

acatech

HORIZONTE

Quantentechnologien



Warum sind Quanten wichtig?

Grundlagen für das Verständnis
der Quantentechnologien

Quantentechnologien der ersten und
zweiten Generation

Gestaltungsspielräume und
Erwartungsmanagement

Mit der vorliegenden Publikationsreihe untersucht acatech bedeutende Technikfelder, die sich klar am Horizont abzeichnen, deren Auswirkungen aber noch geklärt werden müssen. Diese Technikfelder werden in acatech HORIZONTE fundiert und anschaulich aufbereitet. In diesen Prozess fließen der aktuelle Stand der internationalen Forschung, Entwicklung und Anwendung sowie die Wertschöpfungspotenziale der Technologien ein. Darüber hinaus nehmen die acatech HORIZONTE ethische, politische und gesellschaftliche Fragen sowie denkbare Entwicklungen und Gestaltungsoptionen in den Blick. Mit den acatech HORIZONTEN möchte die Akademie die Diskussion über neue Technologien anregen, politische Gestaltungsräume aufzeigen und Handlungsoptionen formulieren – und so einen Beitrag für eine vorausschauende Innovationspolitik leisten.

Der Quantencomputer – Hype oder nahe Zukunft?

Wann wir tatsächlich mit praktikabel einsetzbaren Quantencomputern rechnen können, weiß noch niemand. Es könnte noch mehrere Jahrzehnte dauern, bis wir gute, zuverlässig funktionierende und skalierbare oder gar universelle Quantencomputer haben. Bisher ist nicht einmal klar, welche der Plattformen, also die „Art“ der verwendeten Qubits, sich durchsetzen wird. Ob die beiden momentan führenden Technologien der Supraleiter und der Ionenfallen dann auch auf Dauer die besten sein werden, bleibt abzuwarten. Es wird auch weiter an neuen und besseren Materialien für Qubits geforscht, in denen die Quantensysteme weniger störanfällig „arbeiten“ können (siehe hierzu auch die Tabelle „Verschiedene Arten von Qubits“).

Es sei außerdem darauf verwiesen, dass es nicht nur um die rein technologische Entwicklung von Qubits geht, sondern auch um neue Wege der Programmierung: Es muss eine komplett neue Softwarearchitektur entwickelt werden, die speziell auf den Quantencomputer ausgerichtet ist.

Selbst wenn ein voll funktionsfähiger, skalierbarer Quantencomputer irgendwann entwickelt ist, wird dieser aufgrund der aufwendigen Hardware vermutlich nicht bei jeder Privatperson in der Wohnung stehen, sondern eher als Co-Prozessor im großen Rechenzentrum von Unternehmen neben anderen klassischen Rechnern für ganz spezielle Aufgaben genutzt werden. Quantencomputer sollen zumindest in der gegenwärtigen Vorstellung also nicht die klassischen Computer ersetzen, sondern ganz spezifische Probleme bewältigen und herkömmliche Rechner komplementieren. Man soll zwar niemals „nie“ sagen – man dachte zu Beginn des Informationszeitalters auch, der klassische Computer würde sich nicht allgemein durchsetzen –, vor übertriebenen Erwartungen sei an dieser Stelle jedoch gewarnt.

Quantensimulation

Eine der wichtigsten Anwendungen für den Quantencomputer könnte die Quantensimulation werden. Dabei versucht man, komplexe Quantensysteme zu simulieren, die man heute sogar mit einem Supercomputer nicht virtuell nachbauen kann. Beispielsweise ist bei der Suche nach neuen Medikamenten das computergestützte Simulieren von Proteinen eine zutiefst komplexe, aber zugleich besonders vielversprechende Methode in der Arzneimittelentwicklung. Eine Quantensimulation kann man also als ein Experiment verstehen, das nicht, wie heute üblich, im Labor, sondern auf einem Quantencomputer durchgeführt wird.

„Wir müssen bei den Qubits unterschiedliche Wege ausprobieren, auch wenn wir ab und zu gegen die Wand rennen.“

Richard Feynmans Traum auf dem Weg zur Realität

„[Ich] kann [...] mit Sicherheit behaupten, dass niemand die Quantenmechanik versteht“¹² ist eines der berühmtesten Zitate von Richard Feynman. Er gilt als einer der größten Physiker des 20. Jahrhunderts und wurde für seine Arbeiten zur Quantenelektrodynamik 1965 mit dem Nobelpreis ausgezeichnet. Über seinen Tod hinaus hat er den Ruf eines Visionärs und Querdenkers. In einem berühmt gewordenen Vortrag prägte er 1959 den Satz: „There is plenty of room at the bottom“ (zu Deutsch: „Unten ist eine Menge Platz“).³ In diesem Vortrag beschreibt er, wie wir in Zukunft Technologien verwenden, die nur ein paar Mikro- und Nanometer groß sind. Der Anstoß für die heute unverzichtbaren Nanotechnologien wie den Computerchip war damit gegeben. Feynman pflegte einen unkonventionellen Lehr- und Vortragsstil, mit dem er es schaffte, auch komplexe physikalische Themen anschaulich zu erklären. 1981 hielt er seinen zweiten legendären Vortrag: „Physik mit Computern simulieren“. Er sprach erstmals von Quantencomputern, mit denen es möglich sein würde, quantenphysikalische Vorgänge in der Natur präzise zu simulieren. Durch das bessere Verständnis dieser Vorgänge könne man neue Anwendungen, etwa in der Chemie, Medizin und in der Materialwissenschaft, entwickeln. Heute, fast vierzig Jahre später, sind wir dabei, seinen Traum Realität werden zu lassen.³

Klassischer Computer versus Quantencomputer: Wie rechnen sie?

Bei klassischen Computern ist die kleinste Informationseinheit ein „Bit“. Ein Bit kann zwei unterschiedliche Zahlen darstellen, also entweder eine Null oder eine Eins. Null bedeutet zum Beispiel „Strom aus“, und eins bedeutet „Strom an“. In Computern werden mehrere aufeinanderfolgende Bits zu einer Einheit zusammengefasst, um mit ihnen größere Zahlen darzustellen. Acht Bits ergeben zum Beispiel ein Byte, wodurch sich alle Zahlen von 0 bis 255 darstellen lassen. Moderne Computer verwenden inzwischen größere Einheiten von meist 32 oder 64 Bit, wobei sich mit letzteren grob gesagt die Zahlen von minus 9 Trillionen bis plus 9 Trillionen darstellen lassen.

Um beispielsweise die Zahlen 0 bis einschließlich 15 darzustellen, benötigt man vier Bit (siehe Schaubild auf der nächsten Seite). Genauso wie wir in unserem Dezimalsystem zum Beispiel eine Einer-, Zehner- und Hunderterstelle haben, repräsentiert das erste Bit die erste Stelle, das zweite Bit die zweite Stelle und so fort.

Mit diesen Zahleneinheiten rechnet der Computer dann weiter. Dabei schickt er sie durch elektronische Schalter, sogenannte Transistoren. Je nachdem, wie diese Transistoren angeordnet und kombiniert sind, können damit unterschiedliche Rechenoperationen ausgeführt, zum Beispiel zwei Zahleneinheiten addiert werden. Eine bestimmte Anordnung dieser Transistoren für eine bestimmte Rechenoperation nennt man „Logikgatter“. Transistoren in modernen Computern sind mittlerweile extrem klein und haben eine Größe von circa 50 Nanometern. Der bisher kleinste gebaute Transistor ist sogar kleiner als 10 Nanometer. Zum Vergleich: Ein Blatt Papier hat eine Dicke von 100.000 Nanometern. Selbst unsere roten Blutkörperchen sind über hundert Mal größer als ein moderner Transistor.

Moderne Computer haben die sequenzielle Verarbeitung mit Bits nahezu perfektioniert. Sie können zwei Milliarden Arbeitsschrit-

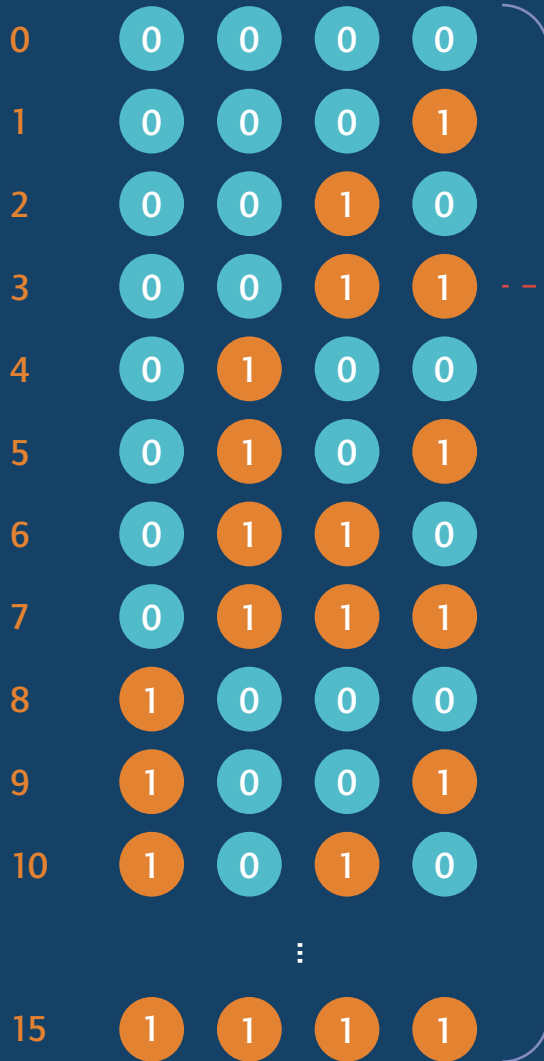
te pro Sekunde verarbeiten. Trotzdem gibt es Aufgaben, für die ein klassischer Computer zu langsam ist.

Hier kommt der Quantencomputer ins Spiel, der mit Qubits statt Bits rechnet. Ein Qubit kann ebenso wie ein Bit eine Eins oder eine Null repräsentieren. Um mit Qubits wirklich effektiv rechnen zu können, müssen aber die Superposition und die Verschränkung genutzt werden. Wie schon bei den vier klassischen Bits zuvor können auch mit vier Qubits die einzelnen Zahlen von 0 bis 15 dargestellt werden. Der Trick für die Rechenleistungssteigerung beim Qubit ist jedoch, dass es sich auch in einem Superpositionszustand befinden kann, in dem es mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit eine Eins und mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit eine Null zeigt. Aufgrund des Superpositionszustands können mit vier Qubits deshalb auch simultan alle Zahlen von 0 bis 15 auf einmal dargestellt werden. In jedem Rechenvorgang wird dann das Ergebnis für all diese Zahlen gleichzeitig parallel berechnet. Während man also beim klassischen Computer die Berechnung für jede einzelne Zahl einzeln nacheinander durchführen muss, kann man beim Quantencomputer mit nur vier Qubits schon eine Berechnung für alle Zahlen von 0 bis 15 gleichzeitig durchführen. Dies ist erst durch die Kombination von Verschränkung und Superposition möglich. Darin liegt der enorme Vorteil des Quantencomputers. Benutzt man beim Quantencomputer nicht vier, sondern 20 Qubits, kann man bereits über eine Millionen Zahlen (2^{20}) parallel darstellen und berechnen.

Aber was kommt bei diesen Berechnungen nun heraus? Das Ergebnis einer Berechnung durch einen Quantencomputer ist eine einzelne, ablesbare Zahl, die aus den vielen parallelen Rechnungen hervorgegangen ist: eine Lösung des Problems, die mit der höchsten Wahrscheinlichkeit richtig ist.

Der klassische Computer

Der klassische Computer repräsentiert Information in Form von aufeinanderfolgenden Einsen und Nullen, auch „Bit“ genannt.



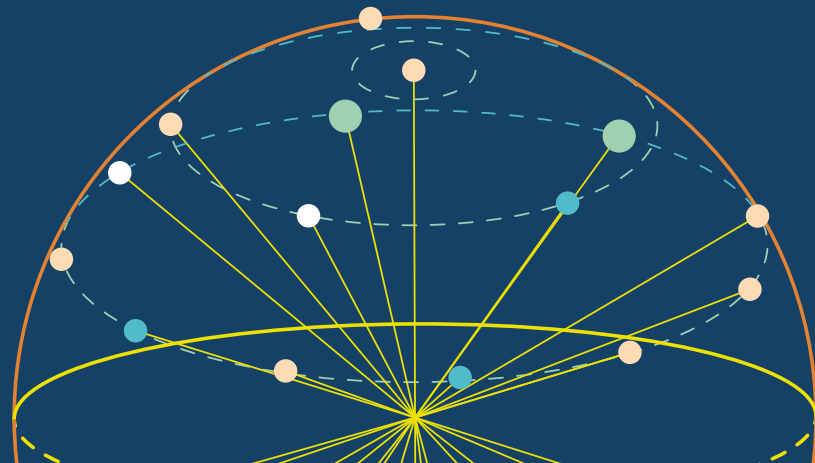
Der Quantencomputer

Der Quantencomputer repräsentiert Information in Form von Qubits. Diese können eine einzelne Zahl, zum Beispiel die 3, aber auch alle Zahlen auf einmal darstellen.

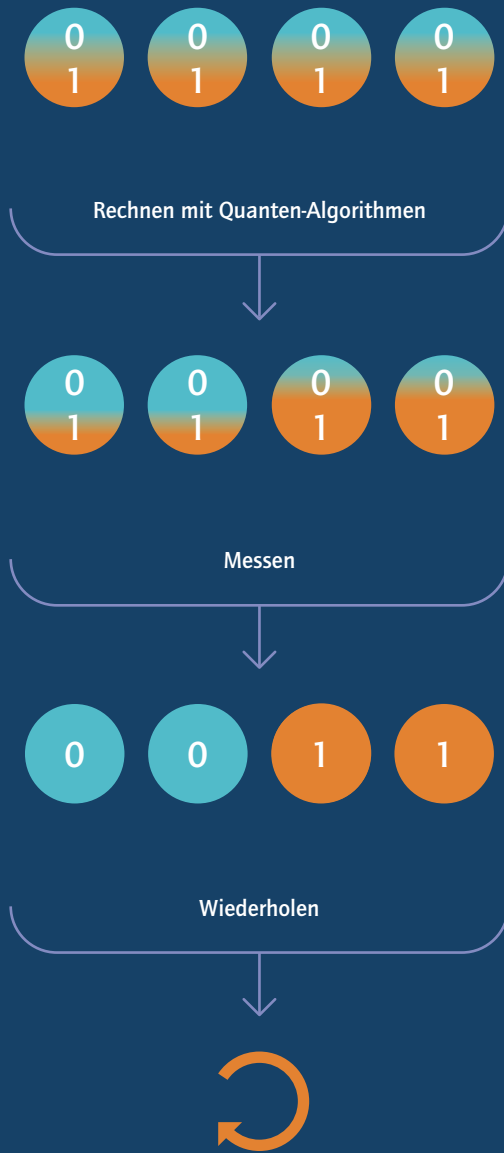
Einzelne Zahl 3



Superposition aller Zahlen von 0 - 15



Wie rechnet der Quantencomputer?



Sogenannte Quantenalgorithmen verändern die Wahrscheinlichkeiten der Superpositionszustände der einzelnen Qubits. So wird der Zustand, der die richtige Lösung repräsentiert, immer wahrscheinlicher und die falschen Lösungen immer unwahrscheinlicher.

Danach „misst“ man das Ergebnis und die Superposition endet.

Da hierbei das Wahrscheinlichkeitsprinzip gilt, also selbst die falschen Lösungen mit einer sehr geringen Wahrscheinlichkeit auftreten können, führt man die Berechnung und die Messung viele Male durch, bis das Ergebnis mit der gewünschten statistischen Genauigkeit vorliegt.

Klassischer Computer versus Quantencomputer

Ein klassischer Computer müsste die Berechnungen nacheinander für alle Zahlen von 0 bis 15 durchführen, um auf das richtige Ergebnis zu kommen. Der Quantencomputer kann dies gleichzeitig für alle Zahlen berechnen und gibt am Ende das richtige Ergebnis aus.

Quantencomputer: Cool, aber wie funktio- niert der eigentlich?

In den Medien wird der Quantencomputer gerne als „Supercomputer“ der Zukunft dargestellt. Hier wird das Funktionsprinzip beispielhaft anhand eines Quantencomputers, der supraleitende Qubits verwendet, erklärt. Das ist einer der möglichen Ansätze, um Quantencomputer zu realisieren.

Datenübertragung

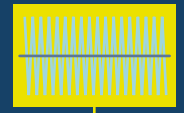
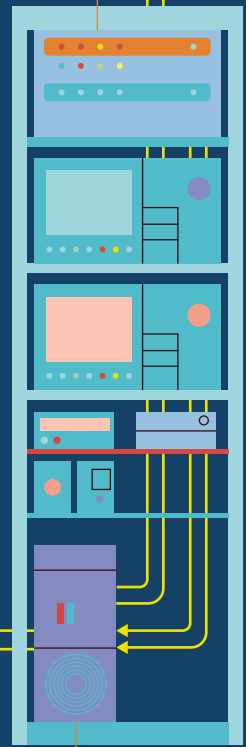
Mit dem Quantencomputer werden Anweisungen und Daten in Form von Mikrowellen ausgetauscht. Digitale Signale vom Steuercomputer werden durch eine Mikrowellenelektronikeinheit in Mikrowellenimpulse verwandelt und an den Quantencomputer weitergeleitet. Umgekehrt werden wie andersrum die Mikrowellensignale, die der Quantencomputer als Output schickt, in digitale Signale umgewandelt, die der Steuercomputer dann lesen kann.

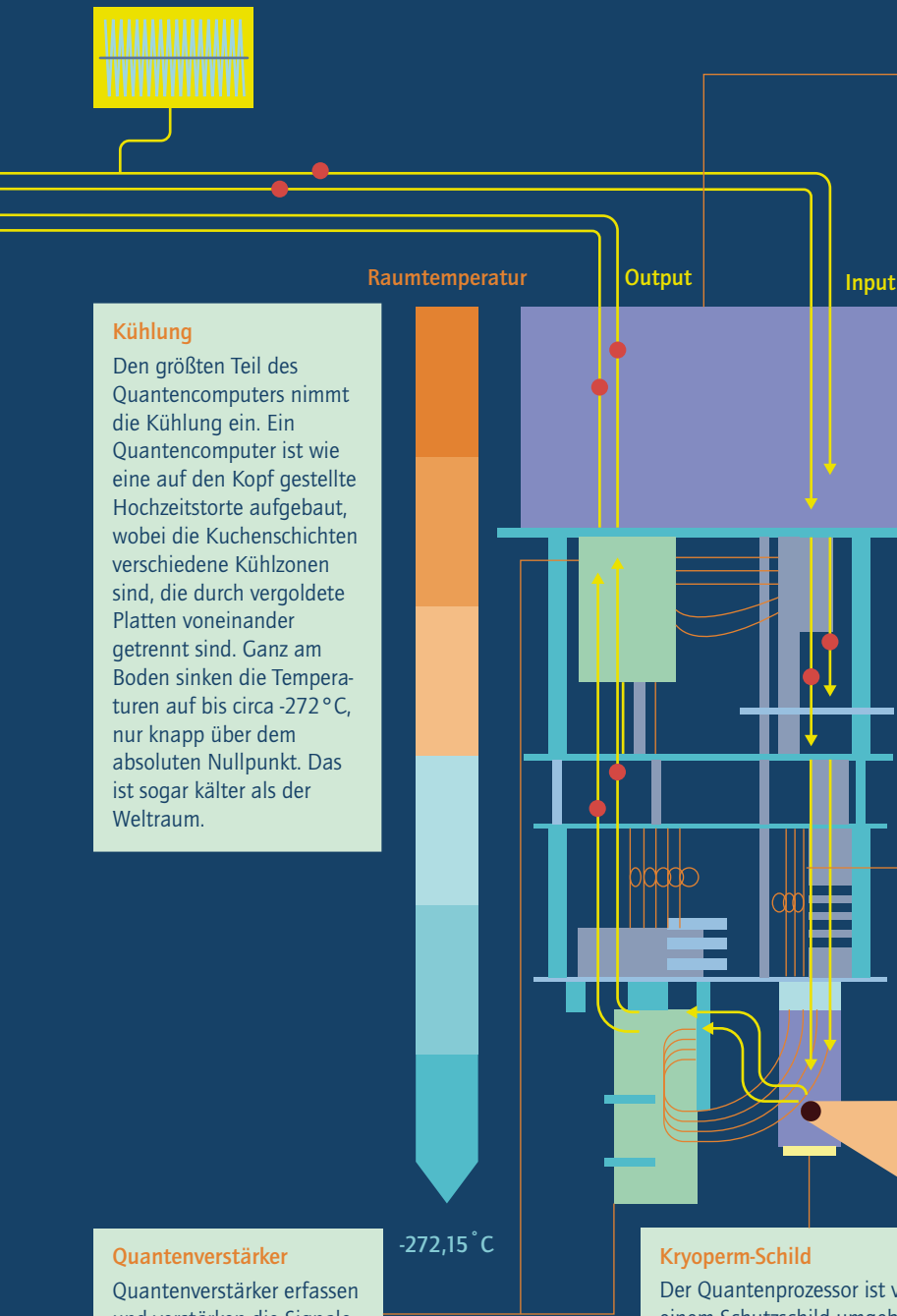
Programmierung

Schon heute ist es für Wissenschaftler möglich, an ihren herkömmlichen Rechnern einen Auftrag für einen Quantencomputer zu erstellen. Diesen Auftrag schicken sie an die Cloud einer Firma, die ihre Quantencomputer öffentlich zur Verfügung stellt. In der Cloud werden die Aufträge an den Computer weitergeleitet, der den Quantencomputer steuert.

Datenauswertung

Ein klassischer Computer, der bei Raumtemperatur arbeitet, steuert den ganzen Prozess. Er verarbeitet eingehende Aufträge, gibt Anweisungen an den Quantencomputer und schickt die Ergebnisse zurück an den Auftraggeber.





Hülle
 Wenn der Computer in Betrieb ist, umschließen ihn fünf Gehäuseschichten, die wie russische Puppen ineinander verschachtelt sind. Sie dienen zur Abschirmung, um das Innere superkalt und vakuumdicht zu halten.

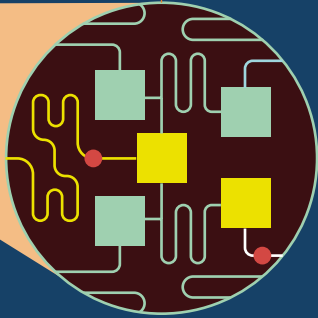
Kühlung
 Den größten Teil des Quantencomputers nimmt die Kühlung ein. Ein Quantencomputer ist wie eine auf den Kopf gestellte Hochzeitstorte aufgebaut, wobei die Kuchenschichten verschiedene Kühlzonen sind, die durch vergoldete Platten voneinander getrennt sind. Ganz am Boden sinken die Temperaturen auf bis circa -272°C , nur knapp über dem absoluten Nullpunkt. Das ist sogar kälter als der Weltraum.

Spiralen
 Die Spiralförmigkeit der Kabel, die die Daten übertragen, verringert die Spannung, die durch die starke Kühlung des Innenraums entsteht. Ohne diese Windungen würden die Kabel reißen. Sie vermindern zudem den Wärmeeintrag in den Quantenprozessor.

Quantum-Processing Unit (QPU)
 Es gibt bisher keinen standardisierten Quantenprozessor, da noch an der besten Realisierungsmethode geforscht wird. Er könnte aber zum Beispiel aus einem Siliziumplättchen mit mehreren supraleitenden Qubits bestehen. Dabei ist jedes Qubit mit einem sogenannten Resonator verbunden. Mithilfe dieser Resonatoren lässt sich der Zustand des Qubits steuern und lesen. Die eingehenden Mikrowellensignale interagieren mit den Qubits durch die Resonatoren. Zusätzliche Resonatoren verbinden mehrere Qubits, um eine Verschränkung zu ermöglichen.

Quantenverstärker
 Quantenverstärker erfassen und verstärken die Signale, die der Quantenprozessor ausgibt.

Kryoperm-Schild
 Der Quantenprozessor ist von einem Schutzschild umgeben, der ihn von elektromagnetischer Störstrahlung abschirmt.



Plattformen für die Bildung von Qubits

In den letzten zwanzig Jahren Entwicklung sind weltweit einige Hardwareplattformen zur Bildung von Qubits entstanden. Die gegenwärtig führenden Plattformen zur Bildung von Qubits werden in der folgenden Tabelle vergleichend dargestellt.

	Wie funktioniert's?	Nachteile
Supraleitend	Ein supraleitendes Qubit besteht nicht aus einem Atom, sondern aus einem Schaltkreis, der ein „künstliches Atom“ darstellt. Dieser Schaltkreis verhält sich wie ein Atom mit zwei Energiezuständen, zwischen denen er hin- und herwechseln kann.	Der Schaltkreis muss aus einem supraleitenden Material bestehen, damit Elektronen ohne Widerstand hindurchfließen können. Nur dann können die Elektronen ihre Quantenzustände einnehmen und behalten. Dafür kann zum Beispiel supraleitendes Aluminium verwendet werden, das allerdings bis fast auf den absoluten Nullpunkt gekühlt werden muss. Das ist teuer und aufwendig. Außerdem ist die Kohärenzzeit wesentlich kürzer als bei Ionenfallen-Qubits, wodurch die Berechnungen fehleranfälliger werden.
Ionenfallen	Ein Ion ist ein Atom, das eine positive oder negative elektrische Ladung besitzt. In einer Ionenfalle werden zum Beispiel positiv geladene Kalziumatome im Vakuum eingefangen. Dort werden sie durch Laser gekühlt, sodass sie sich fast nicht bewegen. Diese eingefangenen Ionen werden als Qubits verwendet, und ihr Zustand kann durch die Bestrahlung mit Lasern mit unterschiedlicher Frequenz und Dauer gesteuert werden.	Ionenfallen benötigen zwar keine aufwendigen Kühlkammern wie supraleitende Qubits, allerdings werden Laser zum Kühlen und für die Steuerung der Ionenfallen-Qubits sowie eine Vakuumkammer benötigt. Zudem kann man mit ihnen deutlich langsamer rechnen als mit supraleitenden Qubits.
Topologisch	Von allen Qubit-Ansätzen klingt die Idee hinter den topologischen Qubits am verrücktesten. Sie beruht auf sogenannten Anyonen, auch „Quasiteilchen“ genannt. Quasiteilchen sind eigentlich eine Menge von Teilchen, die sich im Kollektiv gleich verhalten und dadurch Eigenschaften zeigen, als wären sie ein einzelnes Teilchen. Die Besonderheit dieser Anyonen ist, dass sie sich nur im zweidimensionalen Raum bewegen. Bei ihrer Bewegung durch Raum und Zeit formen die Anyonen sogenannte Braids (Zöpfe). Diese Braids sind die Qubits eines topologischen Quantencomputers.	Die Entwicklung topologischer Quantencomputer hinkt den anderen Ansätzen hinterher und muss aufholen.
Elektronenspin	Ein Elektronenspin-Qubit besteht aus einem Elektron, das in einer sogenannten Halbleiternanostruktur gefangen ist. Die zwei Energiezustände des Qubits entsprechen den beiden Einstellungen des Elektronenspins: Man kann sich diese vereinfacht wie zwei unterschiedliche Drehrichtungen vorstellen. Dieser Spin wird dann zum Rechnen im Quantencomputer verwendet.	Fortschritte in der Kontrolle der Elektronen und bei der Messung des Spins sind notwendig, um diese Art von Qubits auf eine wirklich nützliche Weise und in größerer Menge verwenden zu können.
Photonbasiert	Photonen, also Lichtquanten, kommen als Qubits zum Einsatz. Bei definierter Erzeugung können ihre Quanteneigenschaften, wie Polarisation oder Energie, vorgegeben werden. Zum Rechnen werden viele dieser Photonen wellenleiterbasierten optischen Schaltkreisen zugeführt, in denen programmierbare Quantenoperationen ihre Zustände verändern. Der abschließende Messprozess der resultierenden Photonenzustände ist ein wichtiger Bestandteil des photonischen Quantencomputings.	Die Erzeugung einer großen Zahl von Photonen mit absolut gleichen Quanteneigenschaften und absolut gleichzeitiger Verfügbarkeit ist eine große Herausforderung. Zur Durchführung des Messprozesses braucht man auch hier Tieftemperaturtechnologie.

Vorteile	Aktueller Stand
<p>Industrieunternehmen haben viel Expertise in der Chiptechnologie und wie sie diese leistungsfähig in die Anwendung bringen. Auf dieser Expertise bauen sie nun mit den supraleitenden Qubits auf und erzielen konstante Fortschritte.</p>	<p>Momentan liegt die Anzahl an supraleitenden Qubits, die erfolgreich in einem Quantencomputer gesteuert werden können, zwischen 53 und 72.</p>
<p>Die Ionenfallen-Qubits können sehr gut kontrolliert werden und sind im Vergleich sehr stabil. Sie können schon über 15 Minuten im Kohärenzzustand bleiben. Dadurch sind sie natürlich auch weniger fehleranfällig als supraleitende Qubits. Dieser Ansatz wird vor allem von Wissenschaftlern an Universitäten verfolgt, es gibt aber auch einige Firmen, die auf diese Hardwareplattform setzen.</p>	<p>Die höchste Anzahl an Qubits, die kontrolliert werden konnten, liegt derzeit bei 20.</p>
<p>Topologische Qubits sind theoretisch weniger anfällig für Störungen, wenn nicht sogar ganz resistent dagegen. Dadurch benötigt man insgesamt weniger Qubits, die man sonst für die Fehlerkorrektur verwenden würde. Aufgrund dieser Stabilität könnten topologische Quantencomputer längere und komplexere Berechnungen durchführen.</p>	<p>In der Praxis wurde noch kein einziges topologisches Qubit erfolgreich gebildet.</p>
<p>Ein Vorteil von Elektronenspin-Qubits ist, dass ihre Herstellung auf der Halbleitertechnologie beruht, die schon von der heutigen Computerindustrie verwendet wird. Dadurch ist auch eine leichtere Integration in bereits vorhandene Computerbauteile möglich. Elektronenspin-Qubits lassen sich außerdem leicht und schnell steuern. Das kann zum Beispiel durch Änderung des umgebenden Magnetfelds, elektrische Felder oder Photonen passieren.</p>	<p>Bis zum jetzigen Zeitpunkt ist es gelungen, einen funktionierenden 2-Qubit-Quantencomputer herzustellen.</p>
<p>Die Quanteneigenschaften von Photonen sind sehr robust gegen äußere Störungen. Die wellenleiterbasierten optischen Schaltkreise können mit bereits existierenden Chiptechnologien hergestellt und skaliert werden.</p>	<p>Bis zum jetzigen Zeitpunkt wurden Demonstratoren mit bis zu zwanzig Photonen realisiert. Unterschiedliche Start-ups arbeiten daran, erste Quantencomputer in den nächsten Jahren zu bauen. Neuere Konzepte nutzen neben einzelnen Photonen auch komplexere photonische Zustände.</p>

Implikationen für Wirtschaft und Gesellschaft

Dem Quantencomputer wird unter allen Quantentechnologien der zweiten Generation zweifelsohne das größte Potenzial für bahnbrechende Innovationen in Wirtschaft und Gesellschaft zugeschrieben, auch weil viele Verschlüsselungsmethoden, die wir momentan verwenden, durch einen Quantencomputer leicht „geknackt“ werden könnten (siehe auch Kapitel 3.2.2).

Ob der Quantencomputer tatsächlich die gesamte Computerindustrie und unser Leben bahnbrechend verändern oder sich die Erwartungen an ihn nicht erfüllen werden, kann niemand vorhersehen.

„Die interessante Frage ist: Kann der Quantencomputer irgendwann auch ökonomisch einen ‚Quantenmehrwert‘ generieren? Erst dann können wir von einer tatsächlichen ‚Quantenrevolution‘ sprechen.“



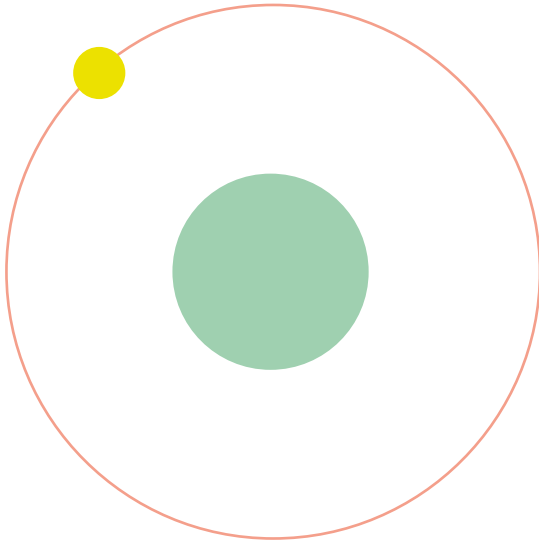
Literaturverzeichnis

- 1** Buhrman, H., Cleve, R., van Dam, W. (2001): zitieren: „**Letter from Einstein to Max Born, 3 March 1947; The Born-Einstein Letters, Correspondence between Albert Einstein and Max and Hedwig Born from 1916 to 1955, Walker, New York, 1971.**“ In: Quantum Entanglement and Communication Complexity. SIAM Journal on Computing, 30(6):1829-1841.
- 2** Tegmark, M., Wheeler, J. A. (2001): **100 Years of Quantum Mysteries.** Scientific American.
- 3** Jaeger, L. (2018): **Die zweite Quantenrevolution.** Vom Spuk im Mikrokosmos zu neuen Supertechnologien. Springer, Berlin.
- 4** Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB) (2012): **PTR/PTB: 125 Jahre metrologische Forschung.** Online verfügbar unter https://www.ptb.de/cms/fileadmin/internet/publikationen/ptb_mitteilungen/mitt2012/Heft2/PTB-Mitteilungen_2012_Heft_2.pdf, zuletzt geprüft am 03.11.2020.
- 5** Britannica: **Learn about Thomas Young's double-slit experiment which contradicted Newton's theory of light.** Online verfügbar unter <https://www.britannica.com/video/179685/experiment-Thomas-Young>, zuletzt geprüft am 21.10.2020.
- 6** Jönsson, C. (1961): **Elektroneninterferenzen an mehreren künstlich hergestellten Feinspalten.** Zeitschrift für Physik, 161(4):454-474.
- 7** Filk, T. (2019): **Zitate zur Quantentheorie.** Albert Einstein über die Quantenmechanik in einem Brief an Cornelius Lanczos, 21. März 1942, Einstein-Archiv 15-294, zitiert nach Einstein, Briefe, Seite 65, zitiert nach Alice Calaprice (Hrsg.): Einstein sagt, Piper-Verlag, München, Zürich 1996, S. 146. In: Filk, T. (Hrsg.), Quantenmechanik (nicht nur) für Lehramtsstudierende. Springer Spektrum, Berlin.
- 8** Konitzer, F. (2014): **Atomuhren.** Welt der Physik. Online verfügbar unter <https://www.weltderphysik.de/gebiet/technik/atomuhren/atomuhren/>, zuletzt geprüft am 21.10.2020.
- 9** Seabaugh, A. (2013): **The Tunneling Transistor.** IEEE Spectrum. Online verfügbar unter <https://spectrum.ieee.org/semiconductors/devices/the-tunneling-transistor>, zuletzt geprüft am 21.10.2020.
- 10** Brooks, M. (2019): **Beyond quantum supremacy: the hunt for useful quantum computers.** Nature, 574(7776):19-21.
- 11** Krieger, S. (2019): **Künstliche Intelligenz und Quantencomputing: Das Beste aus beiden Welten.** Online verfügbar unter <https://www.f05.uni-stuttgart.de/fakultaet/aktuelles/news/Kuenstliche-Intelligenz-und-Quantencomputing-Das-Beste-aus-beiden-Welten-00003/>, zuletzt geprüft am 21.10.2020.
- 12** Feynman, R., Mößbauer, R., Summerer, S. (1990): **Vom Wesen physikalischer Gesetze.** Piper, München.
- 13** Olson, E. (2019): **How quantum computers work.** Electronics 360. Online verfügbar unter <https://electronics360.globalspec.com/article/13553/how-quantum-computers-work>, zuletzt geprüft am 14.09.2020.
- 14** Hui, J. (2019): **QC - How to build a Quantum Computer with Superconducting Circuit?** Medium. Online verfügbar unter <https://jonathan.hui.medium.com/qc-how-to-build-a-quantum-computer-with-superconducting-circuit-4c30b1b296cd>, zuletzt geprüft am 21.10.2020.
- 15** Tavernelli, I. (2018): **Quantum Computing at IBM.** Quantum Computing for High Energy Physics. IBM Research - Zürich. Online verfügbar unter https://indico.cern.ch/event/719844/contributions/3019718/attachments/1749768/2835637/CERN_Tavernelli4_1.pdf, zuletzt geprüft am 05.11.2020.
- 16** Castelvecchi, D. (2017): **The strange topology that is reshaping physics.** Nature News, 547(7663):272.
- 17** Bechtold, A., Rauch, D., Li, F., Simmet, T., Ardel, P.-L., Regler, A., Müller, K., Sinitsyn, N. A., Finley, J. J. (2015): **Three-stage decoherence dynamics of an electron spin qubit in an optically active quantum dot.** Nature Physics, 11(12):1005-1008.
- 18** Popkin, G. (2016): **Scientists are close to building a quantum computer that can beat a conventional one.** Online verfügbar unter <https://www.sciencemag.org/news/2016/12/scientists-are-close-building-quantum-computer-can-beat-conventional-one>, zuletzt geprüft am 02.11.2020.
- 19** Giles, M. (2019): **Explainer: What is quantum communication?** MIT Technology Review. Online verfügbar unter <https://www.technologyreview.com/2019/02/14/103409/what-is-quantum-communications/>, zuletzt geprüft am 21.10.2020.
- 20** Bundesministerium für Bildung und Forschung (2018): **Q.Link.X. Quantenrepeater für eine abhörsichere Kommunikation über große Distanzen. Q.Link.X, Verbundprojekt Quanten-Link-Erweiterung.** Online verfügbar unter <https://www.forschung-it-sicherheit-kommunikationssysteme.de/projekte/q-link-x>, zuletzt geprüft am 05.11.2020.
- 21** Liao, S.-K., Cai, W.-Q., Liu, W.-Y., Zhang, L., Li, Y., Ren, J.-G., Yin, J., Shen, Q., Cao, Y., Li, Z.-P., Li, F.-Z., Chen, X.-W., Sun, L.-H., Jia, J.-J., Wu, J.-C., Jiang, X.-J., Wang, J.-F., Huang, Y.-M., Wang, Q., Zhou, Y.-L., Deng, L., Xi, T., Ma, L., Hu, T., Zhang, Q., Chen, Y.-A., Liu, N.-L., Wang, X.-B., Zhu, Z.-C., Lu, C.-Y., Shu, R., Peng, C.-Z., Wang, J.-Y., Pan, J.-W. (2017): **Satellite-to-ground quantum key distribution.** Nature, 549(7670):43-47.

- 22** Popkin, G. (2017): **China's quantum satellite achieves 'spooky action' at record distance.** Science, American Association for the Advancement of Science (AAAS), Online verfügbar unter <https://www.sciencemag.org/news/2017/06/china-s-quantum-satellite-achieves-spooky-action-record-distance>, zuletzt geprüft am 27.11.2020.
- 23** Zivkovic, A. B., Hristov, N. P., Jerković, D. D., Bogdanović, B. S., Milutinović, J. M. (2019): **Automatic measurement of precision and accuracy from the hit pattern of small arms using electronic target system.** IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 659:12015.
- 24** Mavroeidis, V., Vishi, K., Zych, M., Jøsang, A. (2018): **The Impact of Quantum Computing on Present Cryptography.** International Journal of Advanced Computer Science and Applications, 9(3).
- 25** Bennett, C. H., Brassard, G. (1984): **Quantum Cryptography: Public Key Distribution and Coin Tossing.** Proceedings of IEEE International Conference on Computers, Systems, and Signal Processing.
- 26** Shor, P. W. (1997): **Polynomial-Time Algorithms for Prime Factorization and Discrete Logarithms on a Quantum Computer.** SIAM Journal on Computing, 26(5):1484–1509.
- 27** Martín-López, E., Laing, A., Lawson, T., Alvarez, R., Zhou, X.-Q., O'Brien, J. L. (2012): **Experimental realization of Shor's quantum factoring algorithm using qubit recycling.** Nature Photonics, 6(11):773–776.
- 28** Bundesministerium für Bildung und Forschung (2019): **BMBF-Initiative QuNET baut hochsicheres Quantennetzwerk.** Online verfügbar unter <https://www.bmbf.de/de/bmbfinitiative-qunet-baut-hochsicheres-quantennetzwerk-10126.html>, zuletzt geprüft am 27.11.2020
- 29** Bureau International des Poids et Mesures (2019): **The International System of Units (SI).** 9. Auflage.
- 30** Johnson, A. (2014): **How the Ford Motor Co. Invented the SQUID.** IEEE Spectrum. Online verfügbar unter <https://spectrum.ieee.org/tech-history/silicon-revolution/how-the-ford-motor-co-invented-the-squid>, zuletzt geprüft am 06.11.2020.
- 31** Thiel, L., Rohner, D., Ganzhorn, M., Appel, P., Neu, E., Müller, B., Kleiner, R., Koelle, D., Maletinsky, P. (2016): **Quantitative nanoscale vortex imaging using a cryogenic quantum magnetometer.** Nature nanotechnology, 11(8):677–681.
- 32** The Royal Swedish Academy of Sciences: **The Nobel Prize in Chemistry 2014.** The Royal Swedish Academy of Sciences has decided to award the Nobel Prize in Chemistry for 2014 to Eric Betzig, Stefan W. Hell and William E. Moerner "for the development of super-resolved fluorescence microscopy". Online verfügbar unter <https://www.nobelprize.org/uploads/2018/06/press-26.pdf>, zuletzt geprüft am 27.11.2020
- 33** Fischer, L. (2014): **Bilder von der Grenze zwischen Biologie und Chemie.** Nobelpreise 2014. Spektrum.de. Online verfügbar unter <https://www.spektrum.de/news/nobelpreis-fuer-chemie-2014-geht-an-deutschen-und-zwei-amerikanische-mikroskopieforscher/1311875>, zuletzt geprüft am 19.10.2020.
- 34** Fraunhofer-Institut für Angewandte Optik und Feinmechanik IOF (2019): **Quantenrevolution in der Medizintechnik kündigt sich an.** Quanten-imagingsystem vom Fraunhofer IOF liefert erste vielversprechende Bilder. Online verfügbar unter <https://www.iof.fraunhofer.de/de/presse-medien/pressemitteilungen/2019/Quantenrevolution.html>, zuletzt geprüft am 27.11.2020
- 35** Bundesministerium für Bildung und Forschung (2018): **Quantentechnologien von den Grundlagen zum Markt.** Rahmenprogramm der Bundesregierung. Online verfügbar unter https://www.bmbf.de/upload_filestore/pub/Quantentechnologien.pdf, zuletzt geprüft am 20.10.2020.
- 36** Deutscher Bundestag (2020): **Antwort der Bundesregierung auf die Kleine Anfrage der Abgeordneten Manuel Höferlin, Frank Sitta, Grigoris Aggelidis, weiterer Abgeordneter und der Fraktion der FDP – Drucksache 19/17500. Hochsicheres Quantennetzwerk QuNET.** Online verfügbar unter <https://dip21.bundestag.de/dip21/btd/19/183/1918355.pdf>, zuletzt geprüft am 20.10.2020.
- 37** Fraunhofer-Institut für Angewandte Optik und Feinmechanik IOF (2020): **Wie verschränkte Quanten unsere Kommunikation revolutionieren.** Online verfügbar unter <https://www.fraunhofer.de/de/forschung/aktuelles-aus-der-forschung/quantentechnologie/quantenkommunikation.html>, zuletzt geprüft am 04.11.2020.
- 38** Liao, S.-K., Cai, W.-Q., Handsteiner, J., Liu, B., Yin, J., Zhang, L., Rauch, D., Fink, M., Ren, J.-G., Liu, W.-Y., Li, Y., Shen, Q., Cao, Y., Li, F.-Z., Wang, J.-F., Huang, Y.-M., Deng, L., Xi, T., Ma, L., Hu, T., Li, L., Liu, N.-L., Koidl, F., Wang, P., Chen, Y.-A., Wang, X.-B., Steindorfer, M., Kirchner, G., Lu, C.-Y., Shu, R., Ursin, R., Scheidl, T., Peng, C.-Z., Wang, J.-Y., Zeilinger, A., Pan, J.-W. (2018): **Satellite-Relayed Intercontinental Quantum Network.** Physical review letters, 120(3):30501.
- 39** Kagermann, H., Süssenguth, F., Körner, J., Liepold, A. (2020): **Innovationspotenziale der Quantentechnologien der zweiten Generation** (acatech IMPULS), München.
- 40** Bundesministerium der Finanzen (2020): **Corona-Folgen bekämpfen, Wohlstand sichern, Zukunftsfähigkeit stärken.** Ergebnis Koalitionsausschuss 3. Juni 2020. Online verfügbar unter <https://www.bundesfinanzministerium.de/Content/DE/Standardartikel/Themen/Schlaglichter/Konjunkturpaket/2020-06-03-eckpunkt Papier.pdf>, zuletzt geprüft am 20.10.2020.

Interviewpartnerinnen und Interviewpartner

Die Festlegung der Inhalte und die Arbeit am Text erfolgten durch die auf Seite 62 vorgestellte Projektgruppe. acatech hat für diese Publikation telefonisch oder persönlich insgesamt 28 Experteninterviews mit Vertreterinnen und Vertretern aus Wissenschaft, Wirtschaft, Politik und Gesellschaft geführt. Die Gespräche fanden zwischen Januar und April 2020 statt. Einige ausgewählte Kerngedanken der Befragten sind im Text als anonymisierte Zitate aufgeführt.



Das acatech Präsidium dankt allen Beteiligten sehr herzlich für ihre Teilnahme an den Interviews:

Prof. Dr. Monika Aidelsburger, Gruppenleiterin, Max-Planck-Institut für Quantenoptik/Ludwig-Maximilians-Universität München

Prof. Dr. Stefanie Barz, Institut für Funktionelle Materie und Quantentechnologien, Leitung Quantum Information & Technology, Universität Stuttgart

Prof. Dr. Immanuel Bloch, Direktor, Max-Planck-Institut für Quantenoptik/Leiter Abteilung Quanten-Vielteilchensysteme, Quantum Optics Group, Ludwig-Maximilians-Universität München

Dr. Astrid Elbe, Managing Director, Intel Labs Europe, Intel Deutschland GmbH

Christin Eisenschmid, Managing Director, Vice-President und General Manager, Intel Deutschland GmbH

Prof. Dr. Claudia Felser, Direktorin, Max-Planck-Institut für Chemische Physik fester Stoffe/acatech

Jens Fuhrberg, Government Affairs/Public Affairs, Intel Deutschland GmbH

Verena Fulde, Pressesprecherin/Corporate Blogger, Deutsche Telekom AG

Dr. Marc Geitz, Innovation Architect, Telekom Innovation Laboratories

Dr. Markus Gräfe, Head of Quantum-Enhanced Imaging Group, Fraunhofer-Institut für Angewandte Optik und Feinmechanik/Co-Founder, Quantum Optics Jena GmbH

Prof. Dr. Michael J. Hartmann, Lehrstuhl für Theoretische Physik, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg

Prof. Dr. Stefan Kück, EURAMET TC-PR Chair, Leiter der Abteilung Optik, Physikalisch-Technische Bundesanstalt

Dr. Manfred Lochter, Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik (BSI)

Prof. Dr. Hilbert von Löhneysen, Emeritus, Physikalisches Institut, Karlsruher Institut für Technologie/acatech

Dr. Sebastian Luber, Leitung Quantum iCommunity, Infineon

Prof. Dr. Dieter Meschede, Gruppenleiter Quantentechnologie, Institut für Angewandte Physik, Universität Bonn

Prof. Dr. Stuart Parkin, Director, Max Planck Institute of Microstructure Physics

Dr. Thomas Pöppelmann, Senior Staff Engineer, Infineon Technologies AG

Dr. Heike Riel, IBM Fellow, Department Head Science & Technology, IBM Research

Prof. Dr. Martin Schell, Institutsleiter, Fraunhofer Heinrich-Hertz-Institut

Prof. Dr. Oliver Schmidt, Institutsdirektor, Institute for Integrative Nanosciences, Leibniz-Institut für Festkörper- und Werkstoffforschung Dresden e. V./acatech

Dr. Torsten Siebert, Quantum Technologies Programme, Fraunhofer-Gesellschaft | Think Tank

Dr. Thomas Strohm, Koordinator und Senior Research Scientist für Quantentechnologien, Robert Bosch GmbH

Dr. Michael Totzeck, Fellow, Corporate Research and Technology, Carl Zeiss AG

Prof. Dr. Andreas Tünnermann, Institutsleiter, Fraunhofer-Institut für Angewandte Optik und Feinmechanik/acatech

Prof. Dr. Dr. h. c. Joachim Ullrich, Präsident, Physikalisch-Technische Bundesanstalt/acatech

Dr. Walter Weigel, Vice-President & CSO, European Research Institute, Huawei Technologies

Prof. Dr. Artur Zrenner, Department Physik, Universität Paderborn/acatech



Mitwirkende

Gesamtleitung acatech HORIZONTE:

Prof. Dr.-Ing. Jürgen Gausemeier, Vizepräsident acatech, Seniorprofessor Heinz Nixdorf Institut der Universität Paderborn

Leitung Innovationsforum:

Prof. Dr. Martina Schraudner, Vorstandsmitglied acatech, Leiterin Fraunhofer Center for Responsible Research and Innovation

Projektgruppe Quantentechnologien:

Prof. Dr. Stefanie Barz, Institut für Funktionelle Materie und Quantentechnologien, Leitung Quantum Information & Technology, Universität Stuttgart

Dr. Astrid Elbe, Managing Director, Intel Labs Europe, Intel Deutschland GmbH

Dr. Markus Gräfe, Head of Quantum-Enhanced Imaging Group, Fraunhofer-Institut für Angewandte Optik und Feinmechanik/Co-Founder, Quantum Optics Jena GmbH

Prof. Dr. Stefan Kück, EURAMET TC-PR Chair, Leiter der Abteilung Optik, Physikalisch-Technische Bundesanstalt

Dr. Thomas Pöppelmann, Senior Staff Engineer, Infineon Technologies AG

Dr. Heike Riel, IBM Fellow, Department Head Science & Technology, IBM Research

Dr. Thomas Strohm, Koordinator und Senior Research Scientist für Quantentechnologien, Robert Bosch GmbH

Dr. Michael Totzeck, Fellow, Corporate Research and Technology, Carl Zeiss AG

Prof. Dr. Andreas Tünnermann, Institutsleiter, Fraunhofer-Institut für Angewandte Optik und Feinmechanik/acatech

Prof. Dr. Dr. h. c. Joachim Ullrich, Präsident, Physikalisch-Technische Bundesanstalt/acatech

Prof. Dr. Artur Zrenner, Department Physik, Universität Paderborn/acatech (Leiter Projektgruppe)

Konzeption, Text und Experteninterviews:

Dr. Alexandra Heimisch-Röcker, acatech Geschäftsstelle, HORIZONTE (Autorin)

Christina Müller-Markus, acatech Geschäftsstelle, HORIZONTE (Autorin)

Vivian Würf, acatech Geschäftsstelle, HORIZONTE

Sebastian Grünwald, acatech Geschäftsstelle, HORIZONTE

Mit Unterstützung durch:

Iris Michalik, acatech Geschäftsstelle, HORIZONTE

Annette Wiedemann, acatech Geschäftsstelle, Kommunikation HORIZONTE

acatech -

Deutsche Akademie der Technikwissenschaften

acatech berät Politik und Gesellschaft, unterstützt die innovationspolitische Willensbildung und vertritt die Technikwissenschaften international. Ihren von Bund und Ländern erteilten Beratungsauftrag erfüllt die Akademie unabhängig, wissenschaftsbasiert und gemeinwohlorientiert. acatech verdeutlicht Chancen und Risiken technologischer Entwicklungen und setzt sich dafür ein, dass aus Ideen Innovationen und aus Innovationen Wohlstand, Wohlfahrt und Lebensqualität erwachsen. acatech bringt Wissenschaft und Wirtschaft zusammen. Die Mitglieder der Akademie sind herausragende Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler aus den Ingenieur- und den Naturwissenschaften, der Medizin sowie aus den Geistes- und Sozialwissenschaften. Die Senatorinnen und Senatoren sind Persönlichkeiten aus technologieorientierten Unternehmen und Vereinigungen sowie den großen Wissenschaftsorganisationen. Neben dem acatech FORUM in München als Hauptsitz unterhält acatech Büros in Berlin und Brüssel.

Weitere Informationen unter www.acatech.de.



HERAUSGEBER:

acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften

ADRESSEN STANDORTE**Geschäftsstelle**

Karolinenplatz 4

80333 München

T +49(0)89 / 520309-0

F +49(0)89 / 520309-900

Hauptstadtbüro

Pariser Platz 4a

10117 Berlin

T +49(0)30 / 2063096-0

F +49(0)30 / 2063096-11

Brüssel-Büro

Rue d'Egmont / Egmontstraat 13

B-1000 Brüssel

T +32(0)2 / 2 13 81-80

F +32(0)2 / 2 1381-89

horizonte@acatech.de

<https://www.acatech.de/horizonte>

Empfohlene Zitierweise:

acatech (Hrsg.): Quantentechnologien (acatech HORIZONTE),

München 2020

Redaktionelle Bearbeitung:

Karola Klatt

Lektorat:

Lektorat Berlin

Layout, Satz und Illustrationen:

Joseph & Sebastian – Grafikdesign, München

Druck:

Kern GmbH, Bexbach

Vorstand i. S. v. § 26 BGB:

Prof. Dr.-Ing. Dieter Spath, Karl-Heinz Streibich,

Prof. Dr.-Ing. Jürgen Gausemeier, Prof. Dr. Reinhard F. Hüttl

(Amt ruht derzeit), Dr. Stefan Oschmann, Prof. Dr. Christoph

M. Schmidt, Prof. Dr.-Ing. Thomas Weber, Manfred Rauhmeier,

Prof. Dr. Martina Schraudner

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, der Entnahme von Abbildungen, der Wiedergabe auf fotomechanischem oder ähnlichem Wege und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen bleiben – auch bei nur auszugsweiser Verwendung – vorbehalten.

Copyright © acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften

• 2020

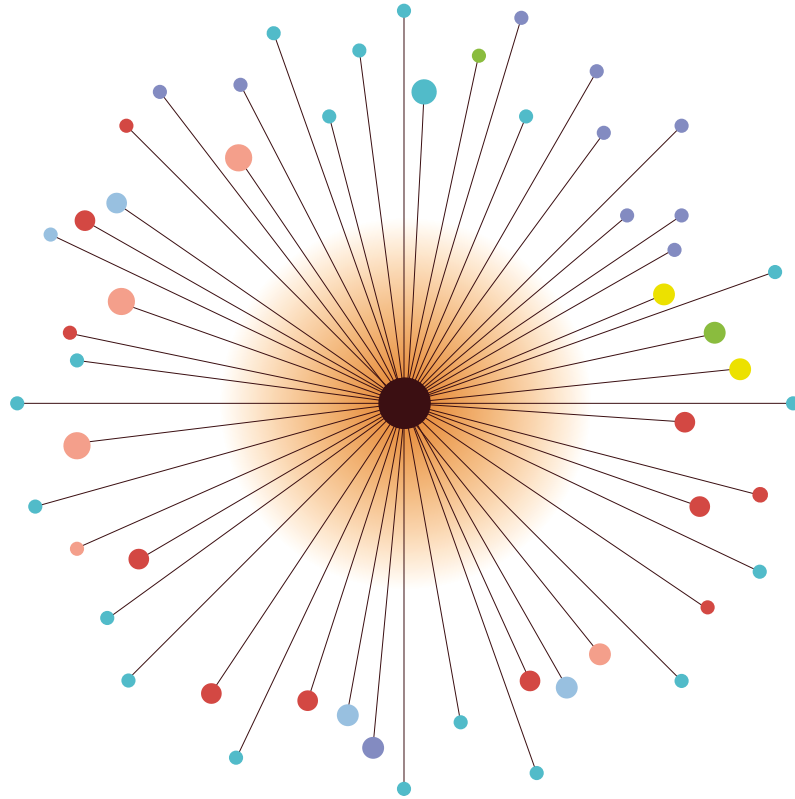
Mehr zu acatech HORIZONTE Quantentechnologien, inklusive der Grafiken, finden Sie auch unter:

<https://www.acatech.de/projekt/acatech-horizonte-quantentechnologien>



München 2020

acatech HORIZONTE ISSN 2625-9605



Über die zweite Generation der Quantentechnologien, zu denen auch der Quantencomputer gehört, kursieren viele Mythen. Auch deshalb, weil die Grundlagen dieser Technologie – die Quanten und deren Manipulation – ferner von unserer Alltagswelt kaum liegen könnten.

Was sind Quanten überhaupt? Was ist momentan technisch möglich? Was ist Hype, und wo liegen die Potenziale der Technologien? Auf diese und weitere Fragen möchte die vorliegende HORIZONTE-Ausgabe Antworten geben.