

Sechs auf einen Streich

Ebnen siliziumbasierte Quantencomputer den Weg zur Skalierbarkeit?

Lotte Geck und Lars R. Schreiber

Quantencomputer ermöglichen es, bestimmte Klassen rechenintensiver Probleme exponentiell schneller zu lösen als herkömmliche Computer. Dies hat weitreichende Anwendungen. Dazu nutzen Quantencomputer quantenmechanische Superposition und Verschränkung durch gezielte Manipulation von Quantenbits (Qubits). Der Zustand eines Qubits ist fragil und bedarf des Schutzes vor unkontrollierten Umwelteinflüssen. Kleine Fehler lassen sich mittels Quanten-Fehlerkorrektur beheben. Dies erfordert jedoch eine hohe Qubit-Redundanz: etwa 1000 physikalische Qubits pro fehlertolerantem Qubit. Für einen fehlertoleranten, universellen Quantencomputer ist eine sehr hohe Anzahl an physikalischen Qubits und daher eine skalierbare Quantencomputerarchitektur notwendig. Dies macht siliziumbasierte Qubits gegenüber anderen Bauarten interessant, weil sie im großen Maßstab industriell zu fertigen sind.

Kürzlich demonstrierten Forschende des Kavli Institute of Nanoscience der TU Delft und der Netherlands Organization for Applied Scientific Research erstmals einen Chip mit sechs Spin-Qubits (**Abb. 1**) [1]. Auf die Oberfläche des undotierten $^{28}\text{Si}/\text{SiGe}$ -Quantentopfes fabrizierten sie eine ausgeklügelte Anordnung metallischer Top-Elektroden in mehreren voneinander isolierten Lagen. Die Physik, die der Definition eines einzelnen Spin-Qubits, seiner Initialisierung und seiner Auslese zugrunde liegt, basiert auf dem Pauli-Prinzip und dem daraus resultierenden spin-abhängigen Tunneln eines Elektrons zwischen zwei Quantenpunkten. Verschränkung benachbarter Qubits erfolgt mittels kurzreichweitiger Austauschwechselwirkung durch eine kurzzeitig verminderte Tunnelbarriere. Superposition einzelner Qubits entsteht durch eine Variante der Elektronenspinresonanz, bei der Quantenpunkte durch Anlegen einer

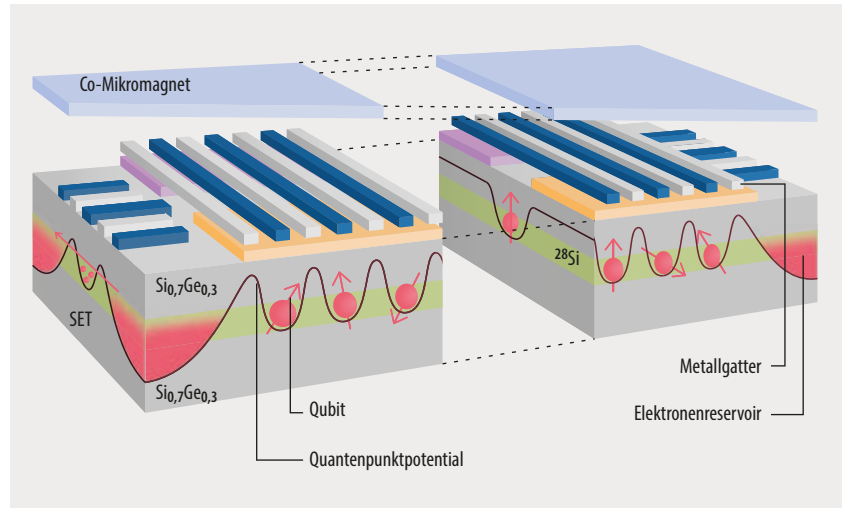


Abb. 1 Das Schnittbild zeigt den 6-Qubit-Chip mit $^{28}\text{Si}/\text{SiGe}$ -Heterostruktur und isolierten metallischen Top-Elektroden. Eine Teilmenge der Elektroden (blau) ermöglicht es, einzelne Elektronen im Quantentopf durch kapazitive Kopplung lokal zu induzieren, andere (weiß) steuern Potentialbarrieren. Auf diese Weise strukturieren die vorgespannten Elektroden den Quantentopf zu einer Anordnung dreidimensional begrenzter Quantenpunkte. Der Ladungszustand der beiden äußeren Quantenpunkte lässt sich durch Einzelelektronentransistoren (SETs) auslesen. Ein kleiner Magnet aus Cobalt (Co) erzeugt ein Gradientenmagnetfeld, um Qubits zu manipulieren. Die Form des Magneten ist so gewählt, dass jedes Qubit über eine eigene Resonanzfrequenz adressierbar ist.

Wechselspannung an einer Elektrode (orange in **Abb. 1**) in einem Gradientenmagnetfeld oszillieren.

Der Weg zu diesem 6-Qubit-Chip gründet auf der systematischen Verbesserung der Si/SiGe -Heterostrukturen und der Elektrodenfabrikation. Dies verringert das elektrische Rauschen und erhöht den energetischen Abstand zu unerwünschten angeregten Zuständen im Quantentopf (Valley-Splitting). Zudem ist der Quantentopf mit dem kernspinfreien Isotop ^{28}Si gewachsen, was zu einer langen Kohärenzzeit für die Qubits von $T_2^* \sim 10 \mu\text{s}$ führt. Denn neben der siliziumtypischen geringen Spin-Bahnwechselwirkung war auch die Hyperfeinwechselwirkung signifikant reduziert. Einen wichtigen Fortschritt erzielten die Gruppen bei Software und Kontroll-Hardware (**Abb. 2**). Die schnelle auf Hardware basierende Rückkopplung der Qubit-Auslese (grün) auf die Initialisierung

durch angepasste Pulssignale (blau) bedeutet einen wichtigen Fortschritt im Hinblick auf künftige Quanten-Fehlerkorrekturen. Die Forschenden haben ein Software-Paket entwickelt, mit dem sie schnell und automatisch 108 steuerungsrelevante Parameter in wenigen Stunden nachregeln können. Für alle sechs Qubits charakterisierten sie die Güte (fidelity) der für einen universellen Quantencomputer notwendigen verschiedenen Qubit-Operationen, also für Manipulation, Initialisierung und Auslese.

Die Stärke der Halbleiter-Spin-Qubits liegt nicht darin, die Güte der Operationen extrem zu steigern, so dass schon wenige (z. B. 100) physikalische Qubits ausreichen, um sinnvolle Algorithmen zu lösen (Noisy Intermediate-Scale Quantum Computing). Vielmehr muss die Güte die weit weniger stringente Schwelle zur Quanten-Fehlerkorrektur überschreiten. Somit sind jedoch Millionen physikalische

Qubits nötig, um einige hundert logische (perfekte) Qubits zu kodieren. Einzelne ließ sich anhand von 1- und 2-Qubit-Prozessoren bereits nachweisen, dass die Güte der Operationen für einen fehlertoleranten, universellen Silizium-Quantencomputer ausreichen sollte [2].

Die Arbeit der Delfter Gruppen kombiniert all diese Operationen in einem 6-Qubit-Chip und blieb dabei nur leicht unter den Rekordwerten. Anhand des 6-Qubit-Chips zeigt sich auch, dass ungewolltes Übersprechen bei Qubit-Manipulationen sowie Aufheizeffekte in dichten Quantenpunkt-Matrizen auftreten. Weil die Quanten-Fehlerkorrektur eine 2D-Matrix von Qubits voraussetzt, wird für die Skalierbarkeit die Anzahl der Leitungen zwischen dem Qubit-Chip bei 10 mK und der Steuerelektronik bei Raumtemperatur zum Flaschenhals (**Abb. 2**). Diese Herausforderungen lassen sich künftig mit Qubit-Matrizen geringerer Dichte und lokaler Kontrollelektronik lösen. Unter anderem zeigten die Delfter Autoren zusammen mit Intel bereits, dass diese Architektur auf Millionen von physikalischen Qubits skalierbar ist [3]. Zentrales Element hierfür ist der Transport von Spin-Qubits über eine Distanz von etwa 10 μm ohne Verlust des Spin-Quantenzustands [4, 5]. Ein bedeutender Teil der Steuerelektronik

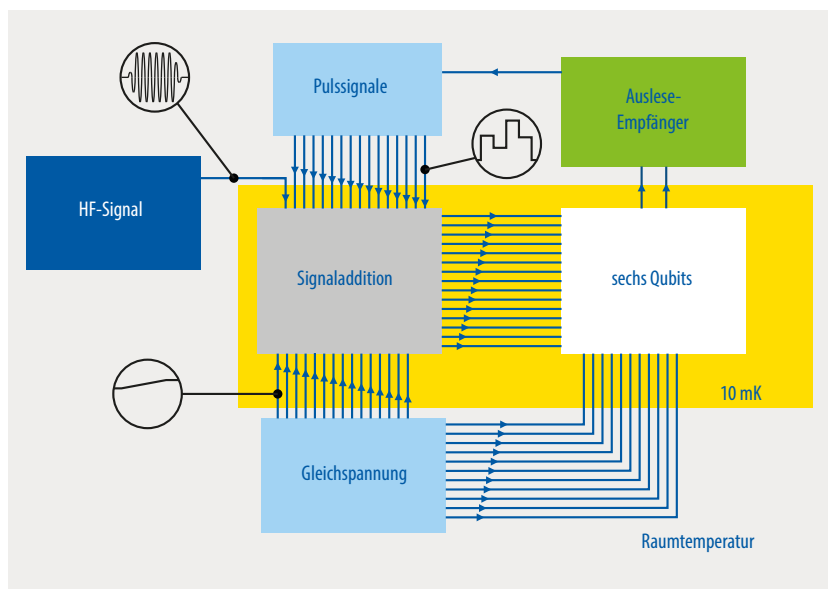


Abb. 2 Zur Ansteuerung des Qubits sind mehrere Signale nötig, die aus Gleichspannungs-, Puls- und Hochfrequenzsignalquellen stammen (hell- und dunkelblau) sowie deren Kombination (grau). Auch für die Auslese (grün) werden Hochfrequenzsignale eingesetzt. Die Anzahl der Linien repräsentiert die Anzahl der Leitungen im Experiment.

(hellblaue Boxen in **Abb. 2**) sowie mindestens ein Anteil der Auslese (grüne Box in **Abb. 2**) müssten lokal auf dem Chip bei rund 1 K betrieben und über 3D-Integration mit dem Qubit verbunden werden. Parameter wie Grundfläche und Signalqualität der Kontrollelektronik sowie thermische Dissipation gilt es, künftig mit einem Abstand zwischen Qubits in der Matrix, notwendiger Güte für Fehlerkorrektur sowie Operations-

temperatur der Qubits in Einklang zu bringen [6].

Der Sprung von 6 auf Millionen Qubits ist eine große Herausforderung, die sich durch verbesserte Materialhomogenität und Transfer zur industriellen Silizium-Chipfabrikation meistern ließe. So hat die Fabrikation bei Intel, Infineon Dresden, IBM und Hitachi bereits begonnen. Die Zeit wird zeigen, ob und wann die Anzahl der Spin-Qubits auf einem Silizium-Chip einen steilen Anstieg erfährt und so universelles Quantencomputing ermöglicht.

Kurzgefasst

Superschweres flüchtiges Metall

Flerovium ($Z = 114$) ist eines der schwersten bekannten Elemente überhaupt: Nur wenige Atome entstehen pro Tag, wenn ein Strahl aus ^{48}Ca -Ionen auf ein ^{244}Pu -Target trifft. Am GSI Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung in Darmstadt ist es einem internationalen Team nun gelungen, seine chemischen Eigenschaften zu untersuchen: Es handelt sich um ein sehr flüchtiges Metall mit der geringsten Reaktivität aller Elemente der Kohlenstoffgruppe.

A. Yakushev et al., *Front. Chem.* **10**, 976635 (2022)

Blasmusik statt Chorgesang

Wer sich beim Musizieren nicht mit Viren wie SARS-CoV-2 anstecken möchte, sollte sich lieber der Blasmusik als dem Chorgesang zuwenden. Eine Gruppe aus Göttingen

hat gezeigt, wie das Ansteckungsrisiko vom Blasinstrument abhängt und als Vergleichsgröße das Singen herangezogen. Dabei untersuchten sie verschiedene Szenarien mit infektiösen Musizierenden und variierten u. a. den Abstand der Zuhörenden zum Instrument. Die Messergebnisse können helfen, Veranstaltungen auch während einer Pandemie sicher durchzuführen.

O. Schlenczek et al., *J. Aerosol Sci.* **167**, 106070 (2021)

Doch nicht supraleitend?

Nature hat ein Paper zu Supraleitung unter hohem Druck bei Raumtemperatur (vgl. *Physik Journal*, Dezember 2020, S. 23) zurückgezogen: Die Datenanalyse war nicht nachvollziehbar und die Ergebnisse nicht durch andere Gruppen reproduzierbar.

E. Snider et al., *Nature* **586**, 373 (2020)

- [1] S. G. J. Philips et al., *Nature* **609**, 919 (2022)
- [2] X. Xue et al., *Nature* **601**, 343 (2022)
- [3] J. M. Boter et al., *Phys. Rev. Appl.* **18**, 024053 (2022)
- [4] I. Seidler et al., *npj Quantum Inf.* **8**, 100 (2022)
- [5] V. Langrock et al., *arXiv:2202.11793* (2022)
- [6] L. Geck et al., *Quantum Sci. Technol.* **5**, 015004 (2019)

Die Autor:innen

Prof. Dr.-Ing. Lotte Geck, Forschungszentrum Jülich GmbH, Central Institute of Engineering, Electronics and Analytics, ZEA-2 - Electronic Systems, Wilhelm-Johnen-Straße, 52428 Jülich und **Dr. rer. nat. Lars Schreiber**, JARA-FIT Institute for Quantum Information, Forschungszentrum Jülich GmbH und RWTH Aachen University