



Quantencomputer – Wann können wir mit ihnen rechnen?

Christoph Grzeschik



Christoph Grzeschik

Quantencomputer – Wann können wir mit ihnen rechnen?

Hype und Heilsversprechen

Die Presse betitelt Quantencomputer schon länger als den heiligen Gral für Wirtschaft und Gesellschaft. Wer immer auch diese Technologie beherrscht und in den Händen hält wird die Welt in all ihren Aspekten verändern. Die Bekämpfung des Klimawandels durch neue Batterietechnologien, massive Ressourceneinsparungen durch optimierte Fertigungsprozesse und neue effizientere Medikamente sind nur ein paar Beispiele.

Quantencomputer versprechen bei drei zentralen Problemkategorien gegenüber klassischen Computern überlegene Lösungen zu liefern: Erstens beim maschinellen Lernen sowie bei künstlicher Intelligenz; zweitens bei chemischen Simulationen und drittens bei mathematischen Optimierungen. Diese Lösungen können in einer ganzen Reihe von Domänen Anwendung finden, beispielsweise im Finanzwesen, im Transport und Verkehrswesen, in Produktion und Logistik, Gesundheitswesen, IT-Sicherheit oder in der Energiewirtschaft.

Wegen der breiten Anwendungsfelder wird dem Quantencomputing häufig ein disruptiver Charakter zugeschrieben und es wird als Schlüsseltechnologie bezeichnet. So beziffert McKinsey die durch Quantencomputing verursachte mögliche Wertschöpfung im Jahr 2035 mit bis zu 850 Milliarden US-Dollar. Dabei könnten erste wirtschaftlich relevante Anwendungen bereits in diesem Jahr demonstriert werden¹.

Die hohen Erwartungen treiben aktuell in Europa und insbesondere Deutschland beträchtliche Fördersummen in die Erforschung der Quantentechnologien: Die staatlichen Förder-

gelder durch bereits vergebene sowie geplante Maßnahmen in Deutschland belaufen sich auf bis zu 7,4 Milliarden Euro. Von diesen fließt ein erheblicher Teil in die Erforschung von Quantencomputerhardware, -software und -algorithmen. Hinzu kommen Gelder privater Investoren in Millionenhöhe².

Wirtschaftlich relevanter Mehrwert des Quantencomputings: aktueller Stand

Stand heute konkurrieren eine ganze Reihe verschiedener technologischer Ansätze für einen zukünftigen Quantencomputer miteinander. Grundlegende Funktionsprinzipien konnten auf verschiedenen Hardwareplattformen demonstriert werden. In Deutschland forschen aktuell zahlreiche Verbünde aus Forschungsinstituten und insbesondere kleinen und mittleren Unternehmen an verschiedenen Hardwareplattformen und Anwendungen, beispielsweise in der vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) geförderten Quantencomputing-Initiative des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR QCI). Ebenso existieren in Deutschland bereits eine Reihe von Start-ups, die auch getrieben durch private Investitionen an verschiedenen Hardwareplattformen forschen und zukünftige Anwendungen entwickeln.

Da die Anschaffung von Quantencomputern aufgrund der komplexen und sich noch in Entwicklung befindenden Technologie sehr kostenintensiv ist, können interessierte Nutzer:innen per Cloudzugriff entweder bei etablierten Hardwareherstellern oder über Forschungseinrichtungen auf diverse Systeme extern zugreifen.

¹ Langione et al. (2023): Quantum Computing Is Becoming Business Ready. www.bcg.com/publications/2023/enterprise-grade-quantum-computing-almost-ready [03.01.2025]
² Wenzel, Benedict und Christoph Grzeschik (2024). Quantencomputing - Markt, Zugang, Perspektiven. www.iit-berlin.de/publikation/quantencomputing-markt-zugang-perspektiven/ [03.01.2025]

Auch wenn die heutigen verfügbaren Systeme nur über eine geringe Anzahl an *Qubits* (s. Infokasten) verfügen und diese bei den Berechnungen fehleranfällig sind, stellen sich Unternehmen zunehmend die Frage, wie relevant die Technologie für das eigene Geschäft sein könnte. So setzen sich bereits heute eine Zahl deutscher Konzerne und Großunternehmen verstärkt mit Quantencomputing auseinander und analysieren zukünftige Anwendungsfälle.³ Dabei erhofft man sich bei einsetzender Verfügbarkeit hinreichend leistungsstarker Hard- und Software als Early Adopter einen wirtschaftlich substantziellen Vorsprung gegenüber der Konkurrenz.

Es stellt sich also die Frage, wann Quantencomputer in der Lage sein werden, einen wirtschaftlich relevanten Mehrwert zu generieren. Diese Frage wird unter dem Begriff *Quantum Advantage* subsummiert. Darunter versteht man die Fähigkeit von Quantencomputern, rechnerische Probleme entweder schneller, präziser, oder beispielsweise energieeffizienter zu lösen, als es mit klassischen Computern möglich ist. Die bis heute gezeigten Beispiele für einen möglichen Quantum Advantage sind auf extrem spezifische und für die Praxis nicht relevanten Problemstellungen zugeschnitten und bieten noch keinen wirtschaftlichen Mehrwert. Um einen echten Vorteil gegenüber klassischen Computern zu demonstrieren, müssen die bestehenden Hardwareansätze in ihrer Leistungsfähigkeit massiv skaliert werden.

Technologische Herausforderungen

Die Skalierung von Quantencomputern wird im Folgenden anhand zentraler Leistungsparameter diskutiert. In der Betrachtung dient der Hardwareansatz supraleitender Schaltkreise als Beispiel, da dieser aktuell weit fortgeschritten ist und sich sehr gut zur Veranschaulichung der technologischen Herausforderungen eignet.

Quanten & Co.: die wichtigsten Begriffe

Qubits

Die zentralen Recheneinheiten eines Quantencomputers, analog zu den Bits klassischer Computer.

Superposition

Qubits können gegenüber klassischen Bits nicht nur die Zustände „0“ und „1“ annehmen, sondern auch beliebig feine Überlagerungen dieser.

Verschränkung

Mehrere Qubits können miteinander so verknüpft werden, dass sie einen gemeinsamen Zustand bilden, der exponentiell mehr Information speichern kann als die einzelnen getrennten Qubits.

Die Stärke der Qubits ist gleichzeitig deren Schwäche

Durch Superposition und Verschränkung lassen sich bestimmte mathematische Probleme wesentlich effizienter lösen. Allerdings können äußere Einflüsse die Superposition und Verschränkung sehr leicht zerstören.

Quantencomputer: Leistungsparameter und Herausforderungen bei der Skalierung

	Leistungsparameter des Quantencomputers	Herausforderungen
Qubitimplementierung	Qubits können prinzipiell durch zwei Möglichkeiten bereitgestellt werden: ▪ Mittels mikroskopischer, echter Quantenobjekte wie bspw. neutralen Atomen, Ionen oder Photonen ▪ Alternativ kann man sich bspw. mittels supraleitender Schaltkreise oder Fehlstellen in Diamantgittern Strukturen aufbauen, die Qubiteigenschaften zeigen.	Durch Produktionsschwankungen und Defekte in den einzelnen supraleitenden Schaltkreisen ist bei der ersten Inbetriebnahme eine zeitaufwendige Initialisierung nötig (sog. Bring-up). Darüber hinaus muss das System regelmäßig zwischen den Berechnungen gegen auftretende Drifts kalibriert werden. Mit zunehmender Systemgröße werden diese Prozesse immer aufwendiger.
Qubitanzahl	Anzahl der im Prozessor nutzbaren physikalischen Qubits. Jedes Qubit muss individuell steuer- und auslesbar sein.	Herausforderungen bei Erhöhung der Qubitanzahl: ▪ Zusätzliche Anzahl an elektrischen Verbindungen zur Ansteuerung und Auslese der Qubits ▪ Erhöhter Wärmeeintrag in den kryogen gekühlten Prozessor durch zusätzliche Elektronik und Kabel ▪ Exponentiell ansteigende Zahl störender Kopplungswege zwischen verschiedenen Qubits die zu einem Übersprechen von Signalen führen.
Fidelity	Qubits reagieren äußerst sensibel auf ihre Umgebung und besitzen entsprechend selbst eine gewisse Lebensdauer. Zusätzlich können Operationen auf den Qubits deren Zustände stören. Dies führt in Summe dazu, dass der komplette Prozess von der Initialisierung, Operationen (sog. Gatter) und Auslese fehlerhaft ist. Die prozentuale Fehlerquote in diesem Ablauf wird als „Fidelity“ oder auch Gattergüte bezeichnet.	Insgesamt hat die Erhöhung der Qubitanzahl einen starken, negativen Einfluss auf die Fidelity. Beiträge, die zu einer Verringerung der Fidelity führen: ▪ Interaktion mit thermischer Strahlung durch Umgebung ▪ Rauschen auf den elektrischen Signalen zur Ansteuerung und Auslese der Qubits ▪ Übersprechen von Steuersignalen zwischen verschiedenen Qubits ▪ kosmische Strahlung ▪ Materialdefekte im Prozessor
Gattertiefe	Anzahl der sukzessiven Operationen auf den Qubits.	Qubits haben nur eine gewisse Lebensdauer. Fehler während den Operationen auf den Qubits summieren sich. Dies beschränkt die maximale Gattertiefe
Konnektivität	Maß für die direkte Verknüpfbarkeit der einzelnen Qubits untereinander. Idealerweise möchte man jedes Qubit mit allen anderen Qubits verschränken können um das volle Potenzial von Quantencomputern auszuschöpfen (sog. all-to-all connectivity).	Qubits sind in einer zweidimensionalen Ebene angeordnet. Durch die Anordnung in einer Ebene und die nur wenigen kurzen Verbindungen zu direkten Nachbarqubits ist die Konnektivität stark eingeschränkt. Um eine höhere Konnektivität zu simulieren bedient man sich sogenannter SWAP-Gatter. Durch diese können benachbarte Qubitzustände untereinander getauscht werden. Allerdings sind SWAP-Gatter selbst wieder fehleranfällig und erhöhen die Gattertiefe.
Geschwindigkeit	Ergibt sich aus der Summe der Zeit für die Kalibrierung, Initialisierung der Qubits, der Operationen auf diesen, sowie die anschließende Auslese der Qubits.	Durch eine unzureichende Fidelity müssen Berechnungen mehrfach wiederholt werden. Zusätzlich benötigt die regelmäßige Kalibration des Systems Zeit. Quantencomputer sind deshalb in Ihrer Taktung um Größenordnungen langsamer als klassische Computer.

Tabelle 1: Übersicht der Leistungsparameter eines Quantencomputers und den damit verbundenen Herausforderungen bei der Skalierung.

Beispiele benötigter Qubitzahlen für bestimmte Anwendungsfälle

Anwendung/Problemstellung	benötigte Anzahl an Qubits	
	logisch	physisch
Entschlüsselung heute typischer RSA-Kryptographie	> 4000	> 4 Mio.
Simulation von Lithium-Ionen-Batterien	> 2000	> 2 Mio.
Entwicklung effizienterer Düngemittel	> 2000	> 2 Mio.
Optimierung von Derivatpreisen	> 8000	> 8 Mio.

Tabelle 2: Beispiele benötigter Qubitzahlen für bestimmte Anwendungsfälle.

Einschätzung und Perspektive

Wie aus Tabelle 1 ersichtlich, müssen bei der Skalierung von Quantencomputern für die Erreichung eines wirtschaftlich relevanten Rechenvorteils gegenüber klassischen Computern (Quantum Advantage) eine ganze Reihe von Leistungsparametern verbessert werden, die in einem ungünstigen Verhältnis zueinander stehen. Eine reine Erhöhung der Qubitzahl führt zwangsläufig zu einer Verschlechterung der Fidelity. Dies wiederum limitiert die Gattertiefe. Darüber hinaus müssen die zusätzlich geschaffenen Qubits auch miteinander vernetzt werden. Denn erst bei sehr hoher Konnektivität entfalten Quantencomputer ihr volles Potenzial. Aktuelle Systeme von IBM verfügen über wenige hundert Qubits, eine äußerst niedrige Konnektivität und noch unzureichende Fidelity. IBM verfolgt den Ansatz, größere Berechnungen auf mehrere Kerne aufzuteilen (Circuit Knitting). Allerdings müssen die Kerne für eine echte Leistungssteigerung mittels noch experimenteller Verfahren wie der Quantenkommunikation verbunden werden.

Die aktuell am stärksten verfolgte Lösung zur Erreichung eines Quantum Advantage liegt in der *Quantenfehlerkorrektur*. Dabei wird eine große Zahl von im Prozessor vorhandenen *physischen Qubits* zu sogenannten fehlerkorrigierten, *logischen Qubits* ge-

koppelt. Mit diesen soll in der Perspektive dann im Regime des sogenannten *Fault Tolerant Quantum Computing* (FTQC) zuverlässige Berechnungen mit hoher Gattertiefe möglich sein. Die Quantenfehlerkorrektur stellt jedoch hohe Anforderungen an die Fidelity der physischen Qubits. Außerdem werden typischerweise pro logischem Qubit circa 1000 physische Qubits mit sehr guter Fidelity benötigt. Mit den aktuell verfügbaren Hardwareplattformen ist man aktuell noch Größenordnungen von den für relevanten Anwendungsfällen benötigten Qubitzahlen entfernt (s. Tabelle 2^{4, 5, 6, 7} sowie Infokasten zu den IBM Roadmaps).

In den vergangenen Jahren wurden deshalb verstärkt Algorithmen entwickelt, die auch mit fehlerbehafteten Qubits im sogenannten *Noisy Intermediate Scale Quantum* (NISQ) Regime praxisrelevante Anwendungsfälle ermöglichen sollten. Allerdings trüben sich die NISQ-Perspektiven zunehmend ein, da bei zunehmender benötigter Qubitzahl und Gattertiefe die Fidelity ebenfalls zunehmen muss und dies in zumindest aktuellen Skalierungsansätzen der Plattformen nicht realisierbar ist⁸. Dem entsprechend verschiebt sich der Fokus zunehmend hin zu FTQC und der Erforschung verbesserter Algorithmen zur Fehlerkorrektur⁹.

4 Gagliardoni, Tommaso (2021): Quantum Attack Resource Estimate: Using Shor's Algorithm to Break RSA vs DH/DSA vs ECC. <https://research.kudelskisecurity.com/2021/08/24/quantum-attack-resource-estimate-using-shors-algorithm-to-break-rsa-vs-dh-dsa-vs-ecc/> [03.01.2025]
5 Delgado et al., arXiv (2022): Simulating key properties of lithium-ion batteries with a fault-tolerant quantum computer. <https://arxiv.org/abs/2204.11890>
6 Lee et al., PRX QUANTUM (2021): Even More Efficient Quantum Computations of Chemistry Through Tensor Hypercontraction. <https://journals.aps.org/prxquantum/pdf/10.1103/PRXQuantum.2.030305>
7 Chakrabarti et al., arXiv (2020): A Threshold for Quantum Advantage in Derivative Pricing. <https://arxiv.org/abs/2012.03819>
8 Ezratty, Olivier, arXiv (2023): Where are we heading with NISQ? <https://arxiv.org/abs/2305.09518>
9 IBM diskutiert hier bspw. eine Reduktion des nötigen Qubit-Overheads um ca. eine Größenordnung durch verbesserte Fehlerkorrekturalgorithmen: Bravyi et al., Nature (2024): High-threshold and low-overhead fault-tolerant quantum memory. www.nature.com/articles/s41586-024-07107-7

Entwicklung der Qubitzahlen am Beispiel der IBM Roadmaps



Abbildung 1: Abgebildet sind die von IBM in den Roadmaps 2022 bzw. 2024 angestrebten und reell erreichten Qubitzahlen in Relation zur nötigen Zahl der Qubits zur Berechnung der hier beschriebenen Use Cases. Im Gegensatz zur Roadmap 2022 sieht die neue Roadmap nun ab 2025 erstmal von einer weiteren Steigerung der Qubitzahlen ab und fokussiert sich auf die Verbesserung der Fidelity und Erreichung logischer Qubits im Jahr 2029. Damit könnten ab 2033 theoretisch gemäß Roadmap die beschriebenen Use Cases in greifbare Nähe rücken. (Quelle: eigene Darstellung nach <https://www.ibm.com/quantum/blog/ibm-quantum-roadmap-2025>)

In den kommenden Jahren ist aufgrund der vielen technologischen Herausforderungen auf Hardware-, Software- und Algorithmenseite ein wirtschaftlich relevanter Einsatz von Quantencomputern sehr unwahrscheinlich. Stattdessen handelt es sich um einen Entwicklungs-marathon: Durchschlagende Erfolge werden sich nur Schritt für Schritt und nur in begrenzten Anwendungsgebieten zeigen.

Entlang der aktuell gezeigten prinzipiellen Grundfunktionalitäten von Quantencomputern mit verschiedenen Technologieansätzen kann man durchaus Parallelen zur Entwicklung der klassischen Computer ziehen. Diese wurden auch frühzeitig theoretisch in ihrer möglichen Funktionsweise beschrieben. Allerdings ermöglichte erst die Entwicklung der Transistortechnologie Computer zu in der Breite wirtschaftlich nutzbaren Systemen zu skalieren. Quantencomputer befinden sich aktuell in einem ähnlichen Stadium. Eine reine Skalierung der heutigen Hardwareplattformen ist aufgrund der verschiedenen miteinander verknüpften und im ungünstigen Verhältnis zueinander

stehenden Herausforderungen nicht aussichtsreich. Dementsprechend sind aktuelle Erfolgsmeldungen und Versprechungen der Hardware- und Softwarehersteller unter Nennung einzelner Leistungsparameter stets kritisch vor dem Hintergrund aller anderen Kenngrößen zu betrachten. Fehlende Angaben sind als Hinweis auf konkret bestehende technologische Herausforderungen zu betrachten. Gleiches gilt für präsentierte Anwendungsbeispiele und Algorithmen, bei denen eine vollständige Aufschlüsselung der dafür notwendigen verschiedenen Leistungsressourcen fehlt.

Beim Einwerben von Geldern aus der öffentlichen und privaten Hand zeichnen FuE-Akteure gezwungenermaßen vielversprechende kurz- und mittelfristige Perspektiven. Immer häufiger wird deshalb die Gefahr eines sogenannten Quantenwinters thematisiert: Überzogene oder nicht erfüllte Erwartungen können der Glaubwürdigkeit der Quantentechnologien insgesamt schaden und den Entwicklungs-marathon behindern.

Gleichzeitig steht die Entwicklung neuer klassischer Algorithmen im Wettkampf mit den Quantencomputern. Letztendlich entscheiden eine ganze Reihe von Faktoren, ob ein Einsatz von Quantencomputern sich wirtschaftlich lohnt – darunter Anschaffungspreis, Zugriffsmöglichkeiten, Geschwindigkeit, Datendurchsatz, Verfügbarkeit von geschultem Personal, etc. Dies sind weitere Gründe, warum in Zukunft der flächendeckende Einsatz der Technologie eher unwahrscheinlich ist.

Die Entwicklung von Quantencomputern als Schlüsseltechnologie im internationalen Kontext

Aus geopolitischer Sicht stellen Quantencomputer aus zwei zentralen Gründen eine Schlüsseltechnologie des 21. Jahrhunderts dar: Quantencomputer könnten wie geschildert in einer ganzen Reihe von Domänen Anwendung finden: Bei neuen leistungsfähigeren Batteriezellen, Simulation von Medikamenten mit besseren Wirkmechanismen oder auch optimierte chemische Prozesse könnten Unternehmen mithilfe von Quantencomputern massive Wettbewerbsvorteile gegenüber Konkurrenten erlangen.

Auf der anderen Seite bedrohen zukünftige Quantencomputer allerdings auch die heute gängigen asymmetrischen Verschlüsselungsverfahren (RSA) in der Informationsübertragung. So werden schon seit längerem sogenannte Post-Quanten-Kryptographie-Algorithmen (PQC) entwickelt. Diese auf klassischen mathematischen Verfahren basierenden PQC-Algorithmen sollen gegenüber Entschlüsselungsangriffen mit zukünftigen Quantencomputern sicher sein. Weiterhin wird alternativ versucht, mithilfe der Quantenkryptografie mittels der Übertragung von Lichtquanten abhörsichere Kommunikationswege zu ermöglichen. Aktuelle Studien gehen davon aus, dass für die Entschlüsselung gängiger RSA-Verschlüsselungen Quantencomputer mit Millionen bis Milliarden Qubits nötig sind¹⁰. Auch wenn entsprechend leistungsfähige Quantencomputer eventuell noch Jahrzehnte Entwicklungsarbeit benötigen, haben viele Länder ein großes Interesse daran, sich bereits jetzt zu schützen, um sich gegen das Entschlüsseln von heutigen gespeicherten Daten in der Zukunft zu wappnen („store now, decrypt later“)

Zusammenfassend behalten neben der Europäischen Union auch andere Nationalstaaten die technologische Souveränität in diesem Bereich fest im Blick. Die Europäische Kommission empfiehlt, neben den Technologiebereichen der fortschrittlichen Halbleitertechnologien, Technologien der künstlichen Intelligenz und Biotechnologien auch für die Quantentechnologien eine Risikobewertung durch die Mitgliedstaaten in Zusammenarbeit mit der Kommission¹¹. Parallel haben einzelne Staaten bereits Exportbeschränkungen gegenüber Dritten erlassen (bspw. Frankreich¹² und die USA¹³). Das Interesse, den Zugang zu dieser Zukunftstechnologie im eigenen Wirkungskreis sicherzustellen und gegebenenfalls vor anderen zu schützen, wird immer relevanter. Europa ist im Bereich der Forschung und der Verfügbarkeit von Expert:innen im Bereich der Quantentechnologien sehr stark aufgestellt¹⁴. Daher ist das Potenzial für die Entwicklung neuer technologischer Lösungsansätze zur Bewältigung der sehr komplexen Herausforderungen als vielversprechend einzuschätzen. Letztlich wurde auch im Bericht zur zukünftigen europäischen Wettbewerbsfähigkeit (dem sogenannten Draghi-Report) Quantencomputing als wichtige Zukunftstechnologie insbesondere im Wettbewerb mit den USA und China genannt¹⁵. Alle Player im vielfältigen europäischen Ökosystem im Bereich des Quantencomputing, aber auch der gesamten Quantentechnologien, sollte dementsprechend koordiniert zusammenarbeiten um den komplexen Herausforderungen gewachsen zu sein und sich bietende Chancen zu nutzen.

10 Gidney, Craig and Martin Eker, arXiv (2019): How to factor 2048 bit RSA integers in 8 hours using 20 million noisy qubits. <https://arxiv.org/abs/1905.09749>

11 Europäische Kommission, Pressemitteilung (2023): Kommission empfiehlt Risikobewertungen für vier kritische Technologiebereiche. https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/de/ip_23_4735 [03.01.2025]

12 Swayne, Matt (2024): France Advances Quantum Technology Export Controls under New EU Regulation Framework. <https://thequantuminsider.com/2024/02/26/france-advances-quantum-technology-export-controls-under-new-eu-regulation-framework/> [03.01.2025]

13 Swayne, Matt (2024): U.S. Commerce Department Imposes Strict Export Controls on Chinese Quantum Leader QuantumCTek. <https://thequantuminsider.com/2024/05/11/u-s-commerce-department-imposes-strict-export-controls-on-chinese-quantum-leader-quantumctek/> [03.01.2025]

14 Bogobowicz et al. (2023): Quantum technology sees record investments, progress on talent gap. www.mckinsey.com/capabilities/mckinsey-digital/our-insights/quantum-technology-sees-record-investments-progress-on-talent-gap [03.01.2025]

15 Draghi, Mario, European Commission (2024): The future of European competitiveness. https://commission.europa.eu/topics/strengthening-european-competitiveness/eu-competitiveness-looking-ahead_en?prefLang=de [03.01.2025]

Fazit

Im Rahmen dieser iit-perspektive wurden die verschiedenen technologischen Herausforderungen auf Hardwareseite am Beispiel der supraleitenden Schaltkreise beschrieben. Dabei sind die verschiedenen zu skalierenden Leistungsparameter in einem ungünstigen Verhältnis zueinander verknüpft. Zumindest mit den aktuell verfolgten Technologieansätzen ist deshalb nicht mit einer kurz- oder mittelfristigen Verfügbarkeit von leistungsstarken Quantencomputern zu rechnen. Vor dem Hintergrund der geopolitischen Relevanz ist die Zeichnung realistischer Zukunftsszenarien ohne überzogene Erwartungen wichtig, um eine kontinuierliche Entwicklung dieser Schlüsseltechnologie zu ermöglichen. Die Nutzung bestehender Synergien auf nationaler und europäischer Seite kann dabei zu einer effizienten und ausdauernden Technologieentwicklung beitragen.

Herausgeber

Prof. Dr. Volker Wittpahl
Institut für Innovation und Technik (iit)
in der VDI/VDE Innovation + Technik GmbH
Steinplatz 1, 10623 Berlin

Zitation

Christoph Grzeschik (2025): Quantencomputer –
Wann können wir mit ihnen rechnen? iit-perspektive Nr. 82.
Institut für Innovation und Technik (iit), Berlin.

Autor

Dr. Christoph Grzeschik
Tel.: +49 (0)30 310078 - 4370
E-Mail: grzeschik@iit-berlin.de

iit perspektive Nr. 82

Mai 2025
Layout: Poli Quintana
DOI: 10.23776/2025_05
Bildnachweise: mikeosphoto – stock.adobe.com

