Festkörper-Quantencomputer: Wie supraleitende Qubits funktionieren

QUBITS AUS METALL

Wer Bilder von den Quantencomputern bei Google oder IBM sieht, entdeckt zuerst ein Gestell aus vergoldeten Platten und Kabeln, das von der Decke hängt und an einen Kronleuchter erinnert. Das ist nur die Kühlung. Der eigentliche Rechner sitzt ganz unten: ein flacher Chip, auf dem winzige Schaltkreise aus Metall liegen. Werden sie kalt genug, verhalten sie sich nicht mehr wie gewöhnliche Elektronik, sondern wie einzelne Quantenteilchen, die in zwei Zuständen zugleich sein können. Weil diese Qubits fest in einem Material sitzen, statt wie Ionen oder Atome in einer Falle zu schweben, spricht man von Festkörper-Quantencomputern.

Dass so etwas überhaupt funktioniert, war lange nicht selbstverständlich. Ein Stück Metall mit Hunderten Millionen beweglicher Elektronen ist für Quantenverhältnisse riesig, und große Dinge benehmen sich normalerweise klassisch. Genau darum geht es im Gedankenexperiment um Schrödingers Katze. John Clarke, Michel Devoret und John Martinis zeigten 1984 und 1985 an einem supraleitenden Schaltkreis auf einem etwa zentimetergroßen Chip, dass auch ein solches Objekt durch eine Energiebarriere tunneln kann und scharf getrennte Energiestufen besitzt [1],[2]. Dafür erhielten die drei 2025 den Physik-Nobelpreis [3]. Vierzehn Jahre nach ihrem Experiment gelang Yasunobu Nakamura mit Kollegen bei NEC in Japan erstmals die gezielte, zeitlich gesteuerte Kontrolle eines supraleitenden Qubits [4].

Strom ohne Widerstand

Alles beginnt mit der Supraleitung. Kühlt man bestimmte Metalle unter eine für sie typische Temperatur, verschwindet ihr elektrischer Widerstand vollständig. Bei Aluminium, aus dem schon Nakamuras erstes Qubit bestand [4], liegt diese Sprungtemperatur bei rund 1,2 Kelvin, knapp 272 Grad unter null [5].

Warum das so ist, konnten John Bardeen, Leon Cooper und Robert Schrieffer erst 1957 erklären [6]. Im Metall können sich je zwei Elektronen über die Schwingungen des Atomgitters zu einem Paar verbinden, einem Cooper-Paar [7]. Einzelne Elektronen sind Fermionen und dürfen nie im selben Zustand sein, ein Paar aus zwei Elektronen verhält sich dagegen in mancher Hinsicht wie ein Boson, und für Bosonen gilt dieses Verbot nicht (mehr dazu im Artikel über Fermionen und Bosonen). Vereinfacht gesagt können sich die Paare deshalb alle in einem einzigen, gemeinsamen Quantenzustand sammeln, der sich durch das ganze Metallstück zieht. Für ein Qubit ist das ein Glücksfall: Statt unzähliger Elektronen, die jedes für sich herumzappeln, hat man ein einziges kollektives Gebilde, das

sich mit einer einzigen Wellenfunktion beschreiben lässt und dessen Strom ohne Wärmeverluste fließt.

Der Josephson-Kontakt macht den Unterschied

Ein supraleitender Schwingkreis aus Spule und Kondensator ist allerdings noch kein brauchbares Qubit. Den entscheidenden Baustein sagte Brian Josephson 1962 in Cambridge voraus [8]: zwei Supraleiter, getrennt durch eine hauchdünne Isolierschicht. Cooper-Paare können durch diese Schicht tunneln, und es fließt ein Strom, ohne dass eine Spannung anliegt. Wie groß er ist, hängt vom Unterschied φ zwischen den quantenmechanischen Phasen auf beiden Seiten ab:

$$I = I_c \cdot \sin\varphi \tag{1}$$

I_c ist der größte Strom, den der Kontakt ohne Spannung tragen kann. Auf den Sinus kommt es an. Quantenmechanisch betrachtet verhält sich ein gewöhnlicher Schwingkreis wie eine perfekte Feder, seine Energiestufen liegen alle genau gleich weit auseinander (Abb. 1, links) [9]. Für ein Qubit ist das fatal. Ein Mikrowellenpuls, der den Kreis von Stufe 0 auf Stufe 1 heben soll, passt genauso für den Schritt von 1 nach 2 und von 2 nach 3, und der Zustand verläuft sich über die ganze Leiter. Ersetzt man die Spule durch einen Josephson-Kontakt, wird die Feder umso weicher, je weiter man sie auslenkt, und die Stufen rücken nach oben hin zusammen. Nun hat der Übergang von 0 nach 1 eine eigene Frequenz, die sich gezielt ansprechen lässt, und die beiden untersten Stufen bilden das Qubit.

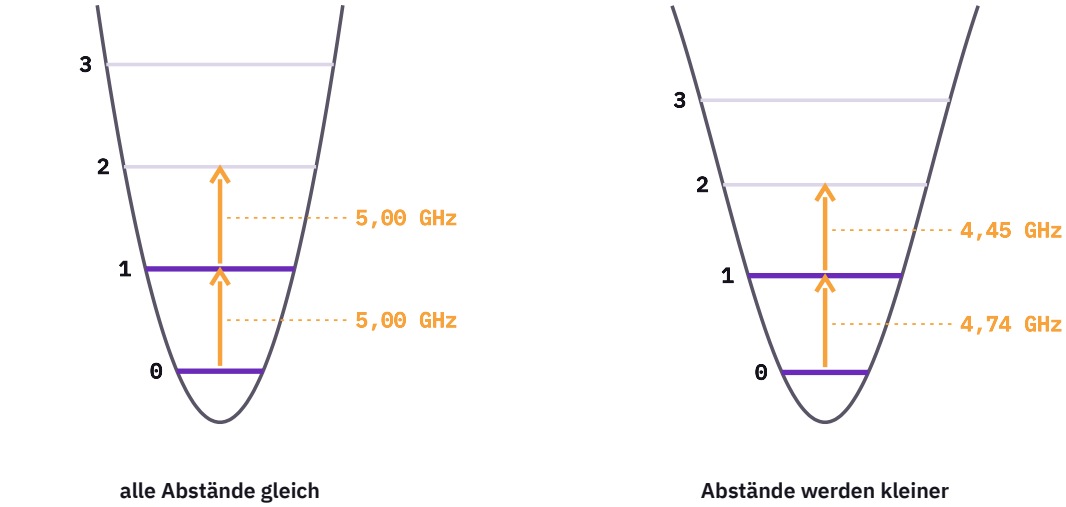

Abb. 1: Links ein gewöhnlicher Schwingkreis mit gleich großen Stufenabständen, rechts ein Transmon-Qubit, dessen Josephson-Kontakt die Abstände nach oben hin verkleinert. Exakt berechnet für E_C/h = 250 MHz und E_J = 50 E_C. Eigene Berechnung und Darstellung nach [10], [9].

Die Bauform, auf der zum Beispiel Googles Chip Willow beruht [11], heißt Transmon. Ihre Qubitfrequenz f_{01} lässt sich in guter Näherung aus zwei Energien berechnen [10],[9]:

$$E_C = \frac{e^2}{2C}, \quad hf_{01} \approx \sqrt{8E_J E_C} - E_C \tag{2}$$

Die Josephson-Energie E_J beschreibt, wie leicht Cooper-Paare durch den Kontakt tunneln, die Ladeenergie E_C, wie viel Energie eine einzelne Elementarladung e auf der Kapazität C kostet. Übliche Werte sind ein Verhältnis E_J/E_C von 50 oder mehr und eine Ladeenergie, die einer Frequenz von 100 bis 300 MHz entspricht [9]. Mit E_C/h = 250 MHz und E_J = 50 E_C liefert Gleichung (2) eine Qubitfrequenz von 4,75 GHz, eine exakte Rechnung 4,74 GHz. Der nächste Schritt, von Stufe 1 nach Stufe 2, liegt ungefähr um E_C tiefer [9], exakt gerechnet bei 4,45 GHz. Knapp 300 MHz Unterschied genügen, um die Stufen sauber auseinanderzuhalten. Gesteuert und ausgelesen werden die Qubits also mit Mikrowellen in derselben Größenordnung, in der auch WLAN funkt.

Vom Cooper-Paar-Kasten zum Transmon

Nakamuras erstes Qubit von 1999 war ein Aluminiumstreifen von 700 × 50 × 15 Nanometern mit rund 10^8 beweglichen Elektronen, über einen Josephson-Kontakt mit einem größeren Reservoir verbunden [4]. Seine beiden Zustände unterschieden sich darin, ob ein Cooper-Paar mehr auf dem Streifen saß oder nicht. Ein kurzer Spannungspuls brachte die beiden Zustände in Resonanz. Solange er andauerte, pendelte das Qubit kohärent zwischen ihnen hin und her, und je nach Pulsdauer endete es in einer anderen Überlagerung. Beobachten ließ sich das für Pulse bis zu einer Länge von rund zwei Nanosekunden, bei einer Temperatur von etwa 30 Millikelvin [4].

Vier Jahre später koppelte dieselbe Gruppe zwei solcher Kästen über einen Kondensator. Die Schwingungen, die sie maß, deuteten auf verschränkte Zustände der beiden Qubits hin [12], jenes merkwürdige Verbundensein, das auch beim Beamen von Quantenzuständen die Hauptrolle spielt. Noch im selben Jahr folgte ein bedingtes Logikgatter, bei dem der Zustand des einen Qubits darüber entschied, ob das andere umgeschaltet wurde [13]. Parallel dazu beobachtete ein Team in Delft kohärente Schwingungen in einem anderen Qubit-Typ, dem 1999 vorgeschlagenen Fluss-Qubit [14], einem supraleitenden Ring mit drei Josephson-Kontakten. Es zeigte Hunderte kohärente Schwingungen, eine Dephasierungszeit von 20 Nanosekunden und eine Lebensdauer des angeregten Zustands von 900 Nanosekunden [15].

Das Problem der frühen Kästen war ihre Empfindlichkeit. Weil der Qubitzustand an einer elektrischen Ladung hängt, verschiebt jede zufällig umspringende Ladung in der Umgebung seine Frequenz. Jens Koch und Kollegen an der Yale University schlugen 2007 deshalb vor, den Kasten mit einem großen Kondensator zu überbrücken. Dadurch wird E_J viel größer als E_C, die Empfindlichkeit gegenüber Ladungsrauschen sinkt exponentiell, während die

Abstände der Energiestufen nur wenig gleichmäßiger werden[10]. So entstand das Transmon. Seither sind die Lebensdauern stetig gewachsen. Mit Tantal statt Niob in Kondensatorflächen und Leiterbahnen erreichte das beste Qubit einer Studie von 2021 eine Lebensdauer von über 0,3 Millisekunden, im Mittel aller Proben waren es 0,23 Millisekunden[16]. 2025 kam eine Gruppe in Princeton mit Tantal auf besonders reinem Silizium auf Lebensdauern von bis zu 1,68 Millisekunden[17]. Die 105 Transmons auf Googles großem Willow-Chip kommen im Mittel auf 68 Mikrosekunden[11], denn auf vielen Qubits gleichzeitig hohe Werte zu halten, ist deutlich schwerer als bei einem einzelnen Rekord-Qubit.

Jahr	Meilenstein
1962	Josephson sagt den Tunnelstrom von Cooper-Paaren voraus[8]
1985	Martinis, Devoret und Clarke weisen quantisierte Energiestufen in einem Schaltkreis nach[2]
1999	Erste zeitlich gesteuerte kohärente Kontrolle eines supraleitenden Qubits (Cooper-Paar-Box)[4]
2003	Zwei gekoppelte Qubits[12], ein bedingtes Logikgatter[13] und kohärente Schwingungen eines Fluss-Qubits[15]
2007	Vorschlag des Transmons[10]
2019	Googles Prozessor Sycamore mit 53 funktionsfähigen Qubits[18]
2021	Transmons mit Tantal-Schaltkreisen, Lebensdauer bis über 0,3 ms[16]
2024	Googles Willow mit 105 Qubits, Fehlerkorrektur unterhalb der Schwelle[11]
2025	Transmons mit Lebensdauern bis 1,68 ms[17]
2025	Nobelpreis für Clarke, Devoret und Martinis[3]

Kälter als das Weltall

Damit Aluminium supraleitet, genügte es, knapp unter 1,2 Kelvin zu kühlen. Gekühlt wird trotzdem auf weit tiefere Temperaturen, und der Grund ist die Wärme selbst. Im angeregten Zustand trägt ein Qubit gerade einmal die Energie $h \cdot f$. Ist die Wärmeenergie $k_B T$ der Umgebung ähnlich groß, schubsen zufällige Wärmestöße das Qubit ständig nach oben, und jede Rechnung beginnt mit einem falschen Ausgangszustand. Damit das nicht passiert, muss gelten[9],[19]:

$$hf \gg k_B T \quad \Rightarrow \quad T \ll \frac{hf}{k_B} \approx 0{,}24\,\mathrm{K} \quad (\text{für } f = 5\,\mathrm{GHz}) \tag{3}$$

Für ein Qubit bei 5 GHz liegt die Grenze also bei einem Viertel Kelvin, und „deutlich darunter“ heißt in der Praxis: rund 20 Millikelvin [9]. Bei dieser Temperatur ist die Wärmeenergie zwölfmal kleiner als *h·f*. Nach der Boltzmann-Verteilung wäre dann im Idealfall nur etwa eines von 160 000 Qubits durch Wärme angeregt (eigene Rechnung mit e^{-12}). Zum Vergleich: Die Hintergrundstrahlung, die das Weltall erfüllt, hat eine Temperatur von 2,7 Kelvin [20]. Der Chip ist im Betrieb also über hundertmal kälter als der leere Raum zwischen den Galaxien.

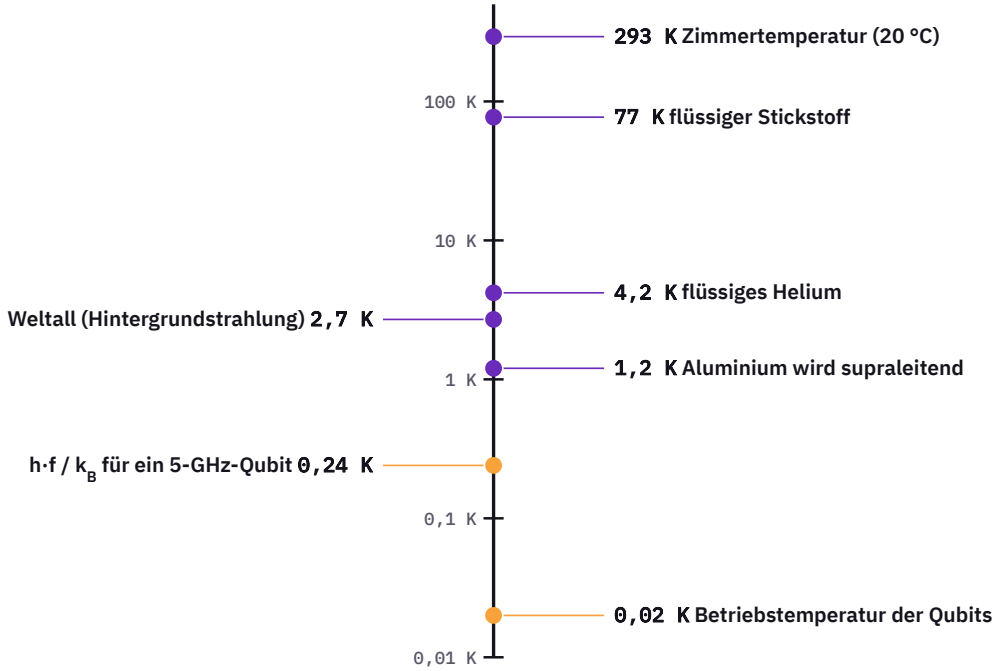

Abb. 2: Temperaturen auf logarithmischer Skala, von Zimmertemperatur bis zur typischen Betriebstemperatur supraleitender Qubits. Eigene Darstellung, Werte nach [21],[5],[20],[9] und Gleichung (3).

Erreicht werden solche Temperaturen in einem Mischungskryostaten, der mit einem Gemisch der beiden Helium-Isotope Helium-3 und Helium-4 arbeitet. Die Anlage kühlt in mehreren Stufen, von denen jede kälter ist als die darüber, die oberen mit einem Pulsröhrenkühler, die untersten mit dem Helium-Gemisch, und genau diese Stufen sind die goldenen Platten des „Kronleuchters“. Jedes Qubit braucht dabei Leitungen, über die Mikrowellenpulse von außen hineinkommen und Messsignale herausgehen, und jede Leitung trägt ein wenig Wärme mit sich [22].

Ein zweiter Weg: Spins in Silizium

Supraleitende Schaltkreise sind nicht die einzige Möglichkeit, Qubits in einen Festkörper zu packen. Daniel Loss und David DiVincenzo schlugen 1998 vor, den Spin einzelner Elektronen zu nutzen, die in sogenannten Quantenpunkten eingesperrt sind, winzigen Fallen in einem Halbleiter [23]. Im selben Jahr beschrieb Bruce Kane einen Rechner aus einzelnen Phosphoratomen in einem Siliziumkristall, deren Kernspins als Qubits dienen [24]. Es ist dieselbe Art von Spin, die im Kernspintomographen Bilder des Körperinneren liefert. Ein Zwei-Qubit-Gatter mit Spins in Quantenpunkten aus angereichertem Silizium-28 gelang 2015 einer Gruppe in Sydney [25]. Der Reiz dieses Wegs liegt im Material: Silizium ist der Stoff, aus dem fast die gesamte heutige Chipindustrie ihre Produkte fertigt, und die Hoffnung ist, Qubits eines Tages in denselben Fabriken herzustellen.

Wie weit ist das noch?

Jedes Qubit macht Fehler, ob Transmon oder Spin. Deshalb fasst man viele physikalische Qubits zu einem logischen Qubit zusammen, das Fehler erkennen und korrigieren kann. Auf dem Willow-Chip wurde der Fehler eines solchen logischen Qubits mit jeder Vergrößerung kleiner, im größten Gitter lag er bei 0,143 Prozent pro Korrekturzyklus [11]. Das ist ein echter Fortschritt, aber noch weit von einer nützlichen Maschine entfernt. Um etwa einen heute üblichen RSA-Schlüssel mit 2048 Bit zu knacken, bräuchte man nach einer Abschätzung von 2025 weniger als eine Million physikalischer Qubits mit einer Fehlerrate von 0,1 Prozent, und die Rechnung dauerte knapp eine Woche [26]. Das sind rund zehntausendmal so viele Qubits, wie auf Willow sitzen. Ein noch nicht begutachteter Entwurf vom Februar 2026 kommt unter ähnlichen Annahmen mit weniger als 100 000 Qubits aus, immer noch knapp tausendmal so viele [27]. Was ein solcher Rechner können würde und was nicht, erklärt der Artikel über den Quantencomputer.

Quellen

1. Königlich Schwedische Akademie der Wissenschaften: *The Nobel Prize in Physics 2025. Their experiments on a chip revealed quantum physics in action.* Pressemitteilung, 7. Oktober 2025, kva.se.
2. J. M. Martinis, M. H. Devoret, J. Clarke: *Energy-Level Quantization in the Zero-Voltage State of a Current-Biased Josephson Junction.* In: Physical Review Letters 55 (1985), S. 1543–1546, doi:10.1103/PhysRevLett.55.1543.
3. Nobel Prize Outreach: *The Nobel Prize in Physics 2025* (J. Clarke, M. H. Devoret, J. M. Martinis). nobelprize.org/prizes/physics/2025.

4. Y. Nakamura, Yu. A. Pashkin, J. S. Tsai: *Coherent control of macroscopic quantum states in a single-Cooper-pair box.* In: Nature 398 (1999), S. 786–788, doi:10.1038/19718. Preprint: arXiv:cond-mat/9904003.
5. J. F. Cochran, D. E. Mapother: *Superconducting Transition in Aluminum.* In: Physical Review 111 (1958), S. 132–142, doi:10.1103/PhysRev.111.132.
6. J. Bardeen, L. N. Cooper, J. R. Schrieffer: *Theory of Superconductivity.* In: Physical Review 108 (1957), S. 1175–1204, doi:10.1103/PhysRev.108.1175.
7. L. N. Cooper: *Bound Electron Pairs in a Degenerate Fermi Gas.* In: Physical Review 104 (1956), S. 1189–1190, doi:10.1103/PhysRev.104.1189.
8. B. D. Josephson: *Possible new effects in superconductive tunnelling.* In: Physics Letters 1 (1962), S. 251–253, doi:10.1016/0031-9163(62)91369-0.
9. P. Krantz, M. Kjaergaard, F. Yan, T. P. Orlando, S. Gustavsson, W. D. Oliver: *A quantum engineer's guide to superconducting qubits.* In: Applied Physics Reviews 6 (2019), 021318, doi:10.1063/1.5089550.
10. J. Koch u. a.: *Charge-insensitive qubit design derived from the Cooper pair box.* In: Physical Review A 76 (2007), 042319, doi:10.1103/PhysRevA.76.042319.
11. Google Quantum AI and Collaborators: *Quantum error correction below the surface code threshold.* In: Nature 638 (2025), S. 920–926, doi:10.1038/s41586-024-08449-y.
12. Yu. A. Pashkin, T. Yamamoto, O. Astafiev, Y. Nakamura, D. V. Averin, J. S. Tsai: *Quantum oscillations in two coupled charge qubits.* In: Nature 421 (2003), S. 823–826, doi:10.1038/nature01365.
13. T. Yamamoto, Yu. A. Pashkin, O. Astafiev, Y. Nakamura, J. S. Tsai: *Demonstration of conditional gate operation using superconducting charge qubits.* In: Nature 425 (2003), S. 941–944, doi:10.1038/nature02015.
14. J. E. Mooij, T. P. Orlando, L. Levitov, L. Tian, C. H. van der Wal, S. Lloyd: *Josephson Persistent-Current Qubit.* In: Science 285 (1999), S. 1036–1039, doi:10.1126/science.285.5430.1036.
15. I. Chiorescu, Y. Nakamura, C. J. P. M. Harmans, J. E. Mooij: *Coherent Quantum Dynamics of a Superconducting Flux Qubit.* In: Science 299 (2003), S. 1869–1871, doi:10.1126/science.1081045.
16. A. P. M. Place u. a.: *New material platform for superconducting transmon qubits with coherence times exceeding 0.3 milliseconds.* In: Nature Communications 12 (2021), 1779, doi:10.1038/s41467-021-22030-5.
17. M. P. Bland u. a.: *Millisecond lifetimes and coherence times in 2D transmon qubits.* In: Nature 647 (2025), S. 343–348, doi:10.1038/s41586-025-09687-4.

18. F. Arute u. a.: *Quantum supremacy using a programmable superconducting processor.* In: Nature 574 (2019), S. 505–510, doi:10.1038/s41586-019-1666-5.

19. P. J. Mohr, D. B. Newell, B. N. Taylor, E. Tiesinga: *CODATA recommended values of the fundamental physical constants: 2022.* In: Reviews of Modern Physics 97 (2025), 025002, doi:10.1103/RevModPhys.97.025002.

20. D. J. Fixsen: *The Temperature of the Cosmic Microwave Background.* In: The Astrophysical Journal 707 (2009), S. 916–920, doi:10.1088/0004-637X/707/2/916.

21. National Institute of Standards and Technology: *NIST Chemistry WebBook, SRD 69*, Einträge Stickstoff (Siedepunkt 77,3 K) und Helium (Siedepunkt 4,2 K), webbook.nist.gov.

22. S. Krinner u. a.: *Engineering cryogenic setups for 100-qubit scale superconducting circuit systems.* In: EPJ Quantum Technology 6 (2019), 2, doi:10.1140/epjqt/s40507-019-0072-0.

23. D. Loss, D. P. DiVincenzo: *Quantum computation with quantum dots.* In: Physical Review A 57 (1998), S. 120–126, doi:10.1103/PhysRevA.57.120.

24. B. E. Kane: *A silicon-based nuclear spin quantum computer.* In: Nature 393 (1998), S. 133–137, doi:10.1038/30156.

25. M. Veldhorst u. a.: *A two-qubit logic gate in silicon.* In: Nature 526 (2015), S. 410–414, doi:10.1038/nature15263.

26. C. Gidney: *How to factor 2048 bit RSA integers with less than a million noisy qubits.* Preprint, Mai 2025, arXiv:2505.15917.

27. P. Webster u. a.: *The Pinnacle Architecture: Reducing the cost of breaking RSA-2048 to 100 000 physical qubits using quantum LDPC codes.* Preprint, Februar 2026, arXiv:2602.11457.

Zitiervorschlag

quanten.de: *Festkörper-Quantencomputer: Wie supraleitende Qubits funktionieren.* Stand: Oktober 2026. URL: https://quanten.de/festkoerper_quantencomputer.html (PDF: https://quanten.de/pdf/festkoerper_quantencomputer.pdf)

Texte und Abbildungen © 2026 quanten.de. Nutzung mit Quellenangabe und Link gern, kommerzielle Nutzung nach Absprache: info@quanten.de

Weiterlesen: Quantencomputer einfach erklärt · Fermionen und Bosonen · Kernspintomographie

Online-Fassung mit aktualisierten Quellen: https://quanten.de/festkoerper_quantencomputer.html