

/// Das Rennen läuft: Der Kampf um den Quantencomputer

DAS SUPERHIRN

SIEGFRIED BALLEIS /// Gegenwärtig kämpfen nicht nur die Großmächte USA und China um die Vorherrschaft bei den Quantencomputern. Auch die Europäische Union und einzelne Nationalstaaten unternehmen enorme Anstrengungen, der neuen Technologie zum Durchbruch zu verhelfen.

Ende Oktober 2019 hielt die Wissenschaftswelt den Atem an. Die US-Raumfahrtbehörde NASA hatte versehentlich einen Artikel des Wissenschaftsmagazins Nature auf ihre Webseite gestellt, in dem stand, dass der Quantenchip Sycamore von Google „in 200 Sekunden eine Berechnung durchführen könne, für die der schnellste Supercomputer der Welt 10.000 Jahre gebraucht hätte“.¹ Spätestens seit dieser Meldung hat eine intensive Diskussion darüber eingesetzt, dass unsere Welt offensichtlich nicht aus Nullen und Einsen, sondern aus Quan-

ten besteht und auch bei dem Stichwort Quantencomputer gehen die Meinungen weit auseinander. Einige sehen darin eine revolutionäre Veränderung der Rechnerwelt, die nahezu alle Lebensbereiche von der Wirtschaft über Naturwissenschaft bis hin zu Militärpolitik umfasst, andere zweifeln, ob diese Technik tatsächlich jemals zu einem breiten Einsatz kommen wird.

Fakt ist, dass funktionsfähige Quantencomputer jedes Produkt, jeden Prozess und jede Dienstleistung auf diesem Planeten grundlegend verändern wer-



Quelle: IBM Research

Mit dem Quantencomputer wie hier dem IBM Q auf der Consumer Electronics Show (CES) 2020 in Las Vegas könnte man einen Quantensprung in das Digitale Zeitalter machen.

den. Der Wettbewerbsvorteil zwischen einem Unternehmen mit und ohne Quantencomputer ist fundamental. Eine Volkswirtschaft ohne Zugang zu Quantencomputern wird keine Rolle mehr in dieser Welt spielen. Dies gilt übrigens auch für gesellschaftspolitische und militärische Fragestellungen, da Quantencomputer das Feld der Künstlichen Intelligenz (KI) fundamental verändern werden. Diese zukünftige Entwicklung wirft bereits heute ihre Schatten voraus. So wurden von der US-Regierung schon Exportkontrollen für wichtige Schlüsselkomponenten für Europa in Kraft gesetzt.

Die Quantenwelt

Die Idee der Quantentechnologie besteht darin, dass wir die Welt besser verstehen, wenn wir uns der Quantensysteme bedienen. Das ist auch nicht weiter verwunderlich, denn auf der Ebene der Atome und ihrer Bestandteile, die sich in einer Größenordnung von 10^{15} abspielt, gelten die Regeln der Quantenmechanik. Der Inhaber des Lehrstuhls für Theoretische Physik an der Friedrich-Alexander-Universität, Erlangen-Nürnberg, Prof. Michael J. Hartmann, der an der Entwicklung des Google-Computers mitgewirkt hat und Co-Autor des erwähnten Nature-Artikels ist, hat die Unterscheidung zwischen Quantencomputern und herkömmlichen Rechnern so definiert, dass im Gegensatz zu den klassischen Computern, die die Informationen als Bitfolgen von Nullen und Einsen speichern, ein Quantencomputer diese in Quantenzuständen speichert. Die elementare Verarbeitungseinheit, das Quantenbit oder Qubit kann eben nicht nur Werte von Null oder Eins annehmen, sondern sich für eine bestimmte Zeitspanne, die so genannte Kohä-

Die QUANTENTECHNOLOGIE lässt uns die Welt besser verstehen.

renzzeit, gleichzeitig in beiden Zuständen befinden. Der Quantencomputer ist dem normalen überlegen, da die Rechenleistung sich mit jedem Qubit verdoppelt und mit dieser exponentiellen Zunahme kann ein Quantenchip mit 300 miteinander verschränkten Qubits mehr Zustände annehmen, als es Atome im Universum gibt.²

Es existieren heute sehr viele wissenschaftliche, aber auch praktische Herausforderungen, die mit der Kapazität gegenwärtig existierender Supercomputer kaum oder überhaupt nicht zu lösen sind. Dazu gehört beispielsweise die Analyse und vor allem die Prognose von Finanzmärkten, aber auch die Optimierung von Fahrtrouten und Verkehrssystemen mit beliebig vielen Teilnehmern. Ähnliches gilt für Verschlüsselungstechnologien, für die enorme Datenmengen und ein gigantischer Einsatz von Energie erforderlich sind. Der CEO von Google, Sundar Pichai, hat in einem Interview mit der Technology Review im Dezember 2019 darauf hingewiesen, dass Künstliche Intelligenz und Quantencomputing eine mächtige Symbiose eingehen werden. Er vertritt die Auffassung, dass KI die Quanteninformatik beschleunigen kann und so die hartnäckigsten Probleme wie beispielsweise der Klimawandel lösbar werden.³

Die Quantentechnologie ist jedoch keine brandneue Erfindung. Im täglichen Leben begegnen wir ihr bereits im

Bereich der medizinischen Bildgebung oder auch bei der Anwendung von Laserlicht. Die Quantentechnologien der zweiten Generation ermöglichen mittlerweile aber viel genauere Messgeräte und eine stark verbesserte Sicherheit bei der Datenkommunikation. Diese Technologien werden enorme Auswirkungen auf Wirtschaft und Gesellschaft wie z. B. in der Sicherheitspolitik haben.

Wie funktioniert ein Quantencomputer?

Quantencomputer funktionieren prinzipiell anders als herkömmliche digitale Rechner. Im Unterschied zu deren Bits sind die kleinsten Recheneinheiten der Quantencomputer, die Quantum Bits (Qubits), in der Lage, sich untereinander zu verbinden und damit einen wesentlich komplexeren Gesamtzustand anzunehmen. Diese Verschränkung zu einem Gesamtzustand ist eine einzigartige Eigenschaft von Quantencomputern, die das komplexe wechselseitige Zusammenspiel herkömmlicher Rechner überflüssig macht. Dies ist bei einer extrem schnellen Suche in einer außerordent-

unter extrem hohem Zeitdruck Diagnoseverfahren und einen Impfstoff zu entwickeln. Dazu hat sich das Forschungszentrum Jülich gemeinsam mit anderen internationalen Forschungseinrichtungen und Unternehmen einer Initiative des kanadischen Quantencomputer Herstellers D-Wave Systems Inc. angeschlossen und den Nutzern freien Zugang zu Quantencomputer-Systemen gewährt. Potenzielle Anwendungen sind dabei die Analyse neuer Diagnosemethoden in der Medizin, die hochaufgelöste Modellierung der Ausbreitung des Virus sowie eine Optimierung der Logistik, beispielsweise von Versorgungsketten und Abläufen in Krankenhäusern.⁵

Was versteht man unter Quantenkommunikation?

Die neue Technologie kommt auch in der Quantenkommunikation zur Anwendung. Daran arbeitet beispielsweise das Max-Planck-Institut für die Physik des Lichts in Erlangen unter Federführung des Institutsgründers Professor Leuchs. Dabei werden die verschränkten Quantenzustände zum Austausch von Schlüsseln genutzt, indem man Photonen an zwei weit voneinander entfernte Orte sendet. Da sich unbekannte Quantenzustände nicht kopieren oder störungsfrei vermessen lassen, werden Fehler in der Übertragung festgestellt und können so einen Lauschangriff aufdecken.⁶ Diese Quantenkryptographie oder Quantenschlüsselverteilung (QKD Quantum Key Distribution) ist schon länger kommerziell verfügbar und wird insbesondere von Banken oder Regierungen genutzt. Allerdings lässt sich diese Technik nur bei Punkt-zu-Punkt-Verbindungen und Distanzen von weniger als 100 km realisieren. In-

Quantencomputer arbeiten sehr viel SCHNELLER als herkömmliche.

lich großen Datenmenge oder deren Optimierung, z. B. bei logistischen Systemen wie Verkehrsnetzen, von großem Vorteil.⁴

Eine große Herausforderung ist ganz aktuell in der derzeitigen Corona-Krise,

teressant ist dabei die Frage, ob diese Technologie auch auf bereits zurückliegende Kommunikation anwendbar sein wird.⁷

Was bedeutet quantenbasierte Messtechnik?

Quantencomputer können auch in der Messtechnik eingesetzt werden. Es lassen sich damit physikalische Größen wie Druck, Temperatur, Position, Zeit, Geschwindigkeit, Beschleunigung, elektrische und magnetische Felder oder die Gravitation extrem präzise messen. Da-

Die Quantentechnologie ermöglicht eine extrem PRÄZISE Messung.

durch erzielt man eine wesentlich höhere optische Auflösung. Zahlreiche Anwendungsfälle ergeben sich sowohl im Bereich der industriellen Präzisionsmesstechnik, der medizinischen Diagnostik und der Erdbeobachtung als auch in der Satellitennavigation für den Luft-, See-, Schienen- und Straßenverkehr.⁸

Anwendungsfelder

Wo können Quantencomputer eingesetzt werden? Dies hat Prof. Frank Wilhelm-Mauch bei einer Anhörung im Deutschen Bundestag im Ausschuss Digitale Agenda aufgezeigt:⁹

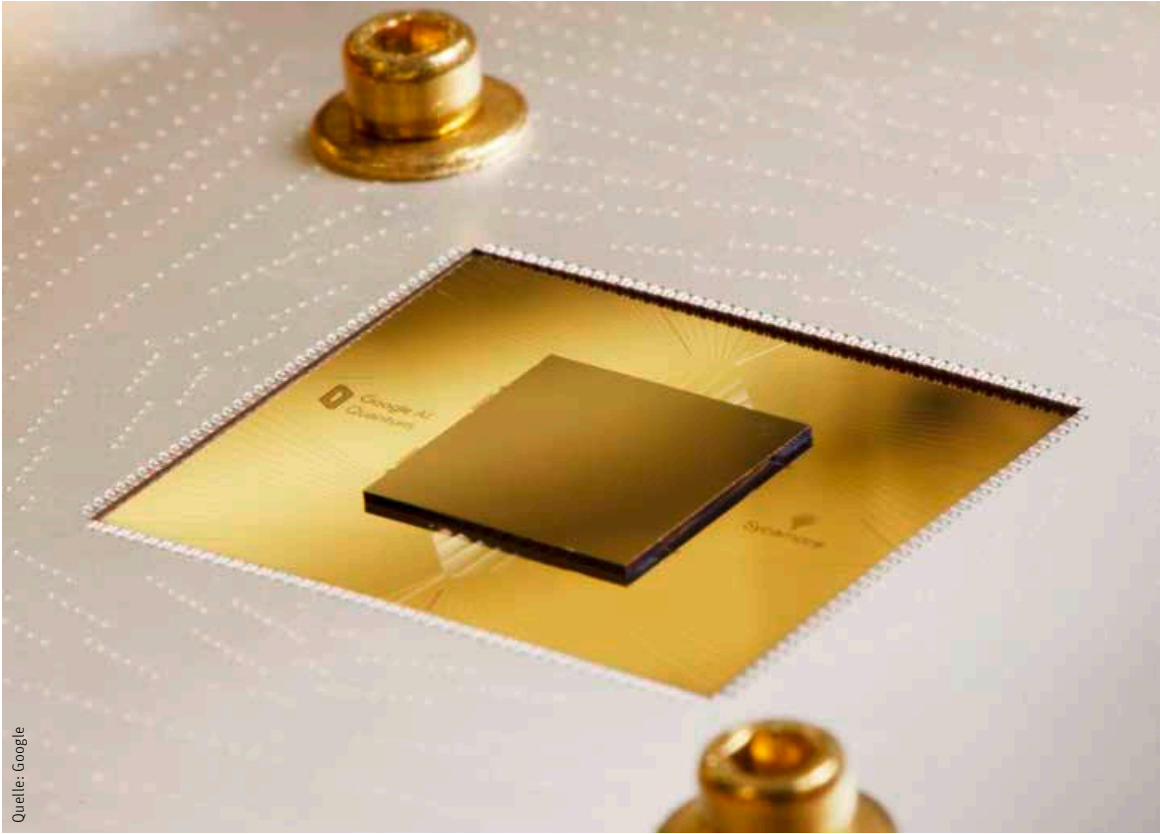
- **Energieforschung:** Entwicklung von energiereduzierten Prozessen (Quantenvorteil mathematisch bewiesen);

- **Verkehr:** Planung von Verkehrsfluss (Quantenvorteil nicht quantifiziert), Schaltungsfehlersuche in Luft- und Raumfahrtsystemen;
- **Medizin/Pharmazie:** Entwicklung von Wirkstoffen (Quantenvorteil mathematisch bewiesen);
- **Industrie 4.0:** schnelles Lösen von Gleichungssystemen im Hintergrund (Quantenvorteil nicht quantifiziert);
- **Verteidigung:** Crypt-Analyse (Quantenvorteil mathematisch bewiesen);
- **Maschinenlernen:** schnelles Trainieren (Quantenvorteil bewiesen, aber extreme Hardwareanforderungen);
- **Blockchain:** sichere komplexitätsbasierte Verschlüsselung.¹⁰

Wilhelm-Mauch weist aber auch auf die aktuell noch massiv bestehende Fehleranfälligkeit von Quantencomputern hin. Fehlerraten von 1 zu 1.000 seien durchaus gängig und 1 zu 1.000.000 das beste bisher Erreichbare. Bei 1 MHz Taktfrequenz tritt derzeit noch jede Sekunde ein Fehler auf und es bedarf weiterer enormer Anstrengungen, um die Rate zu verringern.

Der Vorsitzende des Verwaltungsrates des finnischen Startup-Unternehmens IQM, Axel Thierauf, sieht weitere Anwendungsmöglichkeiten:

- **Fakturierung von Primzahlen:** Der Mathematiker Shor hat dazu einen neuen Algorithmus vorgeschlagen, mit dessen Hilfe ein Quantencomputer sehr schnell eine aktuelle Verschlüsselung knacken könnte. Der derzeit schnellste Rechner Summit IBM würde für eine RSA (asymmetrisches kryptographisches Verfahren) 2048 Faktorisierung ca. 300 Trillionen Jahre brauchen, der erste funktionsfähige Quantencomputer dage-



Quelle: Google

Der neueste Google Quantum Computing Processor Sycamore.

gen ca. 10 Sekunden. Das stellt für die Supermächte dieser Welt eine ernste Bedrohung dar. IAPRA, die IT-Abteilung der amerikanischen Geheimdienste, investiert daher seit Jahren massiv auch in europäische Hochschulen, um hier stets auf Augenhöhe zu sein und die amerikanische Regierung hat kürzlich den Export von Schlüsselkomponenten wie bestimmter Hardware nach Europa untersagt. Mit klassischen Computern wäre es aber momentan noch astronomisch zeitaufwändig, die Entschlüsselung auszurechnen und es gibt auch quantensichere Krypto-

graphieverfahren wie die Gitterkryptographie.

- **Simulation von nicht-linearen Gleichungssystemen:** Hierbei wird eine bestimmte Eigenschaft der noch sehr langsamen Quantencomputer der ersten Generation verwendet, um in riesigen Datenmengen ultraschnell Lösungsansätze zu finden.¹¹
- **Künstliche Intelligenz (KI):** Algorithmen brauchen zum Lernen sehr große Datenmengen, welche sehr schnelle Computer mit großen Speichern erfordern. Quantencomputer sind unglaublich schnell und viel leistungsfähiger.¹²

Kritische Stimmen

Bei aller Euphorie über die außergewöhnlichen Möglichkeiten, die sich durch Quantencomputer eröffnen, gibt es auch viele kritische Stimmen. So warnt Sabine Hossenfelder in ihrem Beitrag „Die Quantencomputer-Illusion“ vor zu großen Erwartungen. Sie weist auf technische Schwierigkeiten hin und moniert, dass schon kleinste Störungen die Berechnung unmöglich machen können, so z. B., wenn Luftmoleküle an die Qubits stoßen oder Atome temperaturbedingt wackeln. Qubits könne man ja nicht beliebig in Kühlboxen stapeln, da man sie ansteuern müsse und die dazu nötigen Kabel auch Wärme transportieren. Für Quantencomputer sind auch winzige supraleitende Stromkreise erforderlich, die in zwei verschiedene Richtungen zirkulieren.¹³

Diese Skepsis wird auch von Christian J. Meyer in seinem Beitrag für die Neue Zürcher Zeitung geteilt. Er führt aus, ein Qubit sei empfindlicher als jedes Soufflé und reagiere auf den leisesten Umwelteinfluss. Schon der Stoß eines Luftmoleküls oder die Einstrahlung von Wärme könne aus dem Überlage-

zen. Außerdem würden die Qubits ihren Überlagerungszustand meist nur Bruchteile von Sekunden halten, sodass ein Algorithmus, der Minuten andauert, so nicht zu Ende geführt werden könne.¹⁴

Quantencomputer und die Politik

Angesichts der enormen Bedeutung der Quantentechnologie liegt es nahe, dass sich auch die Politik intensiv um dieses Thema kümmert. Insbesondere die Großmächte China und USA treiben mit enormen Mitteln die Entwicklung von Quantencomputern voran. Aber auch Japan, Singapur, Kanada und das Vereinigte Königreich fördern Forschung und Entwicklung dieser Technologie mit nationalen Programmen. Weltweit ist mittlerweile ein regelrechter Wettbewerb entbrannt.

Deutschland

Die Bundesregierung hat bereits im September 2018 das Rahmenprogramm „Quantentechnologie – von den Grundlagen zum Markt“ vorgelegt. Im September 2019 kündigte dann der Bayerische Staatsminister für Wirtschaft, Landesentwicklung und Energie, Hubert Aiwanger, an, dass der erste Quantencomputer außerhalb der USA in Deutschland stehen werde. Er erklärte, dass die Fraunhofer-Gesellschaft für angewandte Forschung dabei mit dem amerikanischen IT-Konzern IBM kooperieren werde, und der Standort Bayern dafür eine gute Kombination von Infrastruktur, Spitzenforschung und leistungsfähiger Industrie biete.¹⁵

Auch der Bayerische Ministerpräsident Markus Söder hat in seiner Regierungserklärung im Oktober 2019 angekündigt, dass der Freistaat Bayern für die weitere Entwicklung der Quanten-

Die neue Technologie ist noch STÖRANFÄLLIG.

rungszustand eines Quantenbits einen klassischen Zustand machen. Deshalb müssten die Forscher ihre Qubits aufwändig durch Vakuum, sehr tiefe Temperaturen und Abschirmungen schüt-

computer als Supercomputer der Zukunft 70 Mio. Euro investieren werde. Dabei stellte er klar, dass das Leibniz-Rechenzentrum in Garching der Dreh- und Angelpunkt dafür sei und ergänzend mit dem Fraunhofer-Projektzentrum Quantencomputing und einem neuen Institut an der Universität Würzburg zusammenarbeiten werde.¹⁶ Auch das Helmholtz-Quantum-Center mit einem Investitionsvolumen von 50 Mio. Euro am Forschungszentrum Jülich und das Nutzerzentrum Junique am Jülich Supercomputing Centre (JSC) sind auf dem Gebiet tätig.

DEUTSCHLAND unterstützt die Forschung zum Quantencomputing mit Fördermitteln und Einrichtungen.

Anfang 2020 stellte Bundesbildungsministerin Anja Karliczek eine neue Initiative des Bildungs- und Forschungsministeriums (BMBF) zum Quantencomputing vor. Dafür stehen 300 Mio. Euro zur Verfügung.¹⁷

Einen kräftigen Schub hat das Thema Förderung der Quantentechnologie kürzlich noch durch das Konjunkturprogramm der Bundesregierung „Corona-Folgen bekämpfen, Wohlstand sichern Zukunftsfähigkeit stärken“ im Juni 2020 erhalten. Dort wird festgelegt, dass die Bundesrepublik Deutschland 2 Mrd. Euro investieren will, um im Bereich der Quantentechnologien an der Weltspitze konkurrenzfähig zu werden. Wörtlich heißt es dort dazu: „Da-

bei setzen wir auf die enge Verbindung von Exzellenz in der Forschung mit dem Transfer in die Produktentwicklung, auf eine substanzielle Förderung von Unternehmens- und Start-up-Gründungen sowie auf gemeinsame neue Spitzencluster aus Wissenschaft und Industrie. Der Bund wird unmittelbar den Auftrag zum Bau von mindestens zwei Quantencomputern an geeignete Konsortien vergeben“.¹⁸

Europäische Union

Wenngleich China und die USA Milliardenbeträge in diesen Bereich investieren, kann mit Stolz festgestellt werden, dass weltweit der größere Teil der Veröffentlichungen von Forschern aus der Europäischen Union stammt. Insbesondere die Bundesrepublik Deutschland verfügt hierbei durch Trägerorganisationen wie der Deutschen Forschungsgemeinschaft, der Max-Planck-Gesellschaft, der Helmholtz-Gemeinschaft, der Fraunhofer-Gesellschaft, der Leibniz-Gemeinschaft und zahlreicher Universitäten über eine herausragende Expertise.¹⁹

2017 hat die EU-Kommission ihre Flagship-Initiative zur Quantentechnologie „Quantum Manifesto“ vorgestellt. Im Herbst 2019 fand unter der finnischen Ratspräsidentschaft eine große Konferenz in Helsinki dazu statt.²⁰ Dort wurde manifestiert, dass in dieser zweiten Quantenrevolution Europa mit den massiven Entwicklungen in den USA und in China Schritt halten soll. Prof. Jürgen Mlynek, Vorsitzender des Quantum Flagship Advisory Boards, stellte klar, dass in diesem Wettbewerb nationale Anstrengungen nicht ausreichen würden, sondern die Europäische Union insgesamt zusammenarbeiten müsse. Das europäische Flagship-Programm, das im Oktober 2018 in der

Hofburg in Wien gestartet wurde, umfasst insgesamt über 2.000 Forscher aus den Bereichen Wissenschaft und Industrie und ist auf zehn Jahre angelegt. Es wird mit 1 Mrd. Euro gefördert. Die wichtigsten Ziele dieses Projektes bestehen darin, Technologien und Forschungseinrichtungen in Europa zusammen zu bringen und Forschungen für marktreife Produkte zu entwickeln. Der Plan ist, die weltweite Marktführerschaft in der Quantentechnologie zu erlangen.²¹

Angesichts dieser klaren Strategie der Europäischen Union hat es überrascht, dass IBM und die Fraunhofer-Gesellschaft im September 2019 eine Kooperation bekannt gaben, die über zwei Jahre laufen soll. Dabei kündigte IBM an, einen Quantencomputer in einer seiner Niederlassungen in Deutschland zu installieren und der Fraunhofer-Gesellschaft entsprechende Rechenkapazität zur Verfügung zu stellen.²²

Fazit

Quantencomputer werden in der Tat revolutionäre Entwicklungen in nahezu allen Wissenschaftsbereichen auslösen. Die Prognosen, wann dieser Zeitpunkt erreicht sein wird, reichen von zehn Jahren bis zu mehreren Jahrzehnten. Unstrittig ist, dass es außerordentlich sinnvoll ist, dass die Europäische Union in diesem harten weltweiten Wettbewerb abgestimmt und koordiniert zusam-

menarbeitet. Nationale Alleingänge haben bei einer derartigen herausfordernden Entwicklung keinen Platz. Ideal wäre es, eine europäische Initiative zur wirtschaftlichen Interessenvereinigung wie beim AIRBUS-Projekt zu starten. Hier müsste eine konsequente Kooperation und Unterstützung seitens der europäischen Industrie organisiert werden. Bekanntermaßen wollen Unternehmen wie BMW, VW, Bosch usw. nicht von amerikanischen Quantencomputern abhängig sein. Es ist also höchste Zeit zum Handeln. ///



Foto: Glasow

/// PROF. DR. SIEGFRIED BALLEIS

ist Alt-OB der Stadt Erlangen, Vorsitzender des Universitätsbunds der FAU-Erlangen/Nürnberg sowie Honorarprofessor am dortigen Lehrstuhl für Politische Wissenschaften.

Anmerkungen

¹ Schmieder, Jürgen: Zukunftsmaschine – Er braucht Temperaturen niedriger als im All, und muss vor allen äußeren Einflüssen geschützt werden – aber er könnte die Welt verändern: Googles Quantencomputer erreicht einen wichtigen Meilenstein, in: Süddeutsche Zeitung, 25.10.2019.

² FAU-Professor an Googles Quantencomputer beteiligt, Pressemitteilung der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg vom 23.10.2019, <https://www.fau.de/2019/10/news/nachgefragt/10-000-jahre-in-drei-minuten/> Stand: 8.5.2020.

³ Lichfield, Gideon: Mit Quantencomputern können wir die Natur besser verstehen, in: Technology Review, Dezember 2019.

⁴ Bundesministerium für Bildung und Forschung: Quantentechnologien – von den Grundlagen zum Markt, Rahmenprogramm der Bundesregierung, Berlin September 2018, <https://www.bundesregierung.de/breg-de/service/publikationen/quantentechnologien-von-den-grundlagen-zum-markt-1521010>, Stand: 8.5.2020.

Eine **EUROPÄISCHE** Zusammenarbeit ist nötig und sinnvoll.

- ⁵ <https://www.dwavesys.com/press-releases/d-wave-provides-free-quantum-cloud-access-global-response-covid-19>, Stand: 8.5.2020
- ⁶ <https://www.bmbf.de/de/sicher-kommunizieren-mit-quantentechnologie-8682.html>, Stand: 8.5.2020.
- ⁷ <https://www.faz.net/aktuell/rhein-main/forscher-gegen-hackerangriffe-mit-supercomputern-16551588.html?premium=0xe274d5518950b49a5c18b18ed5b276a5&GEPc=s5>, Stand: 8.5.2020.
- ⁸ Bundesministerium für Bildung und Forschung: Quantentechnologien – von den Grundlagen zum Markt, <https://www.bundesregierung.de/breg-de/service/publikationen/quantentechnologien-von-den-grundlagen-zum-markt-1521010>, Stand: 8.5.2020.
- ⁹ Wilhelm-Mauch, Frank: Quantencomputer und Quantenüberlegenheit, in: BSI-Magazin 1/2020.
- ¹⁰ <https://www.bundestag.de/resource/blob/557952/9bbe5fbf00627b43ba08137f38e52d25/a-drs--19-23-09-data.pdf>, Stand: 8.5.2020.
- ¹¹ <https://www.auto-motor-und-sport.de/news/vw-d-wave-quantencomputer-verkehrssystem/>
- ¹² <https://www.handelsblatt.com/meinung/gastbeitraege/gastkommentar-europa-braucht-einen-eigenen-quantencomputer-tut-dafuer-aber-nicht-genug/25219340.html>, Stand: 8.5.2020.
- ¹³ Hossenfelder, Sabine: Die Quantencomputer-Illusion, in: Bild der Wissenschaft, 12/2019.
- ¹⁴ Meier, Christian J.: Was können Quantencomputer – und wann ist mit ihnen zu rechnen?, in: Neue Zürcher Zeitung, 25.10.2019.
- ¹⁵ Bayerisches Staatsministerium für Wirtschaft, Landesentwicklung und Energie, Pressemitteilung Nummer 272/19 vom 12.9.2019.
- ¹⁶ <https://www.bayern.de/hightech-agenda-bayern/>, Stand: 8.5.2020.
- ¹⁷ BMBF: Karliczek: Wir starten strategische Initiative zum Quantencomputing, Pressemitteilung vom 31.1.2020.
- ¹⁸ Konjunkturprogramm der Bundesregierung: „Corona-Folgen bekämpfen, Wohlstand sichern Zukunftsfähigkeit stärken“, Juni 2020.
- ¹⁹ Bundesministerium für Bildung und Forschung: Quantentechnologien – von den Grundlagen zum Markt, <https://www.bundesregierung.de/breg-de/service/publikationen/quantentechnologien-von-den-grundlagen-zum-markt-1521010>, Stand: 8.5.2020.
- ²⁰ EU, Press Dossier: Exploring and Making Quantum Technology, Finnish Presidency – Quantum Flagship Event, Helsinki, October 17-18.
- ²¹ Ebd.
- ²² <https://www.reuters.com/article/us-ibm-germany/germany-pumps-650-million-euros-into-ibm-quantum-computing-alliance-idUSKCN1VV20A?feedType=RSS&feedName=businessNews>, Stand: 8.5.2020.