



QUANTEN- COMPUTER QUO VADIS?



Zukunft



Inhalt

Einleitung	2
Das Prinzip des Quantencomputers – Eine kurze Einführung	3
Wettrennen um die leistungsfähigsten Quantencomputer	4
Software für Qubits und absehbare Anwendungen	5
Forschungen und Entwicklungen in (Ober-)Österreich	6
Quantencomputer – Blick in die Zukunft	7
Quellen	8
Impressum	8

Einleitung

Spätestens seit der Verleihung des Nobelpreises an den aus Oberösterreich stammenden Physiker emer. o. Univ.-Prof. Dr. Anton Zeilinger am 10. Dezember 2022 ist die Quantenphysik wieder in aller Munde. Im Gegensatz zur klassischen Physik treten bei der Quantenphysik Phänomene auf, die mit unserer alltäglichen Weltanschauung nur schwer in Einklang zu bringen sind. Beispiele sind die Fähigkeiten von Quantensystemen, sich gleichzeitig in verschiedenen Zuständen zu befinden (Superposition) oder die in der populären Literatur auch als „spukhafte Fernwirkung“ bezeichnete Verschränkung von Quanten über große Entfernungen hinweg.

Auch wenn schon herkömmliche Computer, Transistoren oder Laser ohne die Prinzipien der Quantenphysik nicht denkbar wären, gilt der Quantencomputer einschließlich seiner möglichen revolutionären Anwendungen als „Königsdziplin“ dieses weltweit aufstrebenden technologischen Bereiches. Noch vor wenigen Jahren schien die Konstruktion eines solchen Computers als unnahbare Zukunftstechnologie, was sich aber durch den rasanten technologischen Fortschritt gewandelt hat. Erste funktionsfähige Quantencomputer zeigen eindrucksvoll die künftigen Potenziale dieser Entwicklung, die wir im vorliegenden Report vorstellen möchten.

Das Prinzip des Quantencomputers – Eine kurze Einführung

Heute gängige Computer haben eines gemeinsam, sie arbeiten als kleinste Informationseinheit mit Bits. Ein Bit kann genau zwei Zustände annehmen: entweder 1 oder 0. Diese beiden Zustände werden in den Prozessoren von heutigen Computern mit Strom bzw. Ladungen dargestellt: „An“ bedeutet 1 und „Aus“ bedeutet 0. Auch die in Quantencomputern verwendeten Qubits können diese beiden Werte annehmen. Interessant wird es aber, wenn das Qubit seine besondere Eigenschaft ausspielt, die das klassische Bit nicht hat: Ein Qubit kann nämlich auch gleichzeitig im Zustand 1 und 0 sein oder auch in theoretisch unendlich vielen Variationen dazwischen. Daher kann der Zustand eines Qubits nur mehr über eine Funktion ($|\psi\rangle = \alpha|0\rangle + \beta|1\rangle$) im komplexen Raum beschrieben werden.

Im Gegensatz zum klassischen Bit ist der aktuelle Wert eines Qubits nicht offensichtlich. Eine Messung kann niemals den gesamten Zustand $\alpha|0\rangle + \beta|1\rangle$ enthüllen, sondern immer lediglich 0 oder 1 als Ergebnis haben, wobei die Zustandsfunktion die Wahrscheinlichkeit festlegt, einen der beiden Zustände zu messen.

Anschaulich kann diese Eigenschaft mit dem Verhalten einer Münze verglichen werden. Bei einem klassischen Bit kann sie am Boden liegend nur zwei Werte aufweisen, entweder Kopf oder Zahl. Ein Qubit wäre dagegen eine in die Luft geworfene Münze, die sich schnell um sich selbst dreht. Bei ihr kann man von vornherein nicht exakt sagen, ob Kopf oder Zahl oben ist, sie befindet sich in beiden Zuständen gleichzeitig. Erst die Messung (Auffangen der Münze und auf eine waagrechte Oberfläche klatschen) entscheidet, ob Kopf bzw. Zahl das Ergebnis ist.

Jede Datenverarbeitung basiert auf logischen Verknüpfungen von Bits zum Beispiel mit „UND“ bzw. „ODER“ Operatoren, welche eine Eingangsbitfolge nach bestimmten Regeln in eine Ausgangsbitfolge verwandeln. Die diesen Operatoren entsprechenden elektronischen Schaltungen werden auch als Gatter bezeichnet.

Grundsätzlich können mit Gattern eines Quantencomputers alle von herkömmlichen Computern bekannten logischen Operationen abgebildet werden. Darüber hinaus existieren aber noch weitere, ausschließlich auf dem Quantencomputer verfügbare

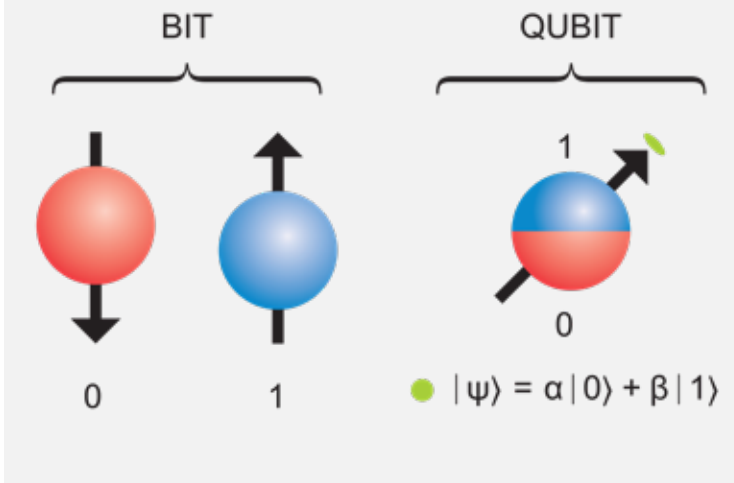


Illustration von Bits vs. Quantenbits

Quelle: Vallabh soni -stock.adobe.com

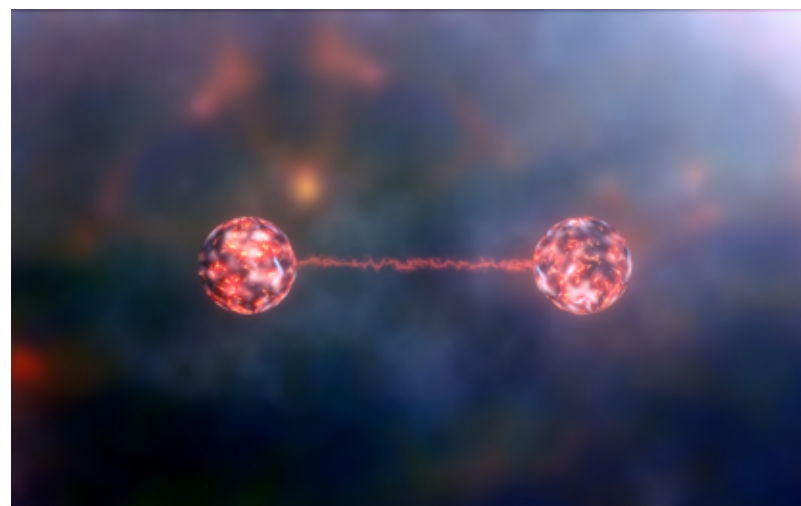
Manipulationen, die durch den sogenannten Superpositionszustand ermöglicht werden: Der Zustand aller möglichen Eingangsbitfolgen wird gleichzeitig in einem einzigen Quanten-Gatter in alle möglichen Ausgangsbitfolgen verwandelt („Quantenparallelismus“).

Zum Verschalten mehrerer Quantengatter kann zudem der einzigartige Effekt der Quantenverschränkung verwendet werden. Mit diesem Phänomen tut sich allerdings unsere Vorstellungskraft schwer, denn es fehlt ein Pendant in unserer Erfahrungswelt der großen Dinge. Besonders schwer vorzustellen ist der Umstand, dass diese Verschränkung instantan erfolgt, auch bei sehr großen Entfernungen der beteiligten Quanten. Dadurch wird sozusagen eine überlichtschnelle Kalkulation möglich.

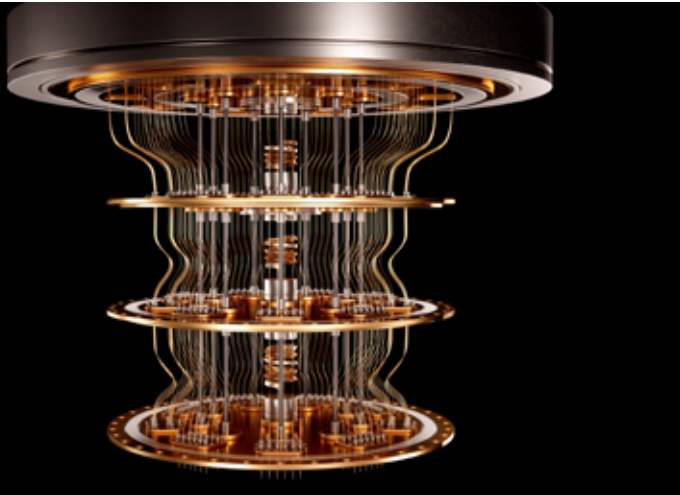
Durch die speziellen Eigenschaften von verschränkten Quantensystemen vergrößert sich die Anzahl an darstellbaren Zuständen nicht linear, sondern exponentiell. Genauer: Mit jedem weiteren Qubit erhält man eine Verdopplung an darstellbaren Zuständen (z.B. mögliche Lösungen einer Gleichung), welche mit dem Quantenparallelismus gleichzeitig verarbeitet werden können.

Schematische Illustration der Quantenverschränkung

Quelle: ezstudiophoto-stock.adobe.com



Beispielsweise bei fünf Qubits $2^5 = 32$, bei sechs Qubits $2^6 = 64$ usw. Das klingt erstmal nicht nach besonders viel. Allerdings mit 50 Qubits können 2^{50} (mehr als 1.000.000.000.000.000 oder eine Billiarde) Zustände dargestellt werden und mit 300 Qubits mehr als es Atome im Universum gibt!



Beispiel eines Quantencomputers

Quelle: Bartek Wróblewski-stock.adobe.com

Um die Verschränkung von möglichst vielen Qubits zu erreichen, wird mit mehreren Bauweisen experimentiert. Häufig (wie auch im Titelbild) begegnet man einem goldenen Grundaufbau, der wie ein Luster aussieht. Das meiste daran ist Kühlung. Der tatsächliche Prozessor ist ein Chip von wenigen Quadratzentimetern, der ganz unten hängt. Bei dieser Bauweise werden Quantencomputer aus bei sehr tiefen Temperaturen supraleitenden Schaltkreisen hergestellt.

Unter Supraleitung wird ein ganz spezieller elektrischer Zustand verstanden, bei dem elektrischer Strom durch Kopplung von Elektronen komplett ohne elektrischen Widerstand fließt. Dadurch entstehen nicht nur ganz spezielle elektrische, sondern auch magnetische Eigenschaften. Supraleitende Materialien führen deshalb auch im Makrokosmos zu einer Reihe von kuriosen, aber auch für die Technik interessanten Effekten. Ein schon klassisches Experiment ist die schwebende, auf die Temperatur von flüssiger Luft abgekühlte Supraleitertablette.

Neben supraleitenden Schaltkreisen wird derzeit auch noch eine weitere Art von Quantencomputern entwickelt, die im Moment einiges Potenzial zeigt: die Ionen-Fallen. Hier werden Ionen (z.B. Calciumionen) in einer Vakuum-Kammer mit einem Laser und elektrischen Feldern gefangen. Statt wie unten an einem „Luster“ ist der Prozessor in einem Stahlbehälter.



Schwebende Tablette eines Hochtemperatursupraleiters

Quelle: wesel-stock.adobe.com

Wettrennen um die leistungsfähigsten Quantencomputer

Da ein Quantencomputer exponentiell leistungsfähiger mit der Anzahl an verschränkten Qubits wird, ist in den letzten Jahren ein Wettrennen um die besten Quantencomputer entstanden. Während der Rekord nach Medienberichten im November 2021 bei 127 Qubits (IBM Eagle) lag, stellte dieselbe Firma ein Jahr später (November 2022) bereits einen Quantencomputer mit 433 Qubits (IBM Osprey) vor.

Um die Rechenleistung von Osprey zu erreichen, wären als klassische Bits mehr Atome erforderlich, als im Universum überhaupt vorhanden sind. Dies bedeutet, dass die Ergebnisse eines derartigen Quantencomputer nicht mehr durch klassische Rechner simuliert werden könnten.

Die Entwicklung von Quantencomputern geht neben dem Erreichen immer höherer Rechenleistungen auch in Richtung der praktischen Anwendbarkeit. Beispielsweise hat zum Jahresende 2022 die chinesische Firma SpinQ einen tragbaren Quantencomputer auf den Markt gebracht, der aber derzeit eher noch für Demonstrationszwecke und für den Lehrbereich gedacht ist. Mit einem Preis von unter 10.000 € wäre SpinQ durchaus ein Schnäppchen.

Diese weitaus nicht komplette Auswahl an Beispielen aus öffentlich zugänglichen Quellen zeigt insgesamt, dass derzeit eine stürmische Entwicklung in der Quanten-Hardware im Gange ist, die noch vor wenigen Jahren undenkbar gewesen wäre.

Software für Qubits und absehbare Anwendungen

Mit Hilfe dieser zusätzlichen Fähigkeiten der Qubits wird es möglich, völlig neue Algorithmen zu entwerfen. Theoretische Studien zeigen, dass diese Algorithmen für die Lösung bestimmter Aufgaben, wie der Suche in extrem großen Datenbanken oder der Faktorisierung großer Zahlen weitaus schneller sind als herkömmliche Programme auf klassischen Computern. Dies würde es ermöglichen, die Berechnungszeit für viele mathematische und physikalische Problemstellungen deutlich zu verringern.

Bereits mit nur einer kleinen Anzahl an Qubits können somit Probleme gelöst werden, die sonst eine extrem große Anzahl an klassischen Bits benötigen würden. Neben vielen denkbaren Anwendungen im Bereich der Grundlagenforschung (vgl. Oö. Zukunftsakademie, 2023: Intelligente Algorithmen für alles - Haben wir zu viel Vertrauen?¹) ist auch der Einsatz für komplexe industrielle Prozesse (Optimierung von Lieferketten) nicht zuletzt in Richtung Ressourcenschonung und CO₂-Einsparung absehbar.

Abschätzungen der Überlegenheit von Quantencomputern (Quantum Supremacy) zeigen zudem, dass künftig im Vergleich zu klassischen Computern Energieeinsparungen von bis zu 99,9 % und mehr möglich sein könnten. Allerdings wird dies stark von den zu lösenden Problemen und Programmabläufen abhängen.

Illustration eines QuBits: In Ergänzung zu den klassischen Bits mit den Zuständen 0 und 1 sind auch Überlagerungen möglich

0 1 0 1 0 1

Anwendungen von Quanten-Algorithmen



Wirkstoffsuche in der Medizin



Optimierung in der Energiewirtschaft



Chemische Grundlagenforschung



Vorhersage von Materialeigenschaften



Entwicklung neuartiger Batterien



Verschlüsselung und Datensicherheit



Planung von Telekommunikationsnetzen



Bioinformatik, wie z.B. Mutationsanalyse



Lösung komplexer mathematischer Probleme

Spezifisch industrielle Anwendungen



Optimierung von Lieferketten und Logistik



Überwachung von komplexen Produktionsanlagen



Optimierung von Produktionsplänen und Arbeitsgängen



Verbesserung von Roboterbewegungen und Bearbeitungsparametern



Ermöglichung neuartiger daten-gesteuerter Geschäftsmodelle

¹ https://www.ooe-zukunftsakademie.at/Medien-dateien/Trendreport_intelligente_Algorithmen.pdf



Forschungen und Entwicklungen in (Ober-)Österreich

In Österreich beschäftigt sich eine Reihe von hervorragenden Forschungseinrichtungen und Unternehmen, mit der Entwicklung von Quantencomputern und Software für Quantencomputing. Einige Beispiele sind:

➤ Die **Johannes Kepler Universität** und das **Linz Institute of Technology**, die im Bereich Grundlagenforschung etwa in Richtung Charakterisierung großer Quantensysteme tätig sind.

➤ Das **Software Center Hagenberg (SCCH)**, das Grundlagenforschung und Softwareentwicklung für Quantencomputer betreibt.

➤ Die **FH Oberösterreich (FH OÖ)** am Campus Hagenberg, die Software für Quantencomputer erstellt.

➤ Das **Institute for Quantum Optics and Quantum Information (IQOQI)** der Österreichischen Akademie der Wissenschaften (ÖAW), welches sich auf die Erforschung von Quantenoptik und Quanteninformation spezialisiert hat (Wien und Innsbruck).

➤ Das **Institute of Science and Technology Austria (IST Austria)**, das sich mit der Erforschung von Quantencomputern und anderen quantenmechanischen Phänomenen beschäftigt.

➤ Der **Fachbereich Informatik der Technischen Universität Wien**, der sich mit der Entwicklung von Algorithmen und Software für Quantencomputer beschäftigt.

➤ Der **Fachbereich Physik der Universität Wien**, der sich auf die Erforschung von Quantenmaterialien und quantenmechanischen Phänomenen spezialisiert hat.

➤ Das **Vienna Center for Quantum Science and Technology (VCQ)** ist eine gemeinsame Initiative der Universität Wien, der Technischen Universität Wien, u.a., die QuantenphysikerInnen der Wiener Forschungseinrichtungen in einem gemeinsamen Zentrum vereint.

➤ Die **Alpine Quantum Technologies**, ein Spin-off der Universität Innsbruck und der Österreichischen Akademie der Wissenschaften, ist auf dem Weg, einen kommerziell nutzbaren Quantencomputer zu entwickeln.

➤ **Infineon Austria**, die gemeinsam mit der **Universität Innsbruck** und der **JOANNEUM RESEARCH** an ionenbasierten Prozessoren mit integrierter Optik forscht, mit dem Ziel 100 und mehr Qubits miteinander zu verschränken..

Dies sind nur einige Beispiele aus öffentlich zugänglichen Quellen und bildet sicher nicht die komplette Vielfalt der heimischen Forschungslandschaft ab, die demnächst mit dem Institute for Digital Sciences Austria weiter bereichert wird.

Quantencomputer – Blick in die Zukunft

Beitrag von Prof. Dr. Robert Wille

Die oben beschriebenen Entwicklungen führen konsequenterweise zu Fragen wie „Werden Quantenrechner bisherige konventionelle Computer ersetzen?“ oder „Müssen demnächst alle Quantenphysik-ExpertInnen werden?“ Die (für einige sicher beruhigende) Antwort lautet: Nein! Trotzdem sollten wir uns nicht zurücklehnen. Die Gefahr, dass „Quantenzeitalter“ zu verschlafen, ist groß!

Grundsätzlich gilt: Quantencomputer werden bisherige Computer ergänzen, sie aber nicht ersetzen. Für bestimmte Probleme/Aufgaben könnten Sie eine vielversprechende Alternative bieten, mit denen sich ein Vorteil gegenüber konventioneller Technologie erreichen lässt. Damit reißen sich Quantencomputer in eine stärkere Diversifizierung von Computertechnologien ein: Wurden in den letzten Jahrzehnten prinzipiell recht ähnliche Konzepte genutzt (die „klassische CPU“, ggf. noch erweitert um Grafikkarten, d.h. GPUs), etablieren sich mehr und mehr Spezialprozessoren in heutigen Rechenzentren. In Zukunft werden sich hier auch Quantencomputer (als so genannte QPUs) etablieren. Zukünftig wird man also viel mehr daraufsetzen, für ein Problem die jeweils beste Technologie zu nutzen (und nicht alles mit klassischer Hardware zu lösen).

Bleibt die Frage, was sind die „Killerapplikationen“ für Quantencomputer? Bei den möglichen Anwendungsfeldern (siehe Kasten auf S. 5) sind einige vielversprechende Kandidaten genannt. Welche sich davon durchsetzen ist derzeit Gegenstand intensiver Debatten in Wissenschaft und Industrie. Natürlich hängt dies sehr von der zur Verfügung stehenden Hardware ab (und ob sich die vielversprechenden Roadmaps der involvierten Firmen auch wirklich erfüllen). Aber auch die Charakteristik der jeweiligen Anwendung spielt eine große Rolle. Um heraus zu finden, was „quantentauglich“ ist und was nicht, sollten entsprechende „Testballons“ heute schon gestartet werden. Derartige „Spielbeispiele“ möglicher Anwendungen, mit denen man erste Erfahrungen sammeln kann, könnten sowohl in der Grundlagenforschung wie z.B. in der Vorhersage von Materialeigenschaften als auch in industriellen Anwendungen wie der Optimierung von Lieferketten, Logistik und Energieflüssen liegen.



Prof. Dr. Robert Wille hat die Professur für Design Automation an der Technischen Universität München inne, zuvor lehrte und forschte er an der Johannes Kepler Universität. Zudem ist er auch Chief Scientific Officer am Software Competence Center Hagenberg und Mitglied im Future Panel Oberösterreich.

Gleichzeitig kann man sich dadurch die dringend benötigte Expertise aufbauen. Schon jetzt ist absehbar, dass es eine große Nachfrage an einer so genannten „Quantum Workforce“ geben wird, d.h. an ExpertInnen, die Quantentechnologie auch nutzen können. Dafür müssen nicht „alle“ QuantenphysikerInnen werden. Auch klassische Computer werden ja nicht nur von ElektrotechnikerInnen genutzt. Aber es braucht Ökosysteme, welche über entsprechende Abstraktionen, Programmiersprachen, Entwurfswerkzeuge wie Programmierumgebungen und Compiler, etc. mögliche EndanwenderInnen mit den Maschinen verbinden.

Diese Entwicklungen, „Testballons“ zur Evaluierung möglicher Anwendungen und Ökosysteme zur Realisierung selbiger, sollten Wissenschaft aber auch Industrie schon jetzt vorantreiben. Nur so kann man sicherstellen, nicht den Anschluss zu verpassen, wenn die entsprechende Technologie marktreif ist. Um dieses Zukunftsthema zudem auch in die Breite zu tragen, muss eine Intuition davon vermittelt werden, wie künftige Quantentechnologien funktionieren. Dies kann zum Beispiel über Vorstellungen an Schulen oder über eigene Lehrveranstaltungen an höheren Schulen oder Universitäten geschehen. An der JKU Linz oder der Technischen Universität München werden solche Ansätze schon aktiv verfolgt.

(Ober)Österreich hat in der Vergangenheit bereits mehrmals bewiesen, dass es Technologiewandel als Chance begreift und sich bei diesem erfolgreich bewähren kann. Mit diesem „Mindset“ sollte man auch das „Quantenzeitalter“ aktiv voran treiben.

Quellen

Alpine Quantum Technologies GmbH

> <https://www.aqt.eu/>

Austrian Institute of Technology (AIT), 2023: Quantentechnologien

> <https://www.ait.ac.at/themen/enabling-digital-technologies/solutions-services/quantentechnologien>

Fachbereich Informatik der Technischen Universität Wien

> <https://informatics.tuwien.ac.at>

FH Oberösterreich, Campus Hagenberg

> <https://www.fh-ooe.at/campus-hagenberg/>

Fraunhofer IAO Social Media, Andreas Sturm, 2021: Was macht einen Quantencomputer so mächtig?

> <https://blog.iao.fraunhofer.de/category/quantencomputing/>

Futurezone 2022, Tragbarer Quantencomputer kostet 8.200 Euro

> <https://futurezone.at/produkte/tragbarer-quantencomputer-gemini-spin-qubits/402264387>

Futurezone, 2022: IBM bringt Quantenprozessor mit 433 Qubits

> <https://futurezone.at/science/ibm-quantencomputer-quantenprozessor-osprey-qubits-eagle/402212400>

Futurezone, 2022: Wie funktioniert ein Quantencomputer?

> <https://futurezone.at/science/quantencomputer-qubits-ionen-falle-supraleiter-ibm-google-uni-innsbruck/401925253>

Heise, 2021: IBM Eagle: Der erste Quantencomputer, den Supercomputer nicht simulieren können

> <https://www.heise.de/news/IBM-Eagle-Der-erste-Quantencomputer-den-Supercomputer-nicht-simulieren-koennen-6268957.html>

Industriemagazin, 2023: Quantentechnologie in der Industrie: ihr enormes Potenzial

> <https://industriemagazin.at/fertigen/quantentechnologie-in-der-industrie-ihr-enormes-potenzial/>

Infineon Austria via OTS, 2021: Österreichische Forschung ebnet Weg für superschnellen Quantencomputer

> https://www.ots.at/presseaussendung/OTS_20210728_OTS0057/oesterreichische-forschung-ebnet-weg-fuer-superschnelle-quantencomputer

Institute for Quantum Optics and Quantum Information (IQOQI) der Österreichischen Akademie der Wissenschaften (Wien und Innsbruck)

> <https://iqoqi.at/>

Institute of Science and Technology Austria (IST Austria)

> <https://ist.ac.at/>

Linz Institute of Technology

> <https://www.jku.at/linz-institute-of-technology/>

Nasa Ames Research Center, Oak Ridge National Laboratory u.a., 2020: Establishing the quantum supremacy frontier with a 281 Pflop/s simulation

> <https://www.osti.gov/servlets/purl/1649588>

Oö. Zukunftsakademie, 2023: Intelligente Algorithmen für alles - Haben wir zu viel Vertrauen?

> https://www.ooe-zukunftsakademie.at/Medien-dateien/Trendreport_intelligente_Algorithmen.pdf

Österreichische Akademie der Wissenschaften (ÖAW), 2020: Quantencomputer aus Österreich

> <https://www.oeaw.ac.at/news/quantencomputer-aus-oesterreich>

Scinexx, 2021: Quantencomputer für überall

> <https://www.scinexx.de/news/technik/quantencomputer-fuer-ueberall/>

Software Competence Center Hagenberg

> <https://www.scch.at/>

Tips, 2021: Forschung zu Quantencomputern schreitet voran

> <https://www.tips.at/nachrichten/ooe/wirtschaft-politik/531489-forschung-zu-quantencomputern-schreitet-voran>

Universität Wien - Rudolphina, 2022: Physiknobelpreis 2022 - Anton Zeilinger: Pionier der Quanteninformation

> <https://rudolphina.univie.ac.at/nobelpreis-fuer-quantenphysiker-anton-zeilinger>

Vienna Center for Quantum Science and Technology (VCQ)

> <https://vcq.quantum.at/>

Impressum

Medieninhaber und Herausgeber: Amt der Oö. Landesregierung, Direktion Präsidium, Abteilung Trends und Innovation, Oö. Zukunftsakademie, Altstadt 30a, 4021 Linz

+43 732 7720 14402 | zak.post@ooe.gv.at | [ooe-zukunftsakademie.at](https://www.ooe-zukunftsakademie.at)

Redaktion: Mag.^a Dr.ⁱⁿ Reingard Peyrl, MSc, DI Dr. Klaus Bernhard (Projektleitung)

Grafik: Vectorygraphics e.U. | Auflage: Mai 2023 | Titelfoto: Ragsxl - commons.wikimedia.org, CC BY-SA 4.0

Informationen zum Datenschutz finden Sie unter:

<https://www.land-oberoesterreich.gv.at/datenschutz>

