

Mit Supraleitung und Spin

Festkörperbasierte Lösungen ermöglichen Systeme mit mehr als hundert Qubits.

Stefan Filipp und Gian Salis

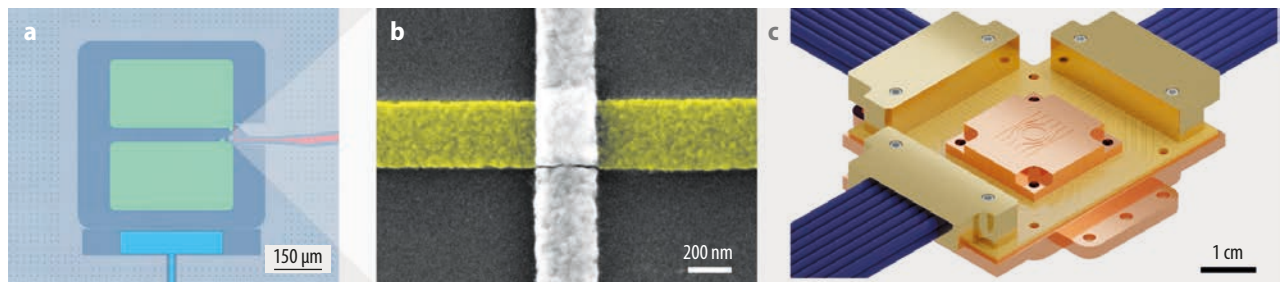


Abb. 1 Ein supraleitendes Qubit (a, grün) benötigt eine Mikrowellenkontrollleitung (blau) und eine Leitung, um den magnetischen Fluss zu kontrollieren (rot). Ein Josephson-Kontakt (b) dient als nichtlineares und widerstandsloses Bauelement dazu, supraleitende Qubits zu realisieren. Ein supraleitender Quantenprozessor (c) bedarf einer Abschirmung und Mikrowellenansteuerung.

Der eindrucksvolle Fortschritt in der gezielten Fertigung von Mikro- und Nanostrukturen und deren Kontrolle im Quantenregime hat es erlaubt, Qubits in festkörperbasierten Plattformen herzustellen, die sich mit äußerst geringen Fehlerraten und innerhalb weniger Nanosekunden manipulieren lassen. Supraleitende Quantenschaltkreise oder Spins einzelner Elektronen in Halbleitern gelten als vielversprechende Kandidaten, um Quanteninformation zu verarbeiten; Fehlstellen in kristallinen Strukturen finden als Quantensensoren Verwendung, Spin-Ensembles als Speicher für die Quantenkommunikation. Mit supraleitenden Quantenschaltkreisen lassen sich bereits heute Systeme mit mehr als hundert Qubits bauen und betreiben. Doch vor der effizienten Lösung praktischer Probleme gilt es, einige Hürden zu überwinden. Im Folgenden beleuchten wir die Funktionsweise von supraleitenden und Spin-Qubits und beschreiben die gemeinsamen Herausforderungen.

Qubits basierend auf supraleitenden Quantenschaltkreisen gelten derzeit als eine der am weitesten entwickelten Technologien für den Bau eines Quantencomputers. Durch die geeignete Anordnung von Josephson-Kontakten und supraleitenden Elektroden entstehen nicht-lineare Schwingkreise mit einer typischen Resonanzfrequenz im Mikrowellenbereich. Der Josephson-Kontakt, den eine dünne normalleitende Schicht als Tunnelbarriere zwischen zwei Supraleitern erzeugt (**Abb. 1**), sorgt dabei dank seiner nichtlinearen Induktivität für ungleichmäßige Abstände der Energieniveaus des Schwingkreises. Somit lassen sich die beiden niedrigsten Energieniveaus durch Mikrowellenpulse adressieren, ohne dabei weitere Übergänge zu treiben. Dadurch entsteht ein Zwei-Niveau System mit dem Grundzustand $|0\rangle$ und dem angeregten

Zustand $|1\rangle$: ein Qubit, das als Grundbaustein eines Quantencomputers dienen kann (**Abb. 2**).

Der Energieabstand zwischen den Qubit-Zuständen $|0\rangle$ und $|1\rangle$ definiert die Qubit-Frequenz. Genau wie die Kopplung des Qubits an die Umgebung oder an andere Quantenschaltkreise lässt sich die Frequenz durch die Geometrie der Elektroden und die Dimension der Josephson-Kontakte anpassen. Ein großer Vorteil gegenüber anderen Plattformen ist die starke Kopplung der Qubits an Mikrowellenphotonen: Resonante Pulse erlauben es, den Quantenzustand innerhalb weniger Nanosekunden zu manipulieren und auszulesen [1]. Optimierte Schaltkreisgeometrien [2] sowie verbesserte Fabrikationsprozesse und Materialien haben die Kohärenzzeiten supraleitender Qubits in den letzten Jahren um mehrere Größenordnungen gesteigert. Derzeit liegen sie bei mehreren hundert Mikrosekunden [3]. Kopplungsschaltkreise können Qubits über Zwei-Qubit-Gatter effizient verschränken und schließlich zu größeren Systemen verbinden. Die starke kapazitive Kopplung zwischen Qubits birgt jedoch auch Herausforderungen bei der Skalierung, da diese ohne spezielle Maßnahmen zu ungewollten Interaktionen zwischen den Qubits führt. Nichtsdestotrotz ist es bereits gelungen, mit supraleitenden Qubits erste Anzeichen eines Quantenvorteils gegenüber einem klassischen Computer zu zeigen: beim Erzeugen von Zufallszahlen mit einer spezifischen Verteilung, die klassische Algorithmen nur schwierig herstellen können [4]. Darüber hinaus belegt die von IBM online zur Verfügung gestellte „Flotte“ von Quantenprozessoren [5] mit derzeit über 400 Qubits eindrucksvoll, dass die verbesserte Kontrolle komplexer Quantensysteme und längere Kohärenzzeiten der Qubits große Fortschritte bewirken.

Im Gegensatz zu supraleitenden Qubits, welche die beiden unteren Quantenzustände eines Schwingkreises nutzen,

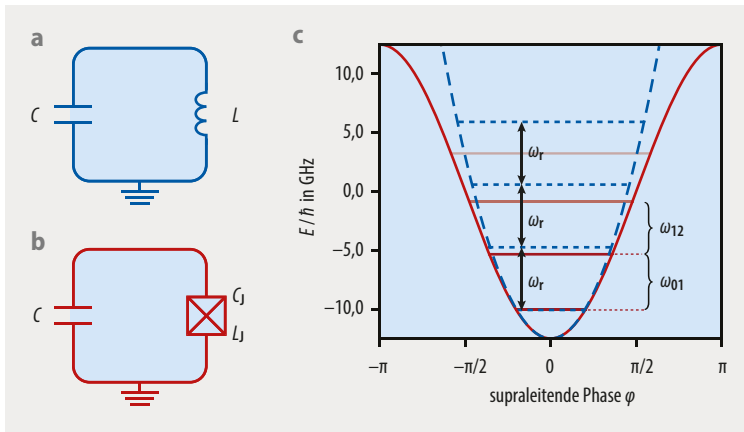


Abb. 2 Supraleitende Quantenschaltkreise lassen sich ausgehend von einem harmonischen LC-Oszillator (a) mit Induktivität L und Kapazität C konstruieren. Dabei ersetzt ein Josephson-Kontakt mit der Josephson-Energie $\propto L_J^{-1}$ und einer Kapazität C die Induktivität L (b), sodass ein nicht-linearer Schwingkreis mit anharmonischem Energiespektrum entsteht (c, rot).

werden Spin-Qubits durch die natürlichen Zwei-Niveau-Systeme einzelner Elektronen- oder Lochspins definiert. Nanostrukturierte Elektroden und entsprechend angelegte elektrische Spannungen erzeugen in einem Halbleiter eine Potentiallandschaft, die einzelne Elektronen oder Löcher kontrolliert in Quantenpunkten gefangen hält (**Abb. 3**). Die Manipulation der einzelnen Spins erfolgt über die Elektronenspinresonanz, wobei ein lokal erzeugtes elektrisches Feld die magnetische Komponente der üblicherweise globalen Mikrowellenanregung ersetzt. Diesbezüglich funktionieren Spin-Qubits sehr ähnlich wie supraleitende Qubits mit Qubit-Frequenzen im Mikrowellenbereich. Da ein Elektronenspin jedoch nicht direkt mit einem elektrischen Feld wechselwirken kann, braucht es eine Spin-Bahn-Kopplung. Dazu verändern elektrische Signale an den Elektroden das Potential des Quantenpunkts. Die Realisierung eines Zwei-Qubit-Gatters für die Verschränkung von Qubit-Paaren beruht auf der Austauschwechselwirkung benachbarter Spin-Qubits: Eine Veränderung des Überlapps der Wellen-

funktionen benachbarter Elektronen schaltet die Wechselwirkung elektrisch ein und aus.

Eines der Hauptargumente für diese Plattform ist das Skalierungspotenzial aufgrund der sehr kleinen Grundfläche einzelner Qubits, die typischerweise $100 \times 100 \text{ nm}^2$ beträgt, und durch die Herstellung mittels etablierter Prozesse der Halbleiterindustrie. Darüber hinaus zeichnen sich diese Systeme durch sehr schnelle Schaltzeiten und damit durch potenziell kurze Rechenzeiten aus. Spin-Qubits lassen sich bei höheren Temperaturen im Bereich weniger Kelvin betreiben, wo eine größere Kühlleistung zur Verfügung steht. All dies eröffnet neue Möglichkeiten für die klassische Kontrollelektronik, zum Beispiel um diese nahe den Spin-Qubits und bei kryogenen Temperaturen zu integrieren. Der Wechsel des Halbleitermaterials von Gallium-Arsenid zu Silizium und Germanium

verbesserte die Kohärenzzeit der Spin-Qubits drastisch: Typische Kohärenzzeiten liegen mittlerweile oberhalb von hundert Mikrosekunden, was etwa den Werten supraleitender Qubits entspricht. Das gelang hauptsächlich durch die Verwendung von isotonenreinem Silizium ohne Kernspins und das Ausnutzen sogenannter „Sweet Spots“, die den Einfluss von Ladungsrauschen minimieren [6]. So verringerte sich die Fehlerrate von Quantengattern auf Werte kleiner als 0,1 Prozent für Manipulationen einzelner Qubits und 0,5 Prozent bei Zwei-Qubit-Operationen [7].

Der Vorteil der extrem kleinen Größe der Spin-Qubits erweist sich indes als Herausforderung bei deren Herstellung, da mindestens zwei individuell abzustimmende Elektroden jedes einzelne Qubit kontrollieren müssen. Für hunderte von Qubits bleibt es selbst unter Verwendung der dritten Dimension schwierig, die benötigte Anzahl von Zuleitungen auf dem engen Raum unterzubringen. Trotzdem gelangen in den vergangenen Jahren beeindruckende Fortschritte. So gibt es mittlerweile Systeme mit sechs

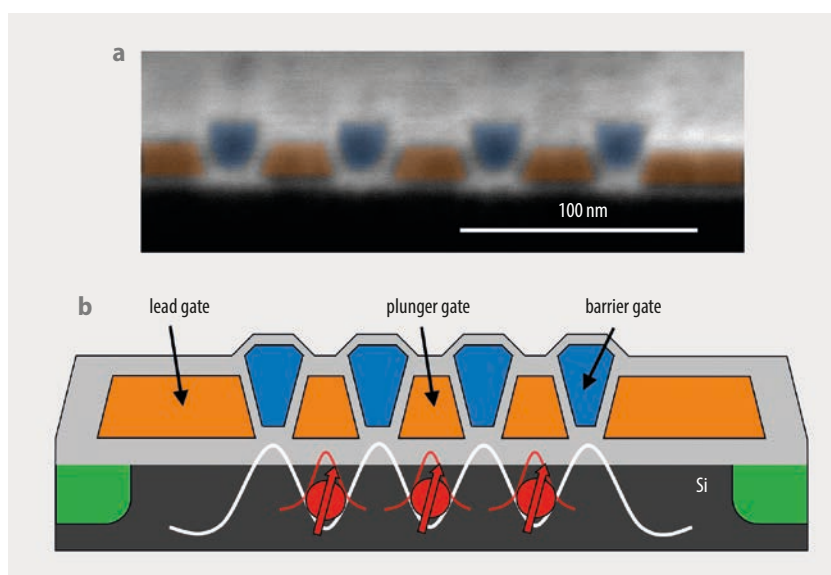


Abb. 3 Das Transmissionselektronenbild (a) zeigt den Querschnitt durch die nanostrukturierten Gatterelektroden eines Spin-Qubits in Silizium (a). Darin zeigen sich die sogenannten „plunger gates“ und „lead gates“ (b, orange) sowie die Elektroden für die Barriere (blau). Sie formen ein elektrisches Potential (weiß), das einzelne Elektronen oder Löcher (rot) kontrolliert fangen kann. Elektrische Kontakte (grün) an den „lead gates“ erlauben es, Ladungen einzufüllen und Ströme zu messen.

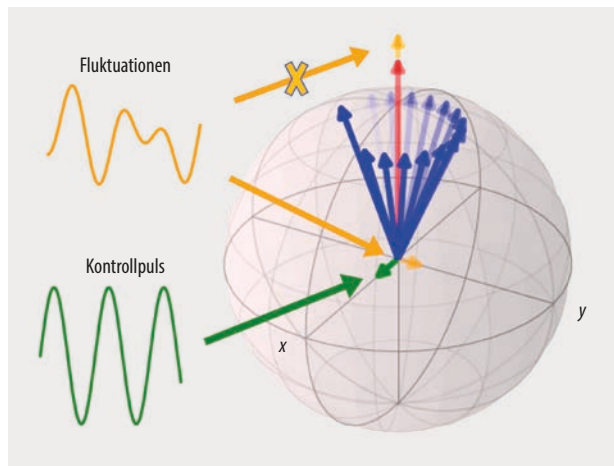


Abb. 4 Der Spin (blau) dreht sich mit der Qubit-Frequenz von mehreren Gigahertz um die Hauptachse (rot). Fluktuationen des elektrischen Feldes (gelb) können die Drehungen beeinflussen, sodass es zur Dephasierung des Qubits kommt. Elektrische Kontrollpulse (grün) sorgen für eine Drehung um eine transversale Achse.

Spin-Qubits in einer Reihe [8] und solche mit einer zweidimensionalen Anordnung von vier Qubits [9], mit denen sich einfache Quantenalgorithmen und Fehlerkorrektur demonstrieren ließen.

Um lange Kohärenzzeiten zu erreichen, gilt es, Qubits idealerweise komplett von der Umgebung abzuschirmen. Die zur Manipulation benötigten elektrischen Kontrollpulse dürfen keine zusätzlichen Störeinflüsse einbringen. Im Festkörper existieren jedoch nur schwer zu vermeidende Ladungsfluktuationen. Sie bewirken ein zusätzliches, unkontrolliertes elektrisches Rauschen, das zu unerwünschter Dephasierung und zum Zerfall der Quantenzustände führen kann. Solche Fluktuationen werden von Störstellen verursacht, zum Beispiel in Oxidschichten an Oberflächen oder durch Rückstände aus dem Fabrikationsprozess. Den Einfluss dieses Rauschens verringern einfallsreiche Designs und die Abstimmung der Qubits. So hat sich gezeigt, dass es zum Justieren der Qubits einen optimalen Punkt gibt, an dem das elektrische Feld die Qubits zwar manipulieren, aber nicht dephasieren kann.

Im Bezugssystem des Labors drehen sich Qubits sehr schnell um ihre Hauptachse (**Abb. 4**) – mit einer Frequenz, die bei supraleitenden Qubits von der Dimensionierung des Schwingkreises, bei Spin-Qubits vom Magnetfeld und dem g -Faktor des Elektrons abhängt. Elektrische Felder verändern diese Rotation der Qubits sowohl longitudinal als auch transversal zur Hauptachse. Drehungen um die transversale Achse führen zur Manipulation der Qubits, während zusätzliche Drehungen um die longitudinale Achse eine Dephasierung bewirken. Demnach sollten elektrische Felder idealerweise hauptsächlich auf die transversale Achse wirken. Bei supraleitenden Qubits gelingt es durch ein geschicktes Design des Schwingkreises, dass das Ladungsrauschen nicht die Qubit-Frequenz beeinflusst und somit keine Dephasierung auftritt. Die Schwierigkeit dabei ist, dass diese Unempfindlichkeit zu einer reduzierten Nichtlinearität führt und die Qubit-Eigenschaften verloren gehen – eine Herausforderung, die zu intensiver Forschung an verschie-

denen Arten supraleitender Qubits geführt hat [10, 11]. Bei Spin-Qubits dienen Anisotropien in der intrinsischen oder künstlich erzeugten Spin-Bahn-Wechselwirkung dazu, dass elektrische Felder die Rotationen um die Hauptachse nicht verändern. Der bei beiden Qubit-Systemen bewusst große Einfluss auf die transversale Drehachse wird aufgrund der viel schnelleren Eigendrehung des Qubits gefiltert und beeinflusst das Qubit nur, falls das elektrische Feld resonant mit der Qubit-Frequenz ist. So lässt sich das Qubit resonant manipulieren bei stark reduziertem Zerfall.

Ein großer Vorteil festkörperbasierter Qubit-Systeme sind die frei gestaltbaren Systemeigenschaften inklusive ihrer Kopplung an die Umgebung in einem großen Parameterbereich. Das stellt jedoch auch hohe Anforderungen an die Reproduzierbarkeit in der Herstellung der Qubits. Während atomare Systeme von Natur aus gleich sind, führen Fertigungstoleranzen im Nanometerbereich zu signifikanten Abweichungen der Qubit-Parameter. Verbesserte Fabrikationsprozesse reduzieren diese Abweichungen; eine effiziente Systemcharakterisierung kann sie ausgleichen.

Parallel dazu gilt es für beide Plattformen, die Herausforderungen der Skalierung hin zu großen Systemen zu stemmen: Eine funktionierende Integrationstechnologie muss dann nicht nur einzelne oder einige wenige Qubits, sondern tausende und mehr Qubits mit der gleichen Güte präzise kontrollieren. In diesem Zusammenhang ist es wichtig, die Anzahl der Kontrollkanäle massiv zu erhöhen: Um jedes Qubit individuell zu adressieren, ist es notwendig, sehr viele Kontrollleitungen in die entsprechenden Quantensysteme zu integrieren. Mit derzeitiger Technologie erscheint dies bei mehr als tausend Qubits äußerst schwierig. Mögliche Lösungen liegen im Multiplexing von Kontrolle und Auslesen der Qubits, in kryogenen elektronischen Schaltungen nahe der Quantenprozessoren sowie in optischen Steuersignalen oder in Systemen mit höherer Kühlleistung.

Zusammenfassung und Perspektiven

Derzeit stehen wir am Anfang einer spannenden Entwicklung mit großen Herausforderungen und enormem Potenzial, um bislang unlösbare Rechenprobleme auf einem universellen Quantencomputer zu bearbeiten. Heute lassen sich Qubits in Festkörpersystemen schon mit geringen Fehlerraten von deutlich unter einem Prozent ansteuern und koppeln. Für die Fehlerkorrektur sogenannter logischer Qubits, die sich aus vielen einzelnen physikalischen Qubits zusammensetzen, muss jedoch zum einen die Qualität der einzelnen Qubits und die Güte der Kontrolle noch weiter verbessert werden. Zum anderen gilt es, die Technologie zur Skalierung auf mehrere tausend bis hin zu Millionen Qubits zu entwickeln, ohne dabei ihre Kohärenzeigenschaften zu beeinträchtigen.

Konkret braucht es dazu Materialien und Fabrikationsprozesse, die eine verfeinerte und verbesserte Herstellung und Positionierung der Qubits garantieren. Optimierte Kontrollpulse erhöhen die Gattergüten weiter, insbesondere indem sie das Übersprechen und den Verlust von Quanteninformation vermeiden. Beim Gestalten der Architektur ist zu beachten, dass sich die Qubits in zweidimensionalen

Gittern anordnen lassen mit gezielt ein- und ausschaltbaren Kopplungen zwischen einzelnen Qubit-Paaren. Die dafür nötige Elektronik sollte parallele Gatteroperationen auf allen Qubits erlauben und die Qubits fehlerfrei und mit hoher Effizienz auslesen. Eine niedrige Latenzzeit ermöglicht durch schnelles Messen und zustandsabhängige Korrekturpulse eine Fehlerkorrektur in Echtzeit. Skalierbare Charakterisierungs- und Kalibrierungssequenzen sollten die Initialisierung und Justierung der Quantencomputersysteme beschleunigen, um den Betrieb großer Quantencomputer und den Nutzerzugriff zu realisieren [12].

Sowohl staatlich geförderte Initiativen und Forschungseinrichtungen als auch zahlreiche Firmen von Großkonzernen bis zu Start-ups treiben diese Entwicklungen derzeit weltweit voran. In Europa gibt es durch das Quantum Flagship immer mehr Projekte zu festkörperbasierten Plattformen; Pilotlinien verbessern die Fabrikation. Darüber hinaus machen viele nationale Initiativen zu Quantentechnologien den Forschungsbereich konkurrenzfähig und lassen im Technologiebereich aufschließen. Im deutschsprachigen Raum stehen dabei insbesondere das deutsche Konjunkturpaket mit Zentren zu festkörperbasierten Systemen in Jülich und München, das vom Land Bayern finanzierte Munich Quantum Valley (MQV), der Schweizer Sonderforschungsbereich NCCR-SPIN und die Förderinitiative Quantum Austria im Vordergrund.

*

Unser Dank gilt Matthias Mergenthaler, Andreas Fuhrer, Leonardo Massai, Max Werninghaus, Niklas Bruckmoser und Johannes Schirk sowie der Förderung im Rahmen von NCCR-SPIN, MQV, MUNIQ-SC und GeQCoS.

Literatur

- [1] M. Werninghaus et al., npj Quantum Information 7, 14 (2021)
- [2] O. Dial et al., Supercond. Sci. and Techn. 29, 044001 (2021)
- [3] A. Place et al., Nat. Commun. 12, 1779 (2021)
- [4] F. Arute et al., Nature 574, 505 (2019)
- [5] IBM Quantum Experience – quantum-computing.ibm.com (2021)
- [6] N. Piot et al., Nat. Nanotechnol. 17, 1072 (2022)
- [7] P. Stano und D. Loss, Nat. Rev. Phys. 4, 672 (2022)
- [8] S. G. J. Philips et al., Nature 609, 919 (2022)
- [9] N. W. Hendricks et al., Nature 591, 580 (2021)
- [10] L. B. Nguyen et al., Phys. Rev. X 9, 041041 (2019)
- [11] A. Gyenis et al., PRX Quantum 2, 010339 (2021)
- [12] QISKIT: An open-source framework for quantum computing, DOI:10.5281/zenodo.2573505

Die Autoren



Stefan Filipp (FV Quanteninformation, FV Tiefe Temperaturen) ist Professor für Physik an der TU München und Direktor des Walther-Meißner-Instituts der Bayerischen Akademie der Wissenschaften. Zuvor leitete er das Team für supraleitende Qubits bei IBM Research. Sein Forschungsschwerpunkt ist die Verbesserung der Eigenschaften und Kontrolle supraleitender Quantenschaltkreise, um skalierbare Quantenprozessoren zu entwickeln.

Gian Salis promovierte 1999 an der ETH Zürich. Von der University of California in Santa Barbara führte sein Weg zu IBM Research in Rüschlikon in der Schweiz. Zu seinen Arbeiten gehören die Manipulierbarkeit und Dekohärenz von Elektronenspins sowie verschiedene Aspekte des Quantencomputings mit supraleitenden Qubits. Aktuell leitet er ein Projekt, um skalierbare Spin-Qubits in Silizium und Germanium zu entwickeln.



Prof. Dr. Stefan Filipp, Technische Universität München & Walther-Meißner-Institut der Bayerischen Akademie der Wissenschaften, 85748 Garching; **Dr. Gian Salis**, IBM Research Europe – Zurich, Säumerstrasse 4, 8803 Rüschlikon, Schweiz

quantum approved.



Laser Rack Systems

Quantum Technology
meets Industry Standards

Our lasers do not need an optical table!
The T-RACK is the perfect home for
TOPTICA's high-end tunable diode
lasers and frequency combs in a
modular 19" form factor. Pick yours!

- Tunable Diode Laser Systems
- Frequency Comb Systems
- Wavelength Meters
- Locking Electronics
- 330 .. 1770 nm



www.toptica.com/T-RACK