

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.

3.2 Quantentechnologien der zweiten Generation

Im Unterschied zu Quantentechnologien der ersten Generation sind wir dank technischem Fortschritt heute in der Lage, einzelne Quantensysteme kontrolliert zu manipulieren – mit dem Ziel, bahnbrechende innovative Technologien zu entwickeln. Die folgenden Seiten geben einen ersten Einblick in Funktionsweisen und Potenziale der Quantentechnologien der zweiten Generation.

„Die sogenannte zweite Quantenrevolution ist bisher nur eine Annahme. Wir hoffen, dass sie sich in Zukunft tatsächlich als Revolution erweisen wird.“

3.2.1 Quantencomputing und Quantensimulation

Was uns heute ganz selbstverständlich erscheint – Videos oder Hunderte von Bildern in hoher Qualität auf unserem Smartphone speichern –, war aufgrund der Datenmengen bis vor einigen Jahren undenkbar. Auch in Industrie und Forschung wird heute mit riesigen Datenmengen und immer komplexeren Computerprogrammen gearbeitet. All dies bedarf immer größerer Rechenleistung.

In den vergangenen sechzig Jahren sind Computer immer kleiner und leistungsstärker geworden. Diese Verbesserungen stoßen jedoch irgendwann an physikalische Grenzen. Computern ist gewissermaßen eine Geschwindigkeitsbegrenzung gegeben. Interessanterweise fängt sie dort an, wo die Transistoren auf dem Herzstück von Rechnern, der CPU, so klein werden, dass dort nicht mehr die Prozesse stattfinden können, die dort eigentlich stattfinden sollen, weil diese von Quanteneffekten gestört werden – die hier nicht hilfreich sind.⁹

Worin besteht das Potenzial von Quantencomputern?

Im Vergleich zu klassischen Computern, die immer nur eine Berechnung nach der anderen durchführen können, ermöglichen Quantensysteme durch ihre besonderen Eigenschaften die Verarbeitung mehrerer paralleler Rechenoperationen (für einen genaueren Vergleich zwischen Quanten- und klassischen Computern siehe auch Seite 33 und das Schaubild auf Seite 34).

Das heißt, potenziell können Quantencomputer bestimmte Rechenaufgaben, für die es die passenden Quantenalgorithmen gibt, in extrem kurzer Zeit lösen. Tatsächlich haben die ersten Quantencomputer heute zumindest bereits in Ansätzen bewiesen, dass sie bestimmte Aufgaben in wenigen Minuten bewältigen können, für die ein klassischer

Computer mit sehr großer Rechenleistung Tausende von Jahren gebraucht hätte. Solche direkten Vergleiche von klassischen „Superrechnern“ mit Quantencomputern bei der Lösung sehr spezieller Aufgaben haben in Fachkreisen dazu geführt, eine „Quantenüberlegenheit“¹⁰ festzustellen, die die Medien bereitwillig aufgenommen und verbreitet haben.

Industrieunternehmen und Regierungen versprechen sich daher von Quantencomputern große Fortschritte bei der Lösung spezieller Probleme, zum Beispiel in der Kryptografie (siehe Kapitel 3.2.2) und in der Künstlichen Intelligenz (KI). Die Schnittstelle zwischen KI und Quantencomputing¹¹ steckt zwar noch in den Kinderschuhen, wird aber heute schon eifrig erforscht und ist besonders für die Wirtschaft interessant, etwa wenn es um neue, innovative Anwendungen in der Produktion geht, denn für viele Problemstellungen der KI sind höhere Rechenkapazitäten vonnöten. Auch verspricht man sich große Fortschritte bei der Lösung komplexer Optimierungsprobleme, zum Beispiel die Berechnung der optimalen Route bei der Auslieferung von Waren unter Verwendung verschiedener Lieferanten und Transportmittel. Quantencomputer arbeiten hier potenziell nicht nur erheblich schneller, sondern können zukünftig komplexe Aufgaben lösen, die heute noch als unlösbar gelten.

Vor welchen Herausforderungen stehen Quantencomputer?

Derzeit ist der Nutzen von Quantencomputern in der Anwendung noch sehr begrenzt. Die Rechenbasis eines Quantencomputers sind sogenannte Quantenbits, auch „Qubits“ genannt. Es gibt viele unterschiedliche Herstellungsmethoden und Arten von Qubits; hier spricht man auch von unterschiedlichen „Plattformen“ (zu den verschiedenen Technologien, Qubits zu erzeugen, siehe auch die Tabelle „Verschiedene Arten von Qubits“ auf Seite 38). Derzeit wird viel dazu geforscht, und momentan sind die Technologien der Supraleiter und der Ionenfallen führend. Bisher hat sich jedoch noch keine dieser Plattformen wirklich durchgesetzt.

Qubits befinden sich im Zustand der Superposition und können miteinander verschränkt sein. Diese Eigenschaf-

ten führen dazu, dass ein Quantencomputer tatsächlich eine Rechenoperation gleichzeitig für mehrere Zahlen ausführen kann. Wie Quanten und Quantenobjekte reagieren auch die Qubits extrem sensibel auf äußere Einflüsse. Störungen und Vibrationen aus der Umgebung führen sozusagen zu einer „Messung“ (ohne dass wir das Ergebnis kennen), die Superposition und Verschränkung zerstören (siehe Kapitel 2.4). Dann verhält sich ein Qubit wieder ganz normal nach den Regeln der klassischen Physik; der Quantencomputer funktioniert nicht mehr beziehungsweise gibt falsche Ergebnisse aus.

Die Zeit, in der Berechnungen durchgeführt werden können, ist die Kohärenzzeit. Im sogenannten supraleitenden Quantencomputer sind das aktuell nur sehr, sehr wenige Sekundenbruchteile, um die 0,1 Millisekunden. Zwar finden während dieser kurzen Kohärenzzeit einige Hundert Rechenoperationen statt; sie reicht jedoch noch nicht für eine umfassende Fehlerkorrektur der Rechenoperationen. Die Verlängerung der Kohärenzzeit ist deshalb eine der größten Herausforderungen für die Zukunft.

Damit der supraleitende Quantencomputer überhaupt arbeiten kann, muss man den Chip, auf dem sich die Qubits befinden, isolieren und kühlen. Nur so kann selbst die sehr kurze Kohärenzzeit erreicht und können die Qubits für die Berechnung startklar gemacht werden. Deshalb muss diese Art von Quantencomputern in einem abgeschotteten Raum stehen; sie benötigen außerdem eine große Kühlapparatur. Bevor sie ihr volles Potenzial entfalten können, müssen zudem Methoden entwickelt werden, mit deren Hilfe bis zu Tausende, wenn nicht sogar Millionen Qubits verlässlich kontrolliert werden können. Dies ist bisher nur für eine Qubit-Anzahl von circa 50 bis 70 wirklich möglich.

Im Quantencomputer, der mit den sogenannten Ionenfallen arbeitet, sind dies aktuell nur etwa zwanzig Qubits. Er hat jedoch den Vorteil, dass er bei normaler Raumtemperatur arbeiten kann, wobei dafür im Gegenzug viele Laser zum Fangen und Kühlen der Ionen sowie eine Vakuumkammer eingesetzt werden müssen. Auch die Kohärenzzeit ist mit etwa 15 Minuten schon sehr lang, was ihn weniger fehleranfällig als den supraleitenden Quantencomputer macht.

Wer sagt eigentlich, dass ...

... der Quantencomputer ein Allzweckgerät sein muss, das alle möglichen Arten von Rechenoperationen löst? Einem im Jahr 2019 unter großem medialen Interesse vorgestellten Quantencomputer wird beispielsweise vorgeworfen, dass er nur auf dieses eine, spezielle Rechenproblem optimiert worden sei, das er äußerst schnell löste.

Tatsächlich werden heute auch klassische Superrechner auf bestimmte Rechenoperationen optimiert, die sie dann eben besonders schnell lösen – beispielsweise auf die Bereitstellung individueller Daten in extrem kurzer Zeit. Ein Beispiel dafür ist die Erstellung von Webseiten „on the fly“ – also eine Personalisierung in dem Augenblick, in dem der Nutzer oder die Nutzerin auf die Seite kommt. Eine solche Personalisierung ist genau genommen immer dieselbe Art von Rechenoperation, jedoch tauchen dabei unendlich viele Spielarten auf.

Das ist keine Aufgabe, die ein Quantencomputer übernehmen könnte, aber entsprechend kann auch der Quantencomputer auf einen Algorithmus optimiert werden, zum Beispiel auf den Shor-Algorithmus, der das mathematische Problem der Primfaktorzerlegung löst (siehe Seite 44). Hier stößt wiederum der klassische Superrechner an seine Grenzen.

Die Potenziale der Quantencomputer im Allgemeinen sind groß, wenn sie eines Tages ausgeschöpft werden können: Kommt bei einem klassischen Computer ein einziges Bit dazu, verändert sich die Rechenleistung nur minimal. Bei einem Quantencomputer hingegen verdoppelt sich die Rechenleistung mit jedem zusätzlichen Qubit. Wichtig zu wissen ist dabei aber auch, dass es nicht rein auf die Anzahl der Qubits ankommt. Es geht beispielsweise auch um eine bessere Fehlerkorrektur (die jedoch auch zahlreiche Qubits benötigt), höhere Messgenauigkeit und längere Kohärenzzeit, damit ein Quantencomputer schnell und zuverlässig rechnen kann. Teilweise wird von Expertinnen und Experten dementsprechend bei der Leistungsfähigkeit nicht mehr nur von der Anzahl der Qubits gesprochen, sondern vom „Quantenvolumen“, das – auch, aber nicht ausschließlich – mit der Anzahl der Qubits wächst.



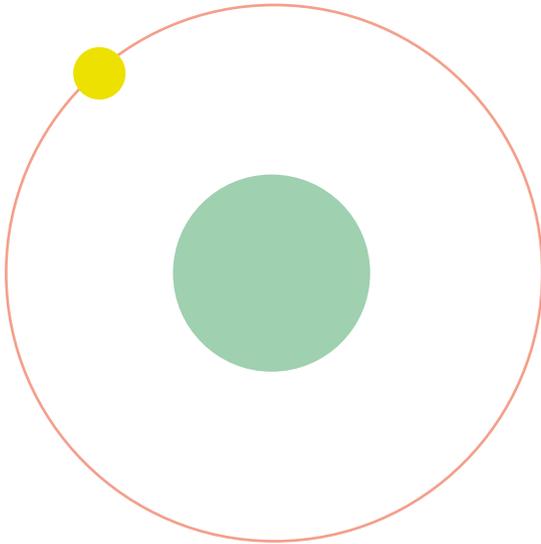
Literaturverzeichnis

- 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

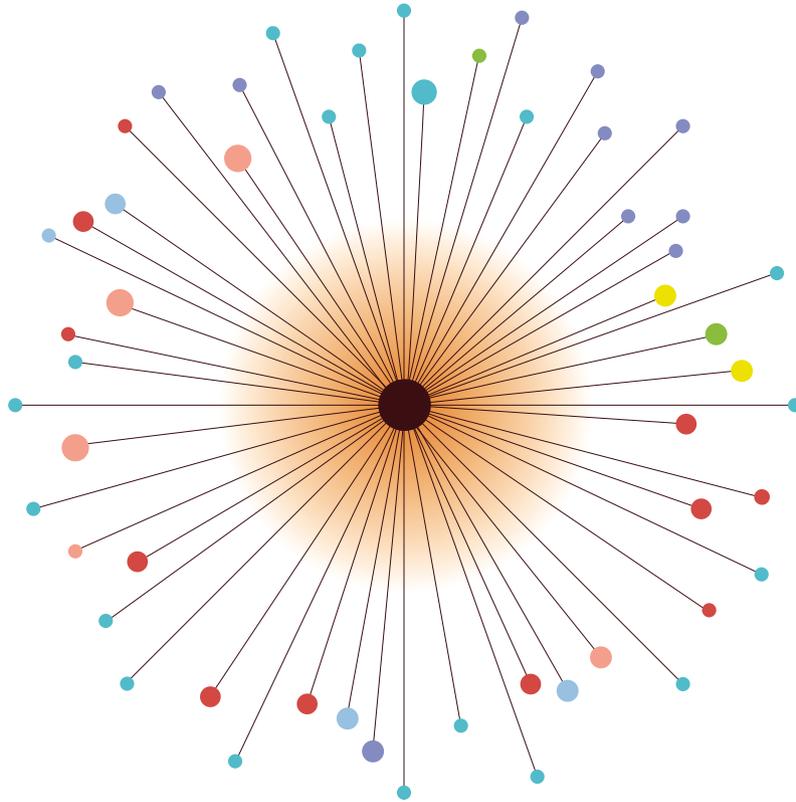
Mehr zu acatech HORIZONTE Quantentechnologien, inklusive der Grafiken, finden Sie auch unter:

<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.