

Halbleiter-Qubits voll funktionsfähig

Spin-Qubits auf Basis von Silizium zeigen eine vielversprechende Qualitätssteigerung.

Guido Burkard

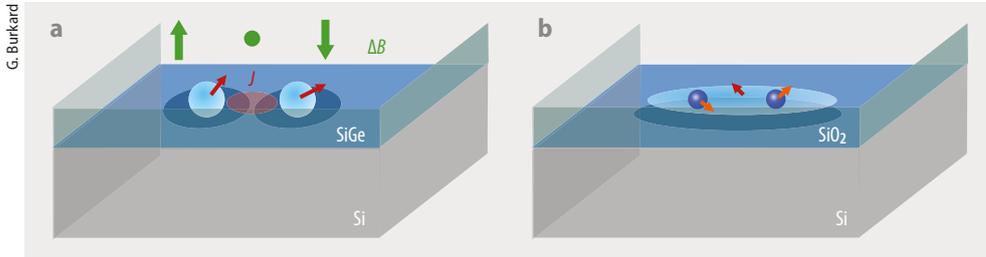


Abb. 1 Zwei Qubits lassen sich mit Elektronenspins realisieren (rot) [1, 2], die an der Grenzfläche zwischen Silizium- und Silizium-Germanium-Schichten in Quantendots lokalisiert sind. Die Austauschkopplung J erlaubt es in Verbindung mit dem Magnetfeldgradienten ΔB (grün), Quantengatter auf den beiden Spin-Qubits auszuführen (a). Zwei Kernspin-Qubits (orange) lassen sich durch ein drittes, elektronisches Spin-Qubit (rot) an der Grenzfläche von Silizium und Siliziumdioxid koppeln [3] (b).

Samuel Goudsmit, der mit George Uhlenbeck 1925 den Elektronenspin entdeckt hat, erinnerte sich, dass er dem Spin zunächst nicht die Werte $+1/2$ und $-1/2$ sondern 0 und 1 zugewiesen hatte. Vermutlich ein Zufall, in dem aber bereits das Bit als elementare Informationseinheit anklingt. Da der Elektronenspin quantenmechanisch beliebige Überlagerungen der Zustände $|0\rangle = |+1/2\rangle = |\uparrow\rangle$ und $|1\rangle = |-1/2\rangle = |\downarrow\rangle$ einnehmen kann, eignet er sich prinzipiell als Quantenbit (kurz Qubit).

Weil der Spin intrinsisch unempfindlich gegenüber dem elektrischen Feld und dessen Fluktuationen ist, hat er im Vergleich zu Ladungsfreiheitsgraden eine sehr lange Kohärenzzeit. Spin-Qubits lassen sich gezielt ansteuern und kontrollieren, wenn sich einzelne Elektronen an der Grenzfläche zweier Halbleitermaterialien in Quantenpunkten befinden. Atom- oder Ionenpins in Ionenfallen ermöglichen weitere Realisierungen ebenso wie Kernspins einzelner Defektatome oder Farbzentren im Festkörper. Die über den freien Induktionszerfall bestimmte inhomogene Kohärenzzeit T_2^* erreichte bei Elektronenspins in Quantendots in Silizium bisher 10 bis 100 Mikrosekunden. Die über das Hahn-Echo ermittelte Kohärenzzeit T_2 beträgt bei Elektronenspins etwa eine Sekunde und bei Kernspins über eine Stunde.

In drei gleichzeitig erschienenen Arbeiten ist es gelungen, die Qualität von Spin-Qubits und der darauf ausgeführten elementaren quantenmechanischen Rechenschritte so weit zu verbessern, dass sich die verbleibenden Fehler im Prinzip mit der „Surface Code“-Methode fortlaufend korrigieren lassen. Dabei nutzten die Gruppen um Seigo Tarucha am Forschungsinstitut RIKEN in Japan [1] und um Lieven Vandersypen an der TU Delft in den Niederlanden [2] die Spins von Elektronen in Quantendots (**Abb. 1a**), während beim Team von Andrea Morello an der University of New South Wales in Australien zwei Phosphor-Kernspins als Qubits

dienten, die an ein drittes, elektronisches Spin-Qubit gekoppelt waren [3] (**Abb. 1b**). Gemeinsam ist den drei Experimenten das Ausgangsmaterial Silizium.

Damit Quantencomputer die leistungstärksten klassischen Computer übertreffen, etwa bei der Faktorisierung großer Zahlen mit dem Shor-Algorithmus, braucht es allerdings Tausende perfekter Qubits, noch deutlich mehr reale Qubits wegen der für die Fehlerkorrektur notwendigen Redundanz. Da nehmen sich die zwei bis drei Spin-Qubits in Silizium in [1–3] und ein kürzlich vorgestellter Rechner mit sechs Spin-Qubits [4] bescheiden aus.

Neben der Anzahl der Qubits und ihrer Kohärenzzeit ist allerdings auch die Qualität der darauf ausführbaren Operationen, der „Quantengatter“ entscheidend. Die Güte (engl. fidelity) beschreibt, mit welcher Wahrscheinlichkeit ein Quantengatter korrekt ausgeführt wird. Für fehlertolerantes Rechnen muss die Güte über 99 Prozent betragen, also die Fehlerwahrscheinlichkeit unter einem Prozent liegen. Dies haben bisher die supraleitenden Qubits und atomaren Qubits in Ionenfallen erreicht.

Kurzgefasst

Reduzierte Obergrenze

Noch immer ist die absolute Masse des Neutrinos nicht bekannt, aber die KATRIN-Kollaboration hat jetzt die Obergrenze nochmals deutlich reduziert. Die Kombination aller bisherigen Datenruns des internationalen Experiments am Karlsruher Institut für Technologie ergibt einen Wert von $m_\nu < 0,8 \text{ eV } c^{-2}$ bei einem Konfidenzniveau von 90 %. Die striktere Obergrenze erlaubt es, einige Modelle zur Massenberechnung des Neutrinos auszusortieren. Das beeinflusst auch Simulationen zur Entwicklung unseres Universums und die Suche nach Physik jenseits des Standardmodells.

The KATRIN Coll., Nat. Phys. **18**, 160 (2022)

Der Sonne zugeordnet

Im italienischen Untergrundlabor Gran Sasso weist das Borexino-Experiment mit etwa 2000 Photomultipliern nach, wenn ein Neutrino mit etwa 280 Tonnen Flüssigszintillator reagiert. Nun ist es erstmals gelungen, die Richtungsinformation von Neutrinos mit weniger als 1 MeV Energie zu extrahieren und sie eindeutig der Sonne als Quelle zuzuordnen. Dazu kombinierte die Borexino-Kollaboration bei der Ereignisrekonstruktion das Cherenkov-Licht und die Szintillationsstrahlung.

M. Agostini et al. (Borexino Coll.), Phys. Rev. Lett. **128**, 091803 (2022) und Phys. Rev. D **105**, 052002 (2022)

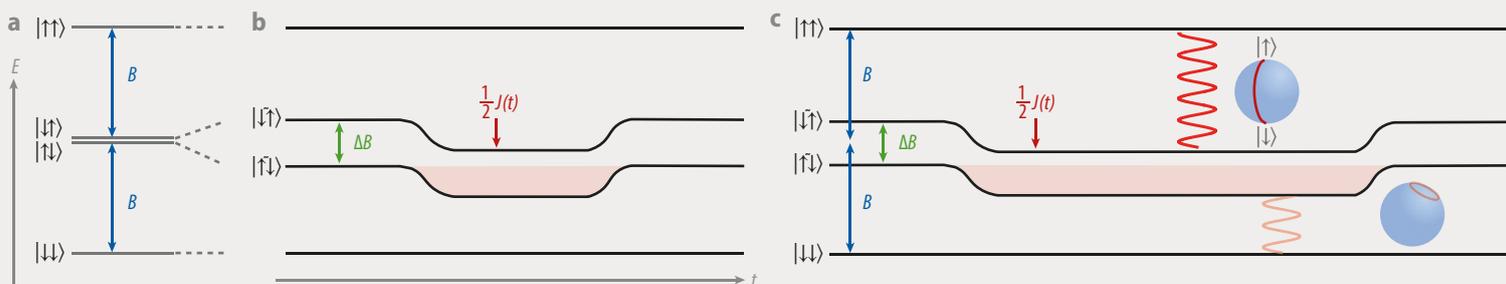


Abb. 2 Zwei Spin-1/2-Qubits ergeben vier unterschiedliche Spin-Einstellungen mit verschiedenen Energieniveaus (a): Das Magnetfeld B spaltet die Zustände mit parallelen Spins um die Zeeman-Energie $g\mu_B B$ von den Zuständen mit antiparallelen Spins ab. Im Magnetfeldgradienten ΔB hybridisieren die antiparallelen Spinzustände und spalten auf (b). Eine adiabatisch eingeschaltete Austauschwechselwirkung $J(t)$ senkt die Energie der antiparallelen Spinzustände ab, was eine relative Phase (rosa) zwischen den Zuständen paralleler und antiparalleler Spins erzeugt, die für das CZ-Quantengatter benötigt wird. Beim resonanten CNOT-Gatter wird bei eingeschalteter Austauschwechselwirkung durch Mikrowelleneinstrahlung (c, rote Wellenlinie) ein resonanter Übergang zwischen $|\downarrow\uparrow\rangle$ und $|\uparrow\uparrow\rangle$ getrieben (c),

der den ersten Spin (das Ziel-Qubit des CNOT-Quantengatters) umdreht, falls sich der zweite Spin (Kontroll-Qubit) im Zustand $|1\rangle = |\uparrow\rangle$ befindet. Die halbe Umdrehung des Ziel-Qubits entspricht einem logischen Nicht-Gatter und ist als rote Linie auf der Bloch-Kugel (blau) dargestellt. Mit kleiner Wahrscheinlichkeit wird jedoch durch nicht-resonante Anregung auch der Spin umgedreht, falls das Kontroll-Qubit im Zustand $|0\rangle = |\downarrow\rangle$ ist (blassrote Wellenlinie und untere Bloch-Kugel). Die nicht-resonante Anregung führt durch Synchronisation in derselben Zeit zu ganzzahlig vielen vollen Umdrehungen, sodass durch nicht-resonante Anregung kein Fehler entsteht. Die Dauer des Gatters ist außerdem so gewählt, dass die Phase (rosa) ein Vielfaches von 2π beträgt und somit ohne Auswirkungen bleibt.

Die drei neuen Arbeiten zeigen, dass sich die Fehlerwahrscheinlichkeit aller benötigten Quantengatter auch bei Spin-Qubits auf deutlich unter ein Prozent bringen lässt. Als weitere Anwendungen werden außerdem Quantenalgorithmen [1], eine digitale Quantensimulation [2] sowie die Herstellung eines verschränkten Zustands [3] auf der minimalen Skala von zwei bis drei Qubits demonstriert.

Neben der Fehlertoleranz fehlen allerdings noch ausreichend hohe Güten für das Präparieren und Auslesen von Quantenzuständen. Diese Anforderung erfüllen mit knapp 99 Prozent nur die Kernspin-Qubits [3] annähernd, wobei diese jedoch den Elektronenspin-Qubits in puncto Skalierbarkeit nicht ganz ebenbürtig sind. Einen experimentellen Quantenprozessor mit zwei Elektronenspin-Qubits in Silizium, der eine Güte von über 99 Prozent bei den Quantengattern mit einer Präparations- und Messgüte von 97 Prozent vereint, hat kürzlich die Gruppe von Jason Petta in Princeton vorgestellt [5].

Interessant ist das Verfahren, um Quantengatter zwischen Elektronenspins zu erzeugen und zu optimieren. Die Austauschwechselwirkung im Zusammenspiel mit einem Magnetfeldgradienten liefert ein kontrolliertes Phasengatter (CZ), das die für Quantenrechnungen benötigte Verschränkung produzieren kann [6] (Abb. 2a).

Durch adiabatisches Ein- und Ausschalten der Austauschkopplung im konstanten Gradientenfeld, das durch einen Mikromagneten auf dem Chip entsteht, erreicht die Delft-Gruppe ein CZ-Gatter (Abb. 2a, b). Eine Alternative ist die resonante Anregung im Gradientenfeld bei eingeschalteter Kopplung (Abb. 2c), die ein kontrolliertes Nicht-Gatter (CNOT) produziert, das ebenfalls für beliebige Quantenalgorithmen ausreicht [7]. Die erste Implementierung dieses Gatters hatte eine Güte von nur 80 Prozent, begrenzt durch Auslesefehler sowie unbeabsichtigte nichtresonante Anregungen [8] (Abb. 2c). Eine Synchronisationsbedingung kann dies jedoch eliminieren [7], wie nun die Gruppe aus Tokio gezeigt hat [1].

Denkt man an die Milliarden von Transistoren auf modernen Siliziumchips, erklärt sich die begründete Hoffnung, dass auch die Zahl der Qubits in Halbleiter-Quantenprozessoren bald anwachsen wird. Doch für die Spin-Qubits stellen sich noch viele grundlegende und technische Fragen.

Eine Herausforderung besteht zum Beispiel in der kurzen Reichweite der Austauschwechselwirkung zwischen Elektronenspins in benachbarten Quantendots bzw. der Hyperfeinwechselwirkung zwischen Elektronen- und Kernspins. Die Austauschwechselwirkung erlaubt es, schnelle Quantengatter zwischen benachbar-

ten Qubits zu erzeugen. Quantenalgorithmen und -fehlerkorrektur mit Gattern zwischen nicht-benachbarten Qubits kann die Austauschwechselwirkung nicht direkt leisten. Dazu braucht es andere physikalische Prozesse wie den sequenziellen Austausch der Spinzustände, den Transport von Elektronen auf dem Chip durch „Elektronen-Shuttling“ [9] oder die Ankopplung an einzelne Photonen in einem auf dem Chip angebrachten supraleitenden Mikrowellenresonator. Die Kopplung entfernter Kernspins ist noch schwieriger, da diese ortsfest sind und ein viel schwächeres magnetisches Moment besitzen. Hier ließe sich der Elektronenspin als Mediator von Wechselwirkungen zwischen den Kernspins verwenden [3].

[1] A. Noiri et al., Nature **601**, 338 (2022)
 [2] X. Xue et al., Nature **601**, 343 (2022)
 [3] M. T. Mądzik et al., Nature **601**, 348 (2022)
 [4] S. G. J. Philips et al., arXiv:2202.09252 (2022)
 [5] A. R. Mills et al., arXiv:2111.11937 (2021)
 [6] G. Burkard et al., Phys. Rev. B **60**, 11404 (1999)
 [7] M. Russ et al., Phys. Rev. B **97**, 085421 (2018)
 [8] D. M. Zajac et al., Science **359**, 439 (2018)
 [9] I. Seidler et al., arXiv:2108.00879 (2021)

Der Autor

Prof. Dr. Guido Burkard, Universität Konstanz, Fachbereich Physik, Fach 685, 78457 Konstanz