also Geräten mit einigen Dutzend oder Hunderten von Qubits, die noch verhältnismäßig stark von Störeinflüssen betroffen sind.²¹ Visionen, wonach Quantenrechner schon morgen unsere Sicherheitssysteme knacken könnten, bleiben vorerst Zukunftsmusik.

Eine wichtige Perspektive, um in Richtung großskaliger Quantencomputer zu gelangen, eröffnet die Weiterentwicklung *modularer* Architekturen.²² Viele Unternehmen, die bislang versuchten, möglichst viele Qubits auf einem einzigen Chip unterzubringen, stoßen auf physikalische und technologische Grenzen – etwa weil die Vernetzung der Qubits immer komplexer wird und Störeinflüsse steigen. Deshalb rücken Lösungsansätze in den Fokus, bei denen mehrere kleinere Quantenprozessoren zusammengeschaltet werden. Firmen wie IBM, Xanadu, IonQ und andere Start-ups erforschen neue Wege, Quantenprozessoren mithilfe spezialisierter Verbindungstechniken miteinander zu „vernetzen“. So hat etwa Xanadu einen modularen photonischen Quantencomputer namens Aurora entwickelt, der 35 Chips verwendet.²³ Trotz aller Unterschiede in den Hardware-Ansätzen haben sie ein gemeinsames Ziel: Indem sich mehrere Einheiten effizient koppeln lassen, steigt die Gesamtzahl verwertbarer Qubits, ohne dass alle Störeinflüsse auf einem Chip kumulieren. Langfristig soll diese modulare Herangehensweise – in Kombination mit verbesserten Fehlerkorrekturverfahren und Bauelementen (siehe oben) – die Grundlage für skalierte Quantenrechner legen, die über NISQ-Systeme hinausgehen.

¹⁷ Siehe: <https://www.fraunhofer.de/de/forschung/aktuelles-aus-der-forschung/quantentechnologien/quantencomputing.html>.

¹⁸ Andrew D. King et al., ‘Beyond-Classical Computation in Quantum Simulation’, *Science*, 12 March 2025, eado6285, <https://doi.org/10.1126/science.ado6285>. Allerdings kann ein Supercomputer eine Teilmenge desselben Problems in rund zwei Stunden lösen, siehe: <https://www.sciencenews.org/article/quantum-computing-milestone-challenged>.

¹⁹ Hiroataka Irie et al., ‘Hybrid Quantum Annealing via Molecular Dynamics’, *Scientific Reports* 11, no. 1 (19 April 2021): 8426, <https://doi.org/10.1038/s41598-021-87676-z>.

²⁰ Siehe hierzu: Marr (2025), [Why We Don’t Have Real Quantum Computing Yet](#), Forbes.

²¹ Siehe: <https://quantumcomputingreport.com/nisq-versus-ftqc-in-the-2025-2029-timeframe/>.

²² Siehe hierzu: <https://spectrum.ieee.org/quantum-computers>; <https://www.technologyreview.com/2023/01/06/1066317/whats-next-for-quantum-computing/>.

²³ H. Aghaee Rad et al., ‘Scaling and Networking a Modular Photonic Quantum Computer’, *Nature* 638, no. 8052 (27 February 2025): 912–19, <https://doi.org/10.1038/s41586-024-08406-9>.

3 Europas strategische Position im Quanten-Ökosystem

Als Schrittmacher der jüngsten Fortschritte im Quantencomputing gelten große US Tech-Konzerne wie IBM und Google. Inzwischen mischt auch Amazon mit, das 2025 seinen eigenen Quantenchip namens „Ocelot“ vorstellte.²⁴ Über die Cloud-Plattform AWS hat das Unternehmen bereits seit einiger Zeit Quanten-Computing-Dienste im Angebot und fokussiert sich nun mit Ocelot verstärkt darauf, Rechenfehler beim Betrieb von Quantenchips zu reduzieren. In den USA läuft die staatliche Förderung der Quantenforschung vor allem über das Department of Energy (DOE). Mit dem „DOE Quantum Leadership Act of 2024“ sollen über die nächsten fünf Jahre insgesamt 2,5 Milliarden US-Dollar bereitgestellt werden, deutlich mehr als die 625 Millionen US-Dollar, die durch den mittlerweile ausgelaufenen National Quantum Initiative Act von 2018 eingeplant waren.²⁵ Der Gesetzentwurf soll die bestehenden fünf nationalen Forschungszentren des DOE stärken, die Lieferkettenproblematik rund um Quantum-Technologien angehen und die Zusammenarbeit zwischen Regierung und Industrie vertiefen. Zudem enthält er Programme, um den akuten Fachkräftemangel im Forschungsbereich zu bekämpfen.

China ist vermutlich weltweit führend im Bereich der Quantensicherheit. Das 2.000 km lange Quantenkommunikationsnetz zwischen Peking und Shanghai ermöglicht bereits heute eine absolut sichere Datenübertragung.²⁶ China plant neue Quantenkommunikationssatelliten in mittleren und hohen Erdumlaufbahnen als Weiterentwicklung des Satelliten Micius.²⁷ Dabei gelangen zuletzt erste Erfolge: Mit dem Quantenmikrosatelliten Jinan-1 wurde eine sichere Quantenverbindung über eine Rekordentfernung von 12.900 Kilometern zwischen Peking und einer Universität in Südafrika hergestellt.²⁸ Der Jinan-1 ist mit nur 23 Kilogramm Nutzlast etwa zehnmal leichter als sein Vorgänger Micius und arbeitet mit portablen Bodenstationen, die lediglich 100 Kilogramm wiegen. Diese drastische Gewichtsreduzierung ermöglicht künftig den gleichzeitigen Start mehrerer Quantensatelliten, ähnlich wie bei SpaceX's Starlink-Konstellation. Ebenfalls kürzlich präsentierten chinesische Wissenschaftler im März 2025 einen supraleitenden Quantencomputer-Prototyp namens „Zuchongzhi 3.0“ mit 105 Qubits.²⁹ Er führt Berechnungen mit einer Geschwindigkeit durch, die 10^{15} Mal schneller ist als die des leistungsstärksten Supercomputers und eine Million Mal schneller als das Konkurrenzprodukt von Google.³⁰ Die beiden chinesischen Tech-Giganten Alibaba und Baidu haben derweil ihre Quantenforschungslabors Ende 2023 bzw. Anfang 2024 geschlossen und an akademische Einrichtungen übergeben.³¹ Gleichzeitig hat die chinesische Regierung Quantencomputing zur strategischen Priorität erklärt und will die Entwicklung von Quanten-Cloud-Plattformen vorantreiben. Chinas offensichtlicher Fokus auf Quantensicherheit sowie die Verlagerung der Quantenforschung in staatliche Einrichtungen deuten auf eine verstärkte strategische Kontrolle hin – Quantencomputing wird geopolitisch relevant.

Die oft beschworene „Quantenrivalität“ zwischen diesen beiden Ländern, den USA und China, mag das mediale Rampenlicht beherrschen, doch auch in Europa existieren zahlreiche nationale Programme,

²⁴ Siehe: [https://techcrunch.com/2025/02/27/amazon-debuts-ocelot-its-first-quantum-computing-chip/#:~:text=Ama-zon%20Web%20Services%20\(AWS\)%20has,months%2C%20respectively%20Majorana%20and%20Willow.](https://techcrunch.com/2025/02/27/amazon-debuts-ocelot-its-first-quantum-computing-chip/#:~:text=Ama-zon%20Web%20Services%20(AWS)%20has,months%2C%20respectively%20Majorana%20and%20Willow.)

²⁵ Siehe: <https://www.durbin.senate.gov/newsroom/press-releases/durbin-daines-introduce-bipartisan-legislation-to-fund-the-future-of-quantum-research-at-doe.>

²⁶ Siehe: https://english.cas.cn/newsroom/archive/news_archive/nu2017/201703/t20170324_175288.shtml.

²⁷ Siehe: <https://www.space.com/china-quantum-communications-satellite-higher-orbit-plans.>

²⁸ Yang Li et al., 'Microsatellite-Based Real-Time Quantum Key Distribution', Nature, 19 March 2025, <https://doi.org/10.1038/s41586-025-08739-z.>

²⁹ Siehe: <https://www.globaltimes.cn/page/202503/1329438.shtml.>

³⁰ Siehe: [https://techwireasia.com/2025/03/zuchongzhi-3-outperforms-google-in-quantum-computing-speed/.](https://techwireasia.com/2025/03/zuchongzhi-3-outperforms-google-in-quantum-computing-speed/)

³¹ Siehe: [https://www.datacenterdynamics.com/en/news/alibaba-and-baidu-close-quantum-research-labs/.](https://www.datacenterdynamics.com/en/news/alibaba-and-baidu-close-quantum-research-labs/)

transnationale Konsortien und institutionelle Kooperationen.³² Im Rahmen des digitalen Transformationsplans „Digital Decade“ hat die EU schon seit längerem das Ziel formuliert, bis 2030 weltweit führend in Quantentechnologien zu sein. Dafür wurde das **Quantum Technologies Flagship-Programm** ins Leben gerufen, das europäische Forschung und industrielle Innovation mit Milliardeninvestitionen unterstützt. Die EU plant, 2025 ihre ersten Quantencomputer an sechs strategischen Standorten in Betrieb zu nehmen und die europäische Quantenkommunikationsinfrastruktur (EuroQCI) weiter auszubauen. Mit Projekten wie IRIS² setzt sie auf satellitengestützte Quantennetzwerke, die sichere Kommunikation ermöglichen und kritische Infrastrukturen schützen sollen. Mit einer öffentlichen Investitionssumme von fast 7 Milliarden Euro liegt die EU bei der Förderung von Quantenforschung weltweit an zweiter Stelle – direkt hinter China und vor den USA. Die Kommission betrachtet Quantentechnologien als Schlüsseltechnologie für wirtschaftliche Sicherheit und hat sie in ihre Risikobewertung für kritische Technologien aufgenommen. 2024 schlug die Kommission neue Maßnahmen zur Absicherung der Wertschöpfungsketten vor, darunter auch eine strengere Prüfung ausländischer Direktinvestitionen in Quanten-Technologien. Darüber hinaus haben sich im März 2024 21 EU-Mitgliedsstaaten verpflichtet, Europa als „Quantum Valley“ zu etablieren. Um ihre digitale Souveränität zu sichern, plant die EU zudem den Aufbau einer europäischen Quantenchip-Fabrik. Das niederländische Unternehmen ASML produziert weltweit verwendete Lithografiertechnologien, die in fortgeschrittenen Anwendungen, einschließlich des Quantencomputings, eingesetzt werden. Auch im Bereich Cybersicherheit sind Quanten-Technologien ein wichtiger Bestandteil der strategischen Planung: So empfiehlt die EU-Agentur für Cybersicherheit (ENISA) verstärkte Maßnahmen zur Einführung quantensicherer Verschlüsselung und die Schaffung einer eigenen Expertengruppe für Quantenforschung. Abgesehen von der Förderung und Koordinierung durch die Regierungen gibt es jedoch nach wie vor Herausforderungen, insbesondere im Bereich der privaten Investitionen, in dem die EU hinter den USA zurückliegt.

Vor diesem Hintergrund bestehender Initiativen und Defizite bereitet die EU aktuell eine umfassende **Quantenstrategie** vor. Henna Virkkunen, die neue EU-Kommissarin für Technologische Souveränität, Sicherheit und Demokratie, hat während ihrer Anhörung vor dem Europäischen Parlament im November 2024 die Entwicklung eines langfristigen EU-Quantenplans angekündigt.³³ Der Plan ist noch nicht bekannt, soll aber laut Berichten mehrere Schlüsselkomponenten umfassen: 1. Ein EU Quantum Act, der die Fragmentierung des europäischen Quantenmarktes adressieren und koordinierte Investitionen fördern soll; 2. Ein langfristiger EU Quantum Chips Plan zur Stärkung der europäischen Quantenfähigkeiten, sowie 3. Maßnahmen zur Konsolidierung der Quantenforschungsbemühungen innerhalb der EU. Die Strategie zielt darauf ab, Europa als „Quantum Valley“ der Welt zu etablieren,³⁴ vergleichbar mit dem Silicon Valley für klassische Computertechnologien. Aufgrund unterschiedlicher nationaler Strategien und Forschungsfragmentierung soll die Strategie insbesondere Ressourcen bündeln und Investitionen über die Mitgliedstaaten hinweg koordinieren, die „strategische Autonomie“ Europas im Quantenbereich sicherstellen und allgemein die europäische Wettbewerbsfähigkeit stärken.

³² Dieser Absatz basiert auf der exzellenten Übersicht in: Stefano (2024), Quantum: What is it and where does the EU stand?, At a Glance (10-04-2024), [https://www.europarl.europa.eu/thinktank/en/document/EPRS_ATA\(2024\)760413](https://www.europarl.europa.eu/thinktank/en/document/EPRS_ATA(2024)760413). Siehe auch: European Commission. Directorate General for Informatics., *Public Sector Tech Watch: Mapping Innovation in the EU Public Services : A Collective Effort in Exploring the Applications of Artificial Intelligence and Blockchain in the Public Sector*. (LU: Publications Office, 2024), 24–25, <https://data.europa.eu/doi/10.2799/4393>.

³³ Siehe die Zusammenfassung bei: <https://thequantuminsider.com/2024/11/18/eus-new-technology-chief-prioritizes-quantum-for-europes-sovereignty/>.

³⁴ Siehe hierzu: https://qt.eu/news/2024/2024-02-14_new-roadmap-to-position-europe-as-the-quantum-valley-of-the-world.

Für Außenstehende wirkt die EU-Logik oft verwirrend oder zersplittert, weil sie nicht auf eine monolithische Struktur wie die chinesische Staatsförderung oder das US-amerikanische, an DARPA-Projekten orientierte Modell trifft. Tatsächlich aber liegt Europas Stärke in der Fähigkeit zur Vernetzung: Mit der European Quantum Flagship Initiative spannt man einen weiten Bogen über Universitäten, Konzerne und Start-ups. So fließen Ressourcen in die Entwicklung unterschiedlichster Technologien – von der Quantenkommunikation über die Simulation bis hin zur Sensorik. Ein solches langsameres Vorgehen führt zwar gelegentlich zu kritischen Fragen, ob man im globalen Wettbewerb mithalten könne. Gleichzeitig fördert es aber auch eine gewisse Resilienz: Wer auf mehrere Technologien setzt, ist resilienter und steht nicht gleich vor dem Aus, wenn sich eine einzelne Spur als Sackgasse erweist. Diese Einsicht gilt es in der geplanten EU-Quantenstrategie mit konkreten Maßnahmen umzusetzen.

4 Vorschläge für die nächste EU-Quantenstrategie

Die vergangenen Jahre und gar Jahrzehnte waren von der Frage geprägt, wie sich stabile und kohärente Qubits erzeugen und kontrollieren lassen. Auf diesem Gebiet hat Europa beachtliche Kompetenzen entwickelt. Inzwischen stehen jedoch bereits Quantenprozessoren mit Dutzenden oder sogar mehreren Hundert Qubits zur Verfügung (siehe oben), was einen Wendepunkt markiert: Anstatt ausschließlich das „perfekte Qubit“ zu suchen, gilt es nun, die bestehenden Systeme bestmöglich zu nutzen.³⁵ Laut Prognosen werden 2025 bedeutende Fortschritte bei hybriden Quanten-KI-Systemen erwartet, die insbesondere in Bereichen wie Optimierung, Arzneimittelentwicklung und Klimamodellierung Anwendung finden sollen.³⁶ Kurz gesagt: Quantencomputing verlässt die Labore und tritt in die Praxis ein. Diese Entwicklung in der Forschungslandschaft sollte dringend in der geplanten EU-Quantenstrategie gespiegelt werden. Der vorliegende ceplInput schlägt dafür einen dreigleisigen Ansatz vor.

Erstens – die Hardware: In der Hardware-Forschung existieren aktuell, wie oben beschrieben, mehrere erfolgsversprechende Ansätze, was einen „qubit-agnostischen“ Kurs nahelegt.³⁷ Europa sollte seine historisch gewachsene Vielfalt deshalb als Stärke verstehen: In Deutschland wird etwa die Entwicklung von supraleitenden Qubits und Halbleiter-Qubits gefördert, Österreich und Spanien konzentrieren sich stärker auf Ionenfallen, während in Frankreich photonische Quantensimulation vorangetrieben wird. In Finnland wiederum arbeiten Unternehmen wie IQM an skalierbaren Hardwarekonzepten für supraleitende Qubits, und britische Akteure sind trotz Brexit eng in europäische Forschungsverbünde eingebunden. Sollte sich eine der Technologien als unzureichend für die Skalierung erweisen, stehen Alternativen bereit. Eine solche **Quantum Open Architecture-Strategie** sollte verstärkt in gemeinsamen Initiativen von Wissenschaft und Industrie Gestalt annehmen, da sie eine für Europa hilfreiche Entkopplung von Hardware- und Software-Entwicklung vorantreibt.³⁸ Dies schafft Flexibilität und Resilienz: Wenn eine Hardware-Technologie Skalierungsgrenzen zeigt, können alternative Qubit-Typen über standardisierte Schnittstellen eingebunden werden. So werden schon heute an verschiedenen europäischen Höchstleistungsrechenzentren, wie beispielsweise in Jülich, hybride Infrastrukturen erprobt, bei denen ein Quantenprozessor eng mit einem klassischen Supercomputer gekoppelt ist.³⁹ Bestimmte Teilaufgaben wie Simulationen oder Optimierungen können so dem Quantenchip übertragen werden,

³⁵ So auch der Experte Paul Stimers: <https://www.politico.com/newsletters/digital-future-daily/2025/02/24/a-quantum-playbook-for-trump-00205813>.

³⁶ Siehe: <https://thequantuminsider.com/2024/12/31/2025-expert-quantum-predictions-quantum-computing/>.

³⁷ Siehe: <https://www.politico.com/newsletters/digital-future-daily/2024/08/08/quantums-big-numbers-game-00173281>.

³⁸ Siehe: <https://www.quantware.com/resources/quantum-computing-horizons>.

³⁹ Siehe: <https://www.fz-juelich.de/de/aktuelles/news/pressemitteilungen/2024/zuwachs-fuer-europas-quantencomputer-infrastruktur>.

während der Rest auf dem Supercomputer verbleibt. Hilfreich sind hierbei Open-Source-Schnittstellen wie die Softwareplattform QBridge, die die Integration von Quantenprozessoren in bestehende Supercomputing-Infrastrukturen ermöglicht und Synergien herbeiführt.⁴⁰

Zweitens – die Software: Parallel zu den rasanten Fortschritten in der Quanten-Hardware entsteht derzeit auch die nötige Software-Infrastruktur, damit Quantencomputer ihre Vorteile voll ausspielen können. Die jüngsten Fortschritte bei der Fehlerkorrektur veranschaulichen etwa, dass nur das Zusammenspiel aus geeigneter Quanten-Hardware – also Qubits, die möglichst stabil bleiben – und innovativen Software-Methoden (v.a. Fehlerkorrektur-Codes) eine breite Anwendung von Quantencomputern mittelfristig ermöglichen kann. Ohne effektive Fehlerkorrektur bliebe von dem theoretischen Geschwindigkeitsvorteil ein großer Teil ungenutzt. Zu der nötigen Software-Infrastruktur, damit Quantencomputer ihre Vorteile voll ausspielen können, gehören auch **Quanten-Programmiersprachen** wie Microsoft Q#, IBM Qiskit oder das Open-Source-Framework PennyLane, ebenso wie Betriebssysteme und andere Entwicklungsumgebungen. Europa sollte vermeiden, sich bei diesen Schlüsseltechnologien allein auf US-amerikanische Anbieter zu verlassen. **Denn wie im Fall der proprietären CUDA-Plattform von NVIDIA, die heute einen De-facto-Standard in der GPU-Welt darstellt und viele Forschungs- und Entwicklungsprozesse im KI-Bereich an die NVIDIA-Architektur bindet,⁴¹ könnten auch Quanten-Softwarelösungen in eine starke Abhängigkeit von einzelnen Playern führen.** Stattdessen sollte Europa konsequent auf offene Technologien und eigene Entwicklungen setzen, um digitale Souveränität zu wahren und eine breite Innovationsbasis sicherzustellen. Ein starkes europäisches Ökosystem für hochskalierbare, fehlertolerante Quantencomputer – von Material-Engineering über Schaltungsarchitekturen bis hin zu Programmiersprachen und konkreten industriellen Einsatzszenarien – wird die Wettbewerbsfähigkeit des Kontinents steigern. Insbesondere Forschung zu Silizium-Qubits und neuen Quantencodes eröffnet hier Chancen, da sich vorhandene Stärken der europäischen Halbleiterindustrie und der Grundlagenforschung nutzen lassen. Eine neue EU-Strategie sollte sich diesbezüglich mit dem EU Chips Act abstimmen. Dazu ist ein übergreifender Rahmen nötig, in dem Forschungsgelder vergeben, Konsortien vernetzt und konkrete Anwendungen gefördert werden.

Drittens – die (staatliche) Nachfrage: Die USA haben schon 2018 mit dem „National Quantum Initiative Act“ (NQI) ein umfangreiches Förderprogramm für den Quantenstandort USA gestartet.⁴² Dies führte zur Einrichtung von „Quantum Information Science Research Centers“ an Universitäten, zu großen Investitionen der Industrie in eigene Forschungslabore und zu zusätzlicher Unterstützung für die Grundlagenforschung. Mit der geplanten Erweiterung durch den „NQI Reauthorization Act“ wird die US-Regierung nun beauftragt, alle relevanten Behörden – von der NASA bis zum Landwirtschaftsministerium – auf mögliche Quanten-Anwendungen zu untersuchen. Das Ziel besteht darin, dass Bundesbehörden aktiv nach Anwendungsszenarien suchen und die technische Infrastruktur (einschließlich Beschaffung) vorbereiten. Auf diese Weise entsteht Nachfrage nach Quantenlösungen, was der privaten Wirtschaft zugutekommt. Eine solche Strategie könnte auch helfen, um Maßnahmen auf EU- und nationaler Ebene besser zu koordinieren. Bisher wird die europäische Quantenforschung vor allem durch nationale Initiativen und einzelne EU-Programme getragen. Einer jüngsten Übersicht des *Public Sector Tech Watch* Observatoriums zufolge konzentrieren sich bereits existierende Projekte zum

⁴⁰ Siehe: <https://www.quantware.com/resources/quantum-computing-horizons>.

⁴¹ Pak (2024), [The CUDA Advantage](#): How NVIDIA Came to Dominate AI And The Role of GPU Memory in Large-Scale Model Training, Medium.

⁴² Siehe hierzu: <https://www.quantum.gov> sowie die aktuellen Erläuterungen in: <https://www.politico.com/newsletters/digital-future-daily/2025/02/24/a-quantum-playbook-for-trump-00205813>.

Quantencomputing im öffentlichen Sektor stark auf die nationale Ebene, trotz des grenzüberschreitenden Potenzials (etwa für sichere Kommunikation).⁴³ Eine koordinierte Beschaffung könnte hierentgegenwirken und zudem Zertifizierungen und Standards früh vereinheitlichen. Dies wiederum würde die Abhängigkeit von Anbietern aus dem Ausland verringern.

Das Europäische Parlament hat in seinem jüngsten Bericht „European Technological Sovereignty and Digital Infrastructure“ (2025/2007(INI)) empfohlen, die **öffentliche Auftragsvergabe gezielt als strategisches Instrument zur Schaffung von mehr technologischer Souveränität** zu nutzen – wozu explizit auch das Quantencomputing zählt.⁴⁴ Die erwähnte Übersicht des *Public Sector Tech Watch* Observatoriums zeigt, dass es sich bei bereits existierenden Projekten zum Quantencomputing im öffentlichen Sektor zumeist noch um reine Pilotprojekte oder Projekte in der Entwicklung handelt.⁴⁵ Eine explizite Mindestquote für lokale Produktion in öffentlichen Vergabeverfahren könnte europäische Unternehmen stärken und als „Launch Customer“ für konkret anwendbare Technologien dienen. Diese Politik hat es China ermöglicht, führend in Bereichen wie Quantensicherheit und Quantenkommunikation zu werden. Dort gehen alle öffentlichen Beschaffungsverträge in strategischen Sektoren ausschließlich an nationale Unternehmen. Auch in den USA gehen 70 Prozent der öffentlichen Beschaffungsverträge in strategischen Sektoren an nationale Unternehmen, während in der EU nur 8 bis 12 Prozent der öffentlichen Aufträge europäische Firmen begünstigen.⁴⁶ Eine ähnliche Koordinierung könnte somit in Europa dazu beitragen, die Quantenforschung durch eine langfristig angelegte Nachfrage zu stärken.

Gleichzeitig muss betont werden, dass **nicht alle Anwendungsgebiete gleichermaßen von Quantencomputing profitieren werden**: So zeigt der aktuelle Boom generativer KI-Technologien, dass neuronale Netze bereits heute für viele Anwendungen ausreichend schnell sind. In diesen Bereichen könnten Quantencomputer nur begrenzte zusätzliche Vorteile bringen. In einer jüngsten Umfrage betonten zahlreiche Experten, dass hybride Quanten-KI-Systeme besonders in der Optimierung komplexer logistischer Prozesse sowie in der Simulation chemischer Reaktionen und Materialeigenschaften signifikante Vorteile bieten und wir bald einen neuen „ChatGPT“-Moment erleben könnten. Ähnlich hebt eine Untersuchung des Industrieverbands *IoT Solutions World Congress* hervor, dass Quantentechnologien für Aufgaben wie Molekülsimulationen, nachhaltige Materialentwicklung und absolut sichere Kommunikation entscheidende Verbesserungen versprechen.⁴⁷ Konkret lassen sich folgende Branchen identifizieren,⁴⁸ in denen Quantencomputing substantielle Mehrwerte schafft:

- *Chemie- und Pharmaindustrie*: Präzisere Simulation molekularer Dynamiken und chemischer Reaktionen ermöglicht eine deutlich effizientere Entwicklung neuer Medikamente und Materialien. Zudem eröffnet Quantencomputing neue Möglichkeiten in der Batterieforschung.
- *Finanz- und Versicherungssektor*: Quantenbasierte Optimierungsverfahren erlauben es, komplexe Finanzportfolios effizienter zu optimieren und Risiken genauer zu modellieren.
- *Fertigungsindustrie und Logistik*: Produktions- und Logistikprozesse profitieren erheblich von quantengestützten Optimierungsverfahren. Konkrete Anwendungen umfassen die Optimierung von Fahrzeugrouten, die Planung komplexer Robotereinsätze sowie die effiziente

⁴³ European Commission. Directorate General for Informatics., *Public Sector Tech Watch*, 51–52.

⁴⁴ Research European Parliament Committee on Industry and Energy, ‘Draft Report on European Technological Sovereignty and Digital Infrastructure’, Report (European Parliament, 25 February 2025), 8.

⁴⁵ European Commission. Directorate General for Informatics., *Public Sector Tech Watch*, 51–52.

⁴⁶ European Parliament and Energy, ‘Draft Report on European Technological Sovereignty and Digital Infrastructure’, 10.

⁴⁷ Siehe: <https://www.iotsworldcongress.com/the-industry-news-november/>.

⁴⁸ Quantum Technology and Application Consortium – QUTAC et al., ‘Industry Quantum Computing Applications’, *EPJ Quantum Technology* 8, no. 1 (December 2021): 25, <https://doi.org/10.1140/epjqt/s40507-021-00114-x>.

Steuerung von Lieferketten und Produktionsabläufen. Erste kommerzielle Anwendungen in diesem Bereich zeigen bereits heute messbare Effizienzsteigerungen.⁴⁹

- *Luftfahrt und Automobilindustrie*: Durch quantengestützte Simulationen lassen sich komplexe technische Herausforderungen wie die Strömungsmechanik im Flugzeugbau oder das Design elektrischer Antriebe deutlich effizienter lösen.
- *Cybersicherheit*: Die Entwicklung quantensicherer Verschlüsselungsverfahren (Post-Quantum-Kryptographie) ist als horizontale Aufgabe für die Industrie essenziell für den langfristigen Schutz kritischer Infrastrukturen und sensibler Daten vor zukünftigen Angriffen.

Entsprechend sollte Europas strategische Positionierung im globalen Quanten-Ökosystem nicht allein auf den Wettlauf um maximale Qubit-Zahlen oder reine Rechengeschwindigkeit ausgerichtet sein. Vielmehr empfiehlt sich eine **differenzierte Betrachtung spezifischer Anwendungsfelder**, in denen Quantentechnologien tatsächlich transformative Vorteile bieten, wie etwa bei kritischen Infrastrukturprojekten (EuroQCI), quantensicherer Kommunikation (IRIS²) oder industriellen Anwendungen mit hohem wirtschaftlichem Potenzial. Wie das *Quantum Application and Technology Consortium* (QUTAC) vorschlägt, sollte die technologische Entwicklung gezielt anhand industrieller Anwendungsfälle mit nachweisbarem wirtschaftlichem Mehrwert vorangetrieben werden.⁵⁰ Dazu gehört insbesondere die Identifikation und Formalisierung **konkreter Referenzprobleme und Benchmarks**, die den technologischen Fortschritt besser messbar machen und eine frühzeitige Kommerzialisierung ermöglichen können. Um diesen Ansatz erfolgreich umzusetzen, ist es entscheidend, den tatsächlichen Geschäftsnutzen von quantenbasierten Lösungen klar zu demonstrieren. Die europäische Quantenstrategie sollte daher verstärkt auf eine enge Verzahnung von Grundlagenforschung, industrieller Anwendung und Marktinkubation setzen – ein Ansatz, der bereits im Quantum Technologies Flagship-Programm und der geplanten europäischen Quantenchip-Fabrik angelegt ist, aber verstärkt werden muss. Durch diese gezielte Anwendungsperspektive kann Europa seine technologische Souveränität sichern, redundante Fördermaßnahmen vermeiden und gleichzeitig die industrielle Wettbewerbsfähigkeit nachhaltig stärken.

Insgesamt empfiehlt sich für Europa eine **dreigleisige Strategie**, die gezielt auf die Stärken des europäischen Quanten-Ökosystems setzt und gleichzeitig klare Prioritäten für die industrielle Nutzung definiert: Europa sollte, erstens, seine historisch gewachsene technologische Vielfalt als strategischen Vorteil begreifen und einen „qubit-agnostischen“ Ansatz verfolgen. Durch die parallele Förderung unterschiedlicher Hardware-Technologien wie supraleitende Qubits, Ionenfallen und photonische Systeme und deren Integration in hybride Infrastrukturen entsteht technologische Resilienz. Um digitale Souveränität zu gewährleisten, sollte Europa darüber hinaus konsequent auf offene Standards und eigene Software-Entwicklungen setzen. Dazu gehören quantenspezifische Programmiersprachen, Fehlerkorrekturverfahren sowie Entwicklungsumgebungen. Eine enge Verzahnung mit bestehenden Initiativen wie dem EU Chips Act eröffnet zusätzliche Synergien. Analog zu internationalen Vorbildern wie der US National Quantum Initiative sollte Europa schließlich eine koordinierte staatliche Beschaffungspolitik etablieren, um frühzeitig Nachfrage nach quantenbasierten Lösungen zu erzeugen. Dies umfasst die Identifikation konkreter industrieller Referenzprobleme sowie deren Umsetzung in Benchmarks. Durch diesen dreiteiligen Ansatz – Hardware-Vielfalt, eigenständige Softwareentwicklung und gezielte Marktinkubation – kann Europa seine technologisch gute Ausgangsposition sichern.

⁴⁹ Siehe: <https://www.dwavequantum.com/solutions-and-products/manufacturing-logistics/>.

⁵⁰ Quantum Technology and Application Consortium – QUTAC et al., 'Industry Quantum Computing Applications'.

5 Quantenordnung: Wie Quantencomputing die Spielregeln verändert

Die bisher skizzierte dreigleisige Strategie adressiert zentrale technologische, infrastrukturelle und nachfrageseitige Aspekte einer europäischen Quantenpolitik. Ergänzend dazu erscheint jedoch eine Betrachtung der ordnungspolitischen Dimensionen des Quantencomputings angebracht. Denn tatsächlich stellt diese Technologie, langfristig gedacht, in mehrfacher Hinsicht einen sprichwörtlichen Quantensprung dar, der fundamentale wirtschaftliche und regulatorische Paradigmen in Frage stellt. Im Sinne eines Ausblicks skizziert dieser abschließende Abschnitt die mögliche Neuordnung der Marktmechanismen durch Quantenvorteile, die damit einhergehende Transformation der Wettbewerbsdeterminanten und die Frage, ob durch die Quantentransformation auch neue Ziele und Instrumente der Regulierung notwendig werden. Hervorzuheben ist: Im Gegensatz zu den literaturgesättigten vorangegangenen Abschnitten sind diese Ausführungen naturgemäß hypothesengetriebener, aber dennoch für eine wirklich langfristige Gesamtstrategie relevant.

Die Funktionsweise von Märkten basiert traditionell auf der Annahme begrenzter Informationsverarbeitungskapazitäten der Akteure. Quantencomputing könnte diese Grundannahme revolutionieren. Wenn bestimmte Marktteilnehmer durch Quantenalgorithmen komplexe Optimierungsprobleme exponentiell schneller lösen können als andere, entstehen neuartige Informationsasymmetrien, die klassische Marktmechanismen außer Kraft setzen könnten. Im Finanzsektor beispielsweise könnten einige wenige quantengestützte Handelsalgorithmen Marktineffizienzen in Millisekunden erkennen und ausnutzen, bevor andere Marktteilnehmer überhaupt reagieren können.⁵¹ Schon heute erkennen wir diese Probleme bei der Diskussion um algorithmische Kollusion.⁵² Diese Form der impliziten Koordination zwischen Algorithmen, die ohne explizite Kommunikation zu wettbewerbswidrigen Ergebnissen führen kann, würde durch Quantenalgorithmen wohl eine neue Dimension erreichen. Während klassische Algorithmen bereits komplexe Preisstrategien entwickeln können, würden Quantenalgorithmen – etwa durch ihre Fähigkeit, exponentiell mehr Marktszenarien zu simulieren – potenziell undurchschaubare Koordinationsmechanismen etablieren. Kartellbehörden stünden dann vor der nahezu unmöglichen Aufgabe, nachzuweisen, ob Marktgleichgewichte das Ergebnis legitimer Optimierung oder subtiler quantengestützter Kollusion sind.⁵³ Dies könnte eine grundlegende Neubewertung wettbewerbsrechtlicher Konzepte wie der „abgestimmten Verhaltensweise“ erforderlich machen. Im Gegensatz zu Preissetzungsalgorithmen wird der Zugang zu Quantenressourcen zudem auf absehbare Zeit stark limitiert bleiben. Bis zum Ende dieses Jahrzehnts werden weltweit nur wenige Dutzend leistungsfähige Quantensysteme verfügbar sein. Diese extreme Knappheit verstärkt die Gefahr einer „Quantenoligarchie“, in der wenige Akteure mit Quantenzugang die Marktdynamik kontrollieren.

Hinzu kommt, dass auch die Determinanten des Wettbewerbs durch Quantencomputing grundlegend neu definiert werden könnten. Denn Quantencomputing führt zu exponentiell steigenden Rechenkapazitäten bei bestimmten Problemklassen, wie oben dargestellt. Dies führt zu einer Verschiebung der Wettbewerbsvorteile: Nicht mehr die reine Größe oder Datenmenge entscheidet über Marktmacht, sondern der Zugang zu Quantenressourcen und die Fähigkeit, quantenspezifische Algorithmen zu

⁵¹ Siehe: <https://bookmap.com/blog/quantum-computing-and-the-future-of-trading-what-traders-need-to-know>; <https://www.familywealthreport.com/article.php/How-Quantum-Computing-Will-Change-Everything>.

⁵² Emilio Calvano et al., 'Artificial Intelligence, Algorithmic Pricing, and Collusion', *American Economic Review* 110, no. 10 (1 October 2020): 3267–97, <https://doi.org/10.1257/aer.20190623>; Florian E. Dorner, 'Algorithmic Collusion: A Critical Review' (arXiv, 2021), <https://doi.org/10.48550/ARXIV.2110.04740>.

⁵³ Dies ist schon bei „einfacher“ algorithmischer Kollusion schwierig, siehe dazu: Giovanna Massarotto, 'Detecting Algorithmic Collusion', *Ohio State Law Journal* 86 (February 2025), <https://ssrn.com/abstract=5191297>.

entwickeln. Kurz gesagt: ein Übergang von klassischen (linearen) Skaleneffekten zu Quantenvorteilen. Unternehmen mit Quantenzugang können bestimmte Berechnungen nicht nur schneller, sondern in einer völlig anderen Größenordnung durchführen, was disruptive Marktveränderungen in kürzester Zeit ermöglicht. Es ist also eine „Winner-takes-most“-Dynamik zu erwarten, die noch stärker ausfällt als ohnehin im Digitalsektor üblich. Frühe Anwender von Quantentechnologien könnten laut einer BCG Analyse bis zu 90% des geschaffenen Wertes abschöpfen, da sie nicht nur Wissensvorsprünge, sondern auch exklusive Zugangsrechte zu knappen Quantenressourcen sichern.⁵⁴ Hinzu könnte ein Wandel von der Produktinnovation zur Prozessinnovation stattfinden: Quantencomputing verschiebt den Wettbewerbsfokus von der Entwicklung neuer Produkte hin zur fundamentalen Optimierung bestehender Prozesse – etwa in der Logistik, Materialforschung oder Finanzmodellierung.⁵⁵

Angesichts dieser fundamentalen Verschiebungen müssen langfristig auch die Ziele und Instrumente der Regulierung neu gedacht werden. Die bisherige europäische Regulierungsphilosophie im Wettbewerb- und Digitalbereich, die vor allem auf nachträgliche Markteingriffe bei erheblichen und über einen längeren Zeitraum hinweg nachweisbaren Wettbewerbsverzerrungen setzt, greift zu kurz, wenn Quantenvorteile irreversible Marktveränderungen in kürzester Zeit ermöglichen. Stattdessen braucht es vermutlich eine proaktive Quantenregulatorik. Ähnlich wie bei kritischen Infrastrukturen könnte ein regulierter Zugang zu Quantenressourcen notwendig werden, um beispielsweise den gleichen Zugang zur Justiz zu gewährleisten oder extreme Machtkonzentrationen zu verhindern.⁵⁶ Ferner könnten bestimmte Klassen von Quantenalgorithmien, etwa zur Marktmanipulation oder kryptographischen Analyse, einer besonderen Aufsicht unterliegen.⁵⁷ Wettbewerbsbehörden müssen schließlich neue Instrumente entwickeln, um Marktmacht durch Quantenvorteile zu bewerten und gegebenenfalls zu begrenzen.⁵⁸ Klassische Marktdefinitionen greifen unter Umständen zu kurz, wenn Quantenvorteile disruptive Marktveränderungen ermöglichen. Dafür muss aber über Europa hinausgeschaut werden: Da Quantentechnologien globale Auswirkungen haben, ist eine internationale Koordination der Regulierungsansätze unerlässlich. Langfristig sollte die Entwicklung einer europäischen Quantenordnung als integraler Bestandteil der EU-Quantenstrategie verstanden werden – nicht als Hindernis, sondern als Enabler für einen nachhaltigen europäischen Quantenvorteil.

6 Fazit

Die EU strebt eine führende Rolle bei der weltweiten Entwicklung von Quantentechnologien an. Die EU-Quantenstrategie, die im zweiten Quartal 2025 vorgestellt werden soll, muss dafür die bereits bestehenden Programme – vom Quantum Technologies Flagship bis zum EuroHPC – in ein langfristig kohärentes Gesamtkonzept einbetten. Was sollte bei der Entwicklung dieser Strategie beachtet werden? Die Forschungsübersicht in diesem ceplnput macht klar: Der Wettlauf um das „beste Quantensystem“ ist entgegen mancher Schlagzeile noch lange nicht entschieden. Europa sollte daher auf einen „qubitagnostischen“ Ansatz setzen: Verschiedene Konsortien entwickeln parallel supraleitende Qubits, topologische Qubits, Ionenfallen und photonische Plattformen. Diese technologische Breite erhöht die Widerstandsfähigkeit der europäischen Quantenszene, da sie verhindert, dass ein einzelner Misserfolg

⁵⁴ Siehe: <https://www.bcg.com/publications/2023/enterprise-grade-quantum-computing-almost-ready>.

⁵⁵ Quantum Technology and Application Consortium – QUTAC et al., ‘Industry Quantum Computing Applications’.

⁵⁶ Kasim Balarabe, ‘Quantum Computing and the Law: Navigating the Legal Implications of a Quantum Leap’, *European Journal of Risk Regulation*, 13 February 2025, 18, <https://doi.org/10.1017/err.2025.8>.

⁵⁷ Siehe: <https://www.finra.org/rules-guidance/key-topics/fintech/report/quantum-computing/regulatory-considerations>.

⁵⁸ Siehe hierzu die Meinung der britischen Wettbewerbsbehörde: <https://competitionandmarkets.blog.gov.uk/2023/04/06/quantum-technologies-a-regulatory-perspective/>.

den ganzen Kontinent zurückwirft. Hinzu kommt: Der Fokus verschiebt sich zuletzt immer stärker vom reinen „Bau von Qubits“ hin zu konkreten (hybriden) Anwendungen. Hier können die europäischen Stärken in Forschung, Ausbildung und Industrievernetzung ausgebaut werden, um praxisnahe Anwendungsfälle schnell zu testen und gegebenenfalls neue Märkte zu erschließen. Schließlich könnte für Europa eine Strategie analog zur jüngsten Ausweitung der US-amerikanischen National Quantum Initiative sinnvoll sein, bei der öffentliche Institutionen gezielt Anwendungsfälle identifizieren, um mehr Dynamik in die eigene Technologieentwicklung zu bringen. Ziel ist es, durch konkrete Beschaffungsmaßnahmen und Pilotprojekte einen Markt für Quantenhardware und -software zu schaffen.

Neben technologischen sollten auch ordnungspolitische Aspekte in der EU-Quantenstrategie berücksichtigt werden. Quantencomputing hat das Potenzial, fundamentale wirtschaftliche Paradigmen in Frage zu stellen, indem es neuartige Informationsasymmetrien und Marktmechanismen schafft. Die extreme Knappheit leistungsfähiger Quantensysteme in den kommenden Jahren birgt die Gefahr einer „Quantenoligarchie“. Um dem entgegenzuwirken, sollte die EU-Strategie proaktive Regulierungsansätze wie Quantenzugangsregulierung, Quantenalgorithmen-Governance und eine „quantum-ready competition policy“ diskutieren. Wie in anderen Technologiefeldern gilt es auch hier, die richtige Balance zwischen Innovationsförderung und robustem Ordnungsrahmen zu finden.

Neben den quantenspezifischen Maßnahmen ist generell ein struktureller Umbau der europäischen Wirtschaftsordnung – weg von Bürokratie und Detailregulierung – und die Vollendung des digitalen Binnenmarkts, einschließlich einer echten Kapitalmarktunion, erforderlich. Wenn Europa die Hürden der Fragmentierung und des Kapitalmangels überwindet, könnte es sich als führender Quantenstandort mit starken Universitäten und einer wachsenden Zahl innovativer Quanten-Start-ups etablieren. Ein künftiger EU-Plan für Quantenchips oder gar ein „Quantum Act“ könnte die Koordination weiter professionalisieren und sicherstellen, dass Europa von der Grundlagenforschung über sicherheitskritische Fragen bis hin zu kommerziellen Anwendungen international Maßstäbe setzt. Insgesamt deutet vieles darauf hin, dass die Quantenrevolution zwar noch in den Kinderschuhen steckt, aber ein enormes Potenzial birgt, das weit über den rein technologischen Sicherheitsbereich hinausgeht. Europa hat mit seinen Maßnahmen und Projekten die Chance, zum Zentrum dieses Fortschritts zu werden – wenn es gelingt, sich nach innen klug zu koordinieren und nach außen strategische Autonomie zu bewahren.

**Autor:**

Dr. Anselm Küsters, LL.M., Fachbereichsleiter Digitalisierung und Neue Technologien

kuesters@cep.eu

Centrum für Europäische Politik FREIBURG | BERLIN

Kaiser-Joseph-Straße 266 | D-79098 Freiburg

Schiffbauerdamm 40 Raum 4205 | D-10117 Berlin

Tel. + 49 761 38693-0

Das **Centrum für Europäische Politik** FREIBURG | BERLIN, das **Centre de Politique Européenne** PARIS, und das **Centro Politiche Europee** ROMA bilden das **Centres for European Policy Network** FREIBURG | BERLIN | PARIS | ROMA.

Das gemeinnützige Centrum für Europäische Politik analysiert und bewertet die Politik der Europäischen Union unabhängig von Partikular- und parteipolitischen Interessen in grundsätzlich integrationsfreundlicher Ausrichtung und auf Basis der ordnungspolitischen Grundsätze einer freiheitlichen und marktwirtschaftlichen Ordnung.