Check for updates

DOI: 10.1002/piuz.202501730

Silizium-Halbleitertechnologie für Quantencomputer

Quantenrechnen mit Spins

Irina Heinz | Guido Burkard

Derzeit liefern sich verschiedene Technologien ein Wettrennen auf dem Weg zu einem universellen Quantencomputer. Neben supraleitenden Qubits, Ionenfallen, Neutralatomen in Lichtgittern sowie Farbzentren in Diamanten sind nun auch Halbleiter-Spinqubits auf dem Vormarsch. Sie basieren auf Silizium als Basismaterial und sind wegen ihrer geringen Größe gut skalierbar, zudem materialtechnisch kompatibel mit der etablierten Halbleitertechnologie. Dabei werden über Elektroden die Spins einzelner Elektronen kontrolliert. Solche Qubits erweisen sich als sehr langlebig. Diese Eigenschaften machen Spinqubits attraktiv, allerdings müssen noch Hindernisse überwunden werden.

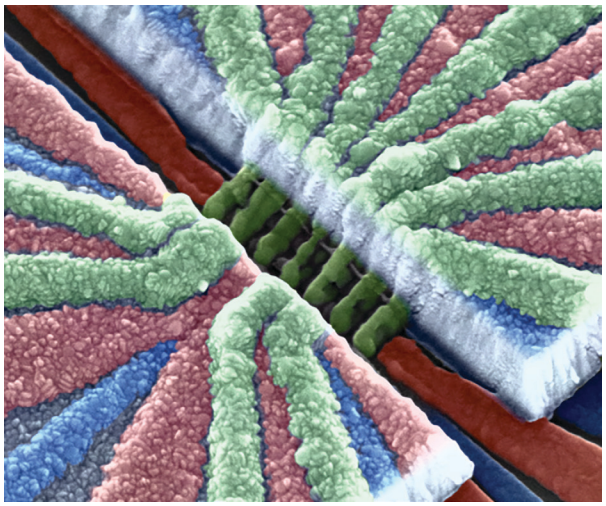


Bild: A. Mills [9]

Seit der Erfindung des ersten Transistors folgt die Halbleitertechnologie dem Mooreschen Gesetz, bei der die Anzahl der Transistoren auf einem Chip sich etwa alle zwei Jahre verdoppelt (Abbildung 1) [1-11]. Heute befinden sich schließlich mehrere Milliarden davon auf den Prozessoren in unseren Laptops und Smartphones. Möglich war diese Entwicklung durch ihre immer kleiner werdenden Abmessungen bis hinunter in die Nanometer-Skala. Wenn diese Strukturen allerdings vergleichbar mit der Größe eines Atoms werden, deren Durchmesser in der Größenordnung von Zehntelnanometern liegt, treten quantenmechanische Effekte in den Vordergrund und verändern deren elektronischen Eigenschaften. Nach dem Motto „It',s not a bug, it's a feature" sind daraus neue Gebiete in der Halbleiterphysik – die Spintronik und andere Quantentechnologien – entstanden. Diese verwenden die Gesetze der Quantenmechanik für die Entwicklung von Bauteilen wie Datenspeichern bis hin zu Quantencomputern.

Analog zu einem klassischen Computer, der als Recheneinheit das klassische Bit (0 oder 1) verwendet, basiert der Quantencomputer auf dem Quantenbit, kurz Qubit, das anders als das Bit auch Überlagerungen oder *Superpositionen* der Zustände 0 und 1 annehmen kann. Diese können als Vektoren (Pfeile), die auf einen Punkt auf der sogenannten Bloch-Kugel zeigen, verstanden werden, wobei jede Operation in Form von Quantengattern eine Drehung auf dieser Kugel darstellt (siehe „Quantengatter und die Bloch-Kugel" auf S. 4).

Zusätzlich wird beim Quantenrechnen das Prinzip der *Verschränkung* ausgenutzt, das seit der Formulierung der Quantenmechanik für Diskussionen gesorgt hat und selbst Einstein an der Quantenmechanik zweifeln ließ. Dabei bringt man zwei quantenmechanische Objekte in einen Zustand, bei dem sie sich eine Information „teilen". Sie sind also miteinander verschränkt und behalten eine gegenseitige Abhängigkeit, unabhängig von ihrer Entfernung zueinander. Unter anderem seit der Entdeckung eines Quantenalgorithmus für eine schnellere Primfaktorzerlegung durch Peter Shor versprechen diese beiden Konzepte effizientere Algorithmen für bestimmte mathematische Aufgabenstellungen, aber auch effizientere Simulationen von Molekülen in der Chemie und Medizin (siehe „Wozu brauchen wir Quantenrechner?" auf S. 7).

Systemvielfalt für Quantenprozessoren

Seither wird weltweit an der Realisierung von Quantenprozessoren in verschiedenen physikalischen Systemen geforscht. Eine der prominentesten Varianten stellen die supraleitenden Schaltkreise dar. Die Implementierung supraleitender Qubit-Varianten benötigt sehr tiefe Temperaturen, im Bereich von Millikelvin, sodass widerstandslos fließende Ströme und der Einsatz von speziellen elektronischen Bauteilen möglich sind. Das große Interesse

This is an open access article under the terms of the Creative Commons Attribution License, which permits use, distribution and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Online-Ausgabe unter: wileyonlinelibrary.com

© 2025 The Author(s). Physik in unserer Zeit published by Wiley-VCH GmbH

Konstanzer Online-Publikations-System (KOPS)
URL: http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:bsz:352-2-o7fwmqr1j7f74

an dieser Art von Qubit zeigt sich unter anderem in den Bemühungen großer Techkonzerne wie Google und IBM, die bereits mit Quantenprozessoren mit über 100 Qubits werben und die Überlegenheit des Quantenprozessors gegenüber klassischen Rechnern zeigen konnten [12] (siehe Physik in unserer Zeit **2021**, *52*(1), 12).

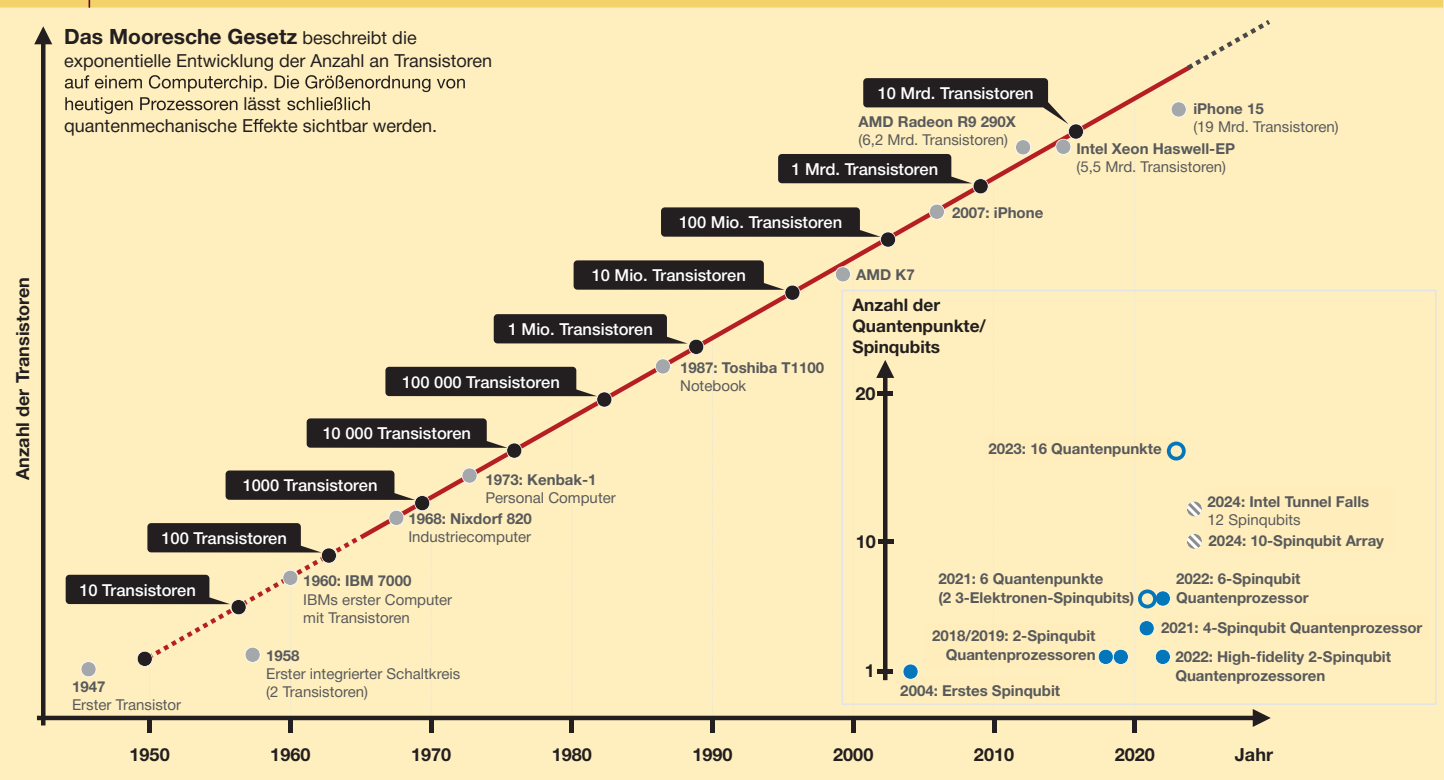
Weitere etablierte Plattformen sind Ionenfallen und Diamantzentren, bei denen jeweils die Energieniveaus in einem Ion oder Atom verwendet werden und mithilfe von Laserpulsen oder Mikrowellen adressiert werden können. Diese zeichnen sich durch ihre besonders lange Lebensdauer aus und können bei Raumtemperatur betrieben werden. Auch die Beweglichkeit der Qubits in Ionenfallen und die weitreichende Kopplung zwischen verschiedenen Ionen ermöglichen eine flexible Konnektivität der Qubits. Allerdings sind die Gatterzeiten für einzelne Operationen vergleichsweise lang.

Auch einzelne Lichtquanten, sogenannte Photonen, bieten eine Plattform für das Quantenrechnen. Dabei werden Einzelphotonenquellen, Lichtwellenleiter und weitere optische Bauelemente auf einem Chip integriert. Trotz der Vorteile hinsichtlich der Skalierung mithilfe von herkömmlichen Glasfaserkabeln gilt es unter anderem, den Verlust der einzelnen Photonen zu minimieren. Gute Skalierbarkeit versprechen Neutralatome in magnetooptischen Fallen als Qubits, dort ist schon die Kontrolle von mehreren tausend Qubits mittels Laserpinzetten demonstriert worden, aber diese Technologie steht ebenfalls noch vor physikalischen und technischen Herausforderungen, die gelöst werden müssen.

Langfristig wird die Anzahl der Qubits auf einem Chip limitiert durch die Größe der Einzelkomponenten, die sowohl für supraleitende Qubits als auch für Ionenfallen und Diamantzentren eine Herausforderung werden wird. Supraleitende Qubits sind, wie erwähnt, zusätzlich auf die sogenannte „Cooling-Power“ von herkömmlichen Kryostaten, also die Leistung der Kühlgeräte, angewiesen. Ein großes Problem stellt die derzeit noch benötigte Vielzahl von Kabelzuführungen dar, die thermisch isoliert werden müssen.

Eine Alternative zu den früh etablierten Qubitarten schlugen Daniel Loss von der Universität Basel und David DiVincenzo vom IBM Forschungszentrum in Yorktown Heights, USA, im Jahre 1997 vor [13]: Der Spin eines einzelnen Ladungsträgers in Halbleitern, eingesperrt in einem Quantenpunkt, soll als Qubit dienen. 2004

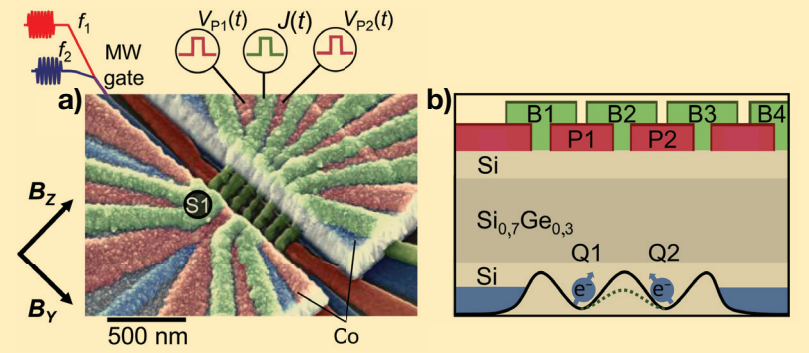
ABB. 1 | MOORESCHES GESETZ



Das Mooresche Gesetz der klassischen Halbleiterelektronik scheint an seinen Grenzen angelangt, wenn die Größe von Transistoren derjenigen einzelner Atome entspricht. Quantenmechanische Gesetze treten dann in den Vordergrund. Halbleiter-Spinqubits machen sich die Quantenphysik zu Nutze. Die Entwicklung der Spinqubits der letzten Jahren ist zum Vergleich unten rechts abgebildet [1-11]. Dabei ist die Anzahl der Quantenpunkte, die mit einzelnen Elektronen gefüllt sind, als leere Kreise dargestellt. Die gestreift ausgefüllten Punkte stellen einzeln operierende Spinqubits und die aufgefüllten Punkte voll funktionsfähige Spinqubits dar.

© 2025 The Author(s). Physik in unserer Zeit published by Wiley-VCH GmbH

ABB. 2 | SPINQUBITS

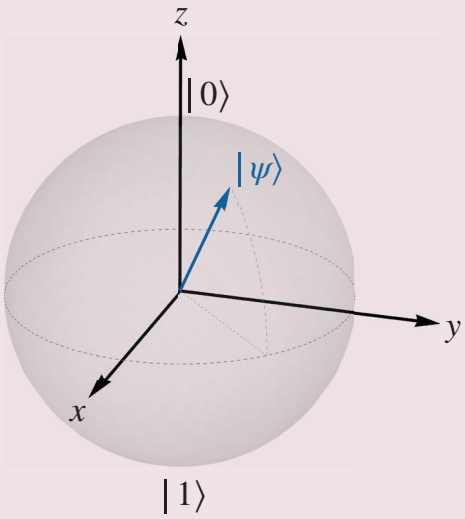


Experimentelle Realisierung von Spinqubits einer Forschungsgruppe an der Princeton University [9]. Die linke Abbildung a) zeigt eine eingefärbte Draufsicht und die rechte Abbildung b) einen schematischen Querschnitt eines Quantenchips. Elektronen an der Silizium-Germanium-Grenzschicht sind unter den „Plunger Gates" (rot, P1 und P2) eingefangen und bilden Qubits Q_1 und Q_2; die Spannungsbarrieren zwischen zwei Quantenpunkten können durch die „Barrier Gates" (grün, B1-4) kontrolliert werden. Für eine individuelle Adressierbarkeit wird ein Magnetfeldgradient (B_z und B_y) von einem Mikromagneten aus Cobalt (Co) erzeugt, der über den Elektroden liegt. Für Qubitoperationen werden Mikrowellenpulse (f_1 und f_2) verwendet, die hier über eine weitere Spannungselektrode (MW gate) erzeugt werden. Für Zwei-Qubit-Gatter werden entsprechende Spannungspulse (V_{P1}, J, V_{P2}) auf den Elektroden verwendet. Das Auslesen der Quanteninformation erfolgt über einen weiteren Quantenpunkt, der als Sensor (S1) dient.

schließlich wurden die ersten Experimente in Galliumarsenid demonstriert [14, 15]. Diese Quantenpunkte, die im Unterschied zu Transistoren als mikroskopisch kleine „Fallen" für einzelne Elektronen dienen, werden heutzutage in Silizium und Germanium in Form von Heterostrukturen, Nanodrähten oder mithilfe der Dotierung einzelner Atome gefertigt. Insbesondere vom jahrzehntelangen Know-how bestehender Halbleiter-Technologie-Konzerne profitieren Spinqubits, denn die etablierten Prozesse erlauben die Herstellung von Quantenpunkten mit einer Ausdehnung von nur etwa 20-100 nm. Im Prinzip ermöglicht dies eine Fabrikation von Millionen von Quantenpunkten auf einer sehr kleinen Fläche auf einem Halbleiterchip, was somit die Halbleiter-Spinqubits besonders skalierbar macht. Auch Spinqubits operieren bei tiefen Temperaturen, sind aber bei hunderten Millikelvin bis hin zu einigen Kelvin deutlich einfacher zu handhaben als supraleitende Qubits [16, 17].

Die Anforderungen an einen Quantencomputer werden in den DiVincenzo-Kriterien [18] festgehalten, die eine Möglichkeit zum Initialisieren, Manipulieren und Auslesen von Qubits fordern. Außerdem benötigen Qubits eine lange Lebenszeit im Vergleich zu der Zeit, die erforderlich ist, um Gatteroperationen durchzuführen. Schließlich braucht ein nützlicher Quantencomputer viele Qubits, sodass eine Plattform skalierbar sein muss. Die Qualität von Qubits wird üblicherweise über die Fidelity definiert. Diese gibt die Wahrscheinlichkeit an, dass eine elementare Rechenoperation korrekt ausgeführt wird, und beträgt idealerweise 1. In realistischen physikalischen Systemen, deren Gatter-Fidelity hoch genug ist, können durch

QUANTENGATTER UND DIE BLOCH-KUGEL



Ein Zustand $|\psi\rangle$ kann als Bloch-Vektor auf der Bloch-Kugel mit Radius eins aufgefasst werden, auf der die Pole den Eigenzuständen $|0\rangle$ und $|1\rangle$ entsprechen. Ein-Qubit-Gatter werden durch Drehungen des Blochvektors auf der Kugel beschrieben. In Spinqubits sind alle Drehachsen in der x-y-Ebene durch Anpassung der Phasenverschiebung im Signal möglich.

Während sich ein klassisches Bit in genau einem von zwei möglichen Zuständen 0 und 1, also Strom oder kein Strom im Transistor, befindet, erlaubt ein Qubit jede mögliche Überlagerung zweier quantenmechanischer Eigenzustände $|0\rangle$ and $|1\rangle$. Ein solcher überlagerter Zustand wird beschrieben durch $|\psi\rangle = \alpha|0\rangle + \beta|1\rangle$, wobei $|\alpha|^2$ und $|\beta|^2$ die Wahrscheinlichkeiten für die Messung der entsprechenden Zustände sind.

Anschaulich kann $|\psi\rangle$ als Vektor auf der sogenannten Bloch-Kugel mit Radius 1 (Abbildung) dargestellt werden. Dabei beschreibt der nach oben gerichtete Vektor den Zustand $|0\rangle$ und der nach unten gerichtete Vektor entsprechend den Zustand $|1\rangle$. Jeder andere Punkt auf der Bloch-Kugel entspricht einer Überlagerung der beiden. Ein Ein-Qubit-Gatter basiert dann auf einer Rotation dieses Bloch-Vektors auf der Bloch-Kugel. Zwei linear unabhängige Drehachsen reichen aus, um jede beliebige Drehung zu konstruieren.

Beim Spinqubit wird eine Rotation um die x-Achse durch ein oszillierendes Magnetfeld $B(t) \propto \cos(\omega t + \phi)$ erzeugt. Mithilfe der Phasenverschiebung ϕ im Signal kann jede Drehachse in der x-y-Ebene erreicht werden. Bei einer Messung des Qubits wird der Bloch-Vektor schließlich auf einen der beiden Eigenzustände, also auf den Nord- oder Südpol, projiziert. In der Realität sind Qubits den Einflüssen der Außenwelt ausgesetzt, die zu Relaxation und Dephasierung des Qubits führen. Diese Prozesse können als Schrumpfen beziehungsweise Deformation der Boch-Kugel aufgefasst werden [23].

© 2025 The Author(s). Physik in unserer Zeit published by Wiley-VCH GmbH

Hinzufügen von zusätzlichen Hilfsqubits Fehler erkannt und eine Fehlerkorrektur angewendet werden, um einen funktionierenden Quantencomputer zu erhalten.

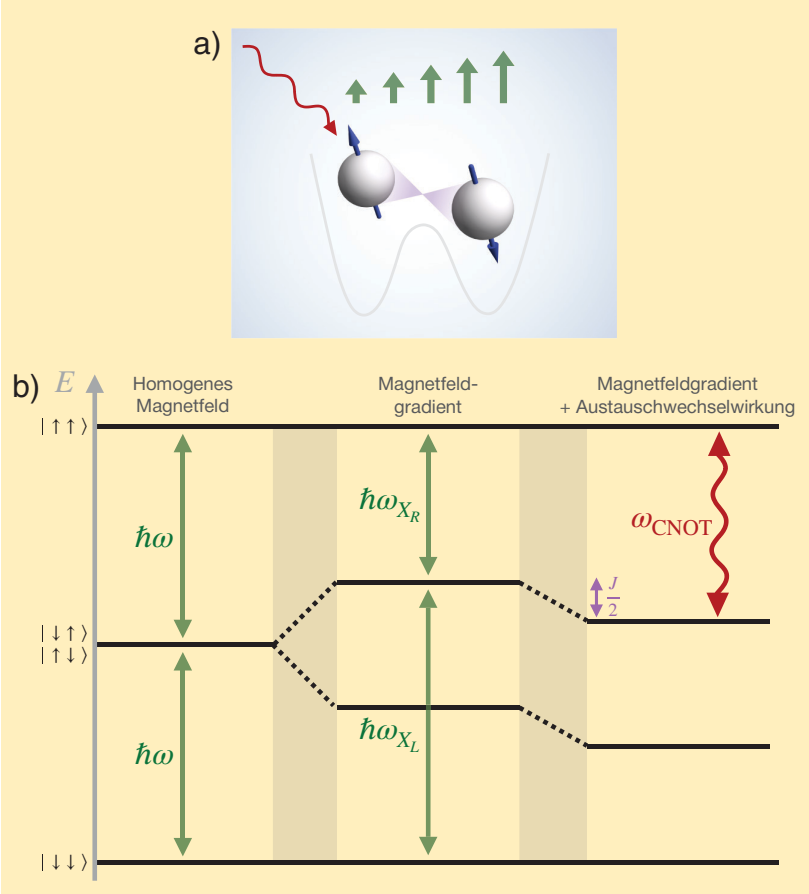
Das Spinqubit

Um ein Spinqubit zu realisieren, wird ein einzelner Ladungsträger, also ein Elektron oder ein Loch (fehlendes Elektron), in einem Quantenpunkt eingefangen. Möglich wird das durch eine Schichtung verschiedener Materialien, wie zum Beispiel Si/SiGe, Ge/SiGe oder Si/SiO_2, die durch ihre verschiedenen Bandenergien ein zweidimensionales Elektronengas an der Grenzfläche erzeugen. Quantenpunkte entstehen durch das Anlegen verschiedener Spannungen an den Elektroden auf dem Material (Abbildung 2), sodass einzelne Ladungsträger in einem Potentialtopf gefangen sind. Eine weitere Möglichkeit für das Erzeugen eines Quantenpunktes ist das Dotieren einzelner Atome, wie etwa Phosphor in Silizium. Ein globales Magnetfeld spaltet die Spinzustände Spin-up $|\uparrow\rangle$ und Spin-down $|\downarrow\rangle$ des Elektrons und erzeugt ein Qubit, das heißt ein Quantensystem mit zwei unterscheidbaren Zuständen.

Ein Ein-Qubit-Gatter ist im Wesentlichen eine Rotation des Spins (siehe „Quantengatter und die Bloch-Kugel“), die durch ein mit der Qubitfrequenz oszillierendes Magnetfeld erfolgt. Dieses kann direkt durch einen mit einem oszillierenden Strom durchflossenem Draht erzeugt werden, was den Spin über die Elektronenspinresonanz (ESR) rotiert. Alternativ kann der Ladungsträger mithilfe von elektrisch oszillierenden Feldern an den Spannungselektroden in einem inhomogenen Magnetfeld bewegt werden, sodass der Spin effektiv ein oszillierendes Magnetfeld erfährt, die Elektrische Dipolspinresonanz (EDSR). In Germanium kommt das veränderliche Magnetfeld durch die dort herrschende starke Spin-Bahn-Wechselwirkung zustande, in Materialien mit schwacher Spin-Bahn-Wechselwirkung wie Silizium kann sie künstlich durch einen auf dem Chip angebrachten Mikromagneten erzeugt werden (Abbildung 2 links). Ein inhomogenes Magnetfeld sorgt außerdem für unterschiedliche Energieaufspaltungen in verschiedenen Quantenpunkten und somit für eine individuelle Adressierbarkeit der Qubits (Abbildung 3 rechts).

Universelles Quantenrechnen benötigt zusätzlich zu allen möglichen Rotationen jeweils eines Qubits auf der Bloch-Kugel noch ein Zwei-Qubit-Gatter, das eine Verschränkung zweier Qubits erzeugen kann. Dazu kann die Spannungsbarriere zwischen zwei Ladungsträgern verringert werden, wodurch sich deren Wellenfunktionen überlappen. Dies resultiert in der Austauschwechselwirkung zwischen den beiden Spins. Über diese lässt sich ein Zwei-Qubit-Gatter erzeugen, entweder durch präzises Timing oder durch ein zusätzlich angelegtes oszillierendes Feld, das den gewünschten Übergang resonant antreibt. Letzteres wird in Abbildung 3 veranschaulicht.

ABB. 3 | ZWEI-QUBIT-GATTER



a) Schematische Illustration zweier Spins in je einem Quantenpunkt während eines Zwei-Qubit-Gatters und b) die zugehörige Energieaufspaltung der Spinzustände. In einem homogenen Magnetfeld haben alle Qubits die gleiche Zeeman-Aufspaltung $\hbar\omega$ der Energieniveaus. In einem Magnetfeldgradienten besitzen die Spin-up- und Spin-down-Zustände im linken und rechten Qubit eine unterschiedliche Energiedifferenz ($\hbar\omega_{XL}$ und $\hbar\omega_{XR}$). Dadurch sind Rotationen der individuellen Qubits um die x-Achse möglich. Ein zusätzliches Einschalten der Austauschwechselwirkung ermöglicht bei einer eindeutigen Frequenz ω_{CNOT} ein kontrolliertes NOT-Gatter (CNOT), das den linken Spin dreht, falls der rechte im Zustand Spin-up ist.

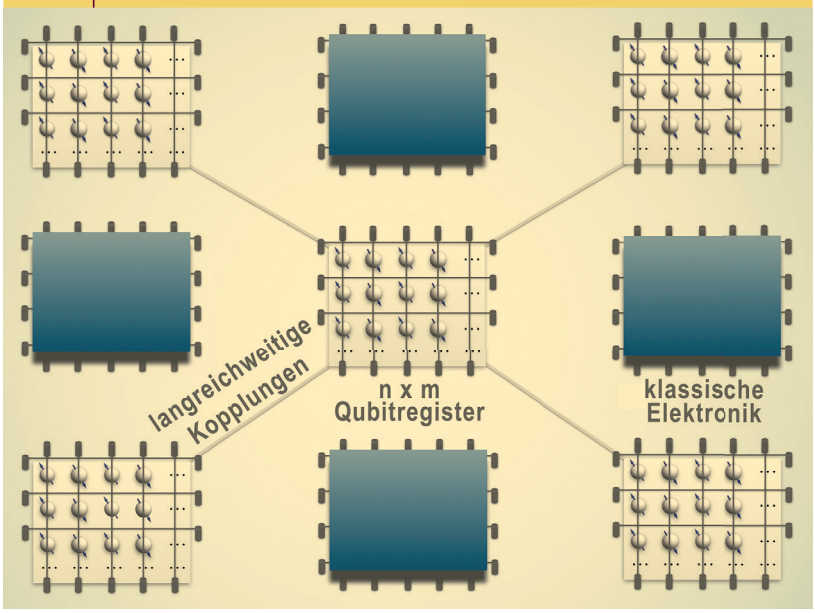
Herausforderungen bei der Realisierung

Wie in allen Qubitplattformen gibt es auch bei den Spinqubits noch einige Herausforderungen, die es zu überwinden gilt, bevor der Bau eines brauchbaren Quantenprozessors möglich wird. Die unerwünschte Relaxation vom Spin-up- zum Spin-down-Zustand spielt in Spinqubits nur eine untergeordnete Rolle. Vielmehr sorgen Fluktuationen in den elektrischen Spannungen auf den Elektroden sowie Veränderungen im Magnetfeld, etwa durch Kernspins im Material, für Änderungen der Zeeman-Aufspaltung. Die Folge ist eine Dephasierung der Spins. Durch Unregelmäßigkeiten in der Materialstruktur kann eine zusätzliche Verfälschung der im Spin gespeicherten Information entstehen.

Die sich stetig verbessernde Qualität der verwendeten Materialien und die präzise Fertigung von

© 2025 The Author(s). Physik in unserer Zeit published by Wiley-VCH GmbH

ABB. 4 | CHIP MIT QUANTENREGISTERN



***Mögliches Chiplayout** [19]: Hier sind verschiedene Quantenregister der Größe n × m durch weitreichende Kopplungen miteinander verbunden. Kontrolliert werden sie über klassische Elektronikbausteine, die auf diesem Chip in den Zwischenräumen untergebracht sind.*

Quantenchips zeigten in den letzten Jahren diesbezüglich Fortschritte. Da allerdings durch Mikrowellen, die Ein-Qubit-Gatter ermöglichen, Wärme auf dem Chip erzeugt wird, kann die steigende Temperatur auch die Eigenschaften des Qubits verändern. Jüngste Ergebnisse einer australischen Forschungsgruppe der University of New South Wales (UNSW) sowie eine Kollaboration der Universität Basel und des IBM Forschungslabors in Zürich zeigen allerdings, dass es möglich ist, Spinqubits bei Temperaturen bis hinauf zu 4 K zu betreiben.

Für Quantengatter aus einzelnen Qubits in einem größeren Quantenregister gilt es außerdem, den Effekt auf umliegende Nachbarn, den sogenannten Crosstalk, zu minimieren – beispielsweise durch Synchronisation benachbarter Spinrotationen und optimale Kontrollpulse. Für die Skalierbarkeit von Spinqubits stellt die Verdrahtung und die Integration von sowohl quantenmechanischen als auch klassischen elektronischen Bauelementen eine Herausforderung dar. Diese kann mithilfe von langreichweitigen Verbindungen zwischen kleineren quantenmechanischen Registern gelöst werden (Abbildung 4) [20]. Solche weitreichenden Kopplungen können in Form von supraleitenden Resonatoren oder über das kontrollierte Verschieben von einzelnen Ladungsträgern, das sogenannte Shuttling, implementiert werden. Die ersten experimentellen Realisierungen unter anderem an der RWTH Aachen machen Hoffnung auf eine erfolgreiche Integration solcher Bauelemente auf zukünftige Quantenchips [20, 21].

Aktueller Stand und Ausblick

Seit den ersten Pionierexperimenten in GaAs hat sich viel getan. Heute werden überwiegend siliziumbasierte Plattformen verwendet, da hochreines ^{28}Si eine um Größenordnungen längere Kohärenzzeit von Spinqubits ermöglichen, die bis hin zu einigen Millisekunden reicht – in einigen Fällen sogar bis zu Sekunden. Auch germaniumbasierte Spinqubits zeigen neuerdings vielversprechende Ergebnisse dank der reichhaltigen Physik und Flexibilität des Materials. Längst tragen nicht mehr nur akademische Forschungsgruppen dazu bei, geeignete Quantenprozessoren in Halbleitern herzustellen, sondern auch neue Start-up-Unternehmen und die etablierte Halbleiterindustrie mit ihren komplexen Fabrikationsprozessen.

Die Güte der Ein-Qubit-Gatter überschritt bereits im Jahr 2019 die Marke von > 99 %, seit 2022 erreichen auch die Zwei-Qubit-Gatter diesen Gütebereich. Damit ist der Weg frei für die Implementierung von ganzen Quantenregistern, die mithilfe von Quantenfehlerkorrektur nützliche Quantenprozessoren hervorbringen sollen. Die aktuell größten Register eines Teams von der TU Delft enthalten 16 Quantenpunkte, die in einem zweidimensionalen 4×4-Array angeordnet sind. Der bislang größte voll funktionsfähige Spinqubit-Quantenprozessor enthält sechs Qubits in einer linearen Anordnung. Beide Architekturen basieren auf einer Konnektivität zu nächsten Nachbarn, die über Zwei-Qubit-Gatter miteinander wechselwirken können.

Trotz des hervorragenden Fortschritts und der exzellenten Ergebnisse der letzten Jahrzehnte gibt es noch einige ungeklärte Fragen. Unter anderem gilt es, die Kopplung von Spinqubits mit der Umgebung und deren Korrelationen sowie den Einfluss der Temperatur besser zu verstehen. Zudem braucht es in Zukunft raffinierte Chipdesigns für die Integration der gesamten benötigten Elektronik inner- und außerhalb des Kryostaten.

Auch die Kodierung der Qubitzustände in komplexeren Spinsystemen kann durch eine andere Anzahl an Quantenpunkten und Spins pro Qubit variiert und robust gegenüber einigen Fehlerquellen konzipiert werden. So ist beispielsweise ein sogenanntes Exchange-Only-Qubit mit drei Elektronenspins in jeweils einem Quantenpunkt robust gegenüber einer globalen Fluktuation des Magnetfeldes und benötigt keine Mikrowellen-Pulse. Durch alternative Implementierung eines Spinqubits kann Information auch über andere Mechanismen gekoppelt und manipuliert werden. So kann zum Beispiel ein Flopping-Mode-Qubit, bei dem sich zwei Quantenpunkte einen Ladungsträger teilen, an das elektromagnetische Feld von Photonen koppeln und somit weitreichende Kopplungen ermöglichen [22].

Da die Wahl des Materials entscheidend für die quantenmechanische Beschreibung des Spins und seiner Umgebung ist, wird weiterhin an der Zusammensetzung der Komponenten auf dem Chip geforscht. Auch die Minimierung von Fehlern durch maßgeschneiderte Error-Mitigation-Protokolle zur Fehlerbegrenzung bis hin zum optimierten Schema für die Quantenfehlerkorrektur werden die Zukunft der Spinqubits maßgeblich mitbestimmen.

© 2025 The Author(s). Physik in unserer Zeit published by Wiley-VCH GmbH

WOZU BRAUCHEN WIR QUANTENRECHNER?

In Zeiten von Hochleistungsrechnern und Maschinenlernen stellt sich die berechtigte Frage: Was kann ein Quantenrechner, was ein klassischer Rechner nicht kann? Neben der Überlagerung von quantenmechanischen Zuständen trägt vor allem die Verschränkung quantenmechanischer Systeme zu einer besseren Rechenleistung im Vergleich zu klassischen Rechnern bei.

Mithilfe dieser beiden fundamentalen Konzepte sind effizientere Algorithmen für beispielsweise die Faktorisierung von Primzahlen zum Entschlüsseln von verschlüsselten Daten mit dem Shor-Algorithmus sowie das Suchen von Elementen in unsortierten Datensätzen mit dem Grover-Algorithmus möglich. Obwohl die Überlegenheit von Quantenrechnern gegenüber klassischen Rechnern bereits demonstriert wurde, werden jedoch noch deutlich mehr Qubits und niedrigere Fehlerraten notwendig sein, um sie für komplexe Problemstellungen in der Praxis zu verwenden.

Ein weiteres Anwendungsgebiet für Quantenrechner stellt die Molekülforschung und Medizin dar. Bereits Feynman erkannte, dass quantenmechanische Systeme, wie Moleküle, am besten auch durch quantenmechanische Systeme beschrieben und simuliert werden können. Damit könnten Moleküleigenschaften für die Chemie und Medizin mithilfe von Quantenrechnern besser und schneller erforscht werden. Bereits heute werden erste Anwendungen dazu untersucht.

Zusammenfassung

Halbleiter-Spinqubits gelten als vielversprechende Kandidaten für die Recheneinheit eines Quantencomputers. Um ein Spinqubit zu realisieren, wird ein einzelner Ladungsträger, ein Elektron oder ein Ladungsträgerloch, in einem Quantenpunkt eingefangen. Dort sind ihre Spins über lokal erzeugte Magnetfelder zwischen zwei Zuständen 0 und 1 kontrollierbar. Auf Basis solcher Quantenpunkte gestatten die etablierten Fabrikationstechniken der Halbleiterindustrie eine präzise und skalierbare Herstellung von Quantenprozessoren. Sowohl Ein-Qubit-Gatter als auch Zwei-Qubit-Gatter mit Spinqubits operieren mit hoher Genauigkeit und ermöglichen so universelles Quantenrechnen. Wichtig sind dabei ihre hohen Lebensdauern im Bereich von Mikrosekunden bis sogar Sekunden. Die Anzahl an Spinqubits auf einem Chip ist besonders in den letzten Jahren gewachsen. Die Möglichkeit, Spinqubits auf verschiedene Weisen miteinander zu koppeln, erlaubt auch langreichweitige Operationen zwischen verschiedenen Registern. Es gilt, Korrelationseffekte zwischen Spinqubits und ihrer Umgebung noch besser zu verstehen und die Verdrahtung auf dem Chip zu optimieren, um so den Weg zu einem halbleiterbasierten Quantencomputer zu ebnen.

Stichwörter

Halbleiter-Spinqubit, Halbleitertechnologie, Germanium, Silizium, halbleiterbasierter Quantencomputer, skalierbarer Quantenprozessor, Quantenpunkt, universelles Quantenrechnen, Ein-Qubit-Gatter, Zwei-Qubit-Gatter.

Danksagung

Open-Access-Veröffentlichung ermöglicht und organisiert durch Projekt DEAL.

Literatur

[1] T. F. Watson et al. Nature **2018**, *555*, 633.
[2] D. M. Zajac et al., Science **2018**, *359*, 439.
[3] W. Huang et al., Nature **2019**, *569*, 532.
[4] W. Ha et al., Nano Letters **2022**, *22*(3), 1443.
[5] N. W. Hendrickx et al., Nature **2021**, *591*, 580.
[6] S. G. J. Philips et al., Nature **2022**, *609*, 919.
[7] A. Noiri et al., Nature **2022**, *601*, 338.
[8] X. Xue et al., Nature **2022**, *601*, 343.
[9] A. R. Mills et al., Science **2022**, *8*, eabn5130.
[10] V. John et al., arXiv:2412.16044, **2024**.
[11] H. C. George et al., Nano Lett. **2025**, *25*, 2, 793.
[12] F. Arute et al., Nature **2019**, *574*, 505.
[13] D. Loss, D. P. DiVincenzo, Phys. Rev. A **1998**, *57*, 120.
[14] J. M. Elzerman et al., Nature **2004**, *430*, 431.
[15] G. Burkard et al., Rev. Mod. Phys. **2023**, *95*, 025003.
[16] L. C. Camenzind et al., Nature Electronics **2022**, *5*, 178.
[17] J. Y. Huang et al., Nature **2024**, *627*, 772.
[18] D. P. DiVincenzo, Fortschritte der Physik **2000**, *48*, 9.
[19] L. M. K. Vandersypen et al., npj Quant. Inf. **2017**, *3*, 34.
[20] R. Xue et al., Nature **2024**, *15*, 2296.
[21] F. Borjans et al., Nature **2020**, *577*, 195.
[22] M. Benito, J. R. Petta, G. Burkard, Phys. Rev. B **2019**, *100*, 081412(R).
[23] M. A. Nielsen, I. L. Chuang, Quantum Computation and Quantum Information, Cambridge University Press, Cambridge 2000.

Die Autoren

Irina Heinz studierte Physik an der Justus-Liebig-Universität Gießen. In ihrer Promotion an der Universität Konstanz befasste sie sich mit der Theorie skalierbarer Spinqubits in Silizium-Quantenpunkten.

Guido Burkard ist Professor für theoretische Physik an der Universität Konstanz. Nach seiner Promotion an der Universität Basel war er Postdoc am IBM T. J. Watson Research Center. Seine Forschung ist der Physik der Quanteninformation und des Quantencomputers gewidmet, mit einem Schwerpunkt auf Festkörper- und hybriden Quantensystemen.

Anschrift
Prof. Dr. Guido Burkard, Universität Konstanz, Fachbereich Physik, Postfach 685, 78457 Konstanz. Guido.Burkard@uni-konstanz.de, Irina.Heinz@uni-konstanz.de

© 2025 The Author(s). Physik in unserer Zeit published by Wiley-VCH GmbH