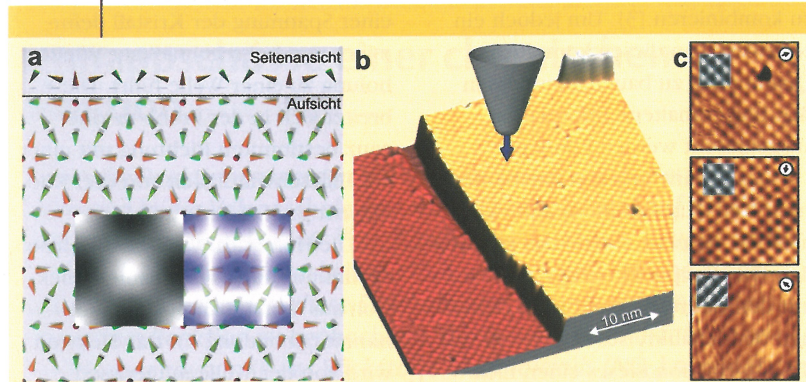


ABB. 2 | SKYRMIONEN-GITTER



a) Die winzigen Wirbel aus jeweils nur etwa 15 Atomen bilden ein regelmäßiges, nahezu quadratisches Gitter. Die farbigen Kegel zeigen die Orientierung der magnetischen Ausrichtung der einzelnen hexagonal angeordneten Eisenatome an. Die Einschübe zeigen als Graustufenbild ein simuliertes magnetisches Rastertunnelmikroskopiebild und in blauweiß die Skyrmionen-Dichte (blau bedeutet hohe Dichte). b) Messung mit spinpolarisierter Rastertunnelmikroskopie auf zwei Fe-Lagen, die durch eine vergrabene atomar hohe Iridium-Stufenkante getrennt sind. c) Drei Bilder (8 nm x 8 nm) der gemessenen Magnetisierungskomponenten entlang unterschiedlicher Achsen (Pfeile), zusammen mit Einschüben (Grauskala) einer simulierten Messung des Skyrmionen-Gitters.

während eine schwache Wechselwirkung zwischen je vier Spins ein zweidimensionales Gitter formt. Dann entsteht ein nahezu quadratisches Muster, das von der hexagonalen

Anordnung der Atome entkoppelt ist. Durch seine Topologie muss diese Spinstruktur ungewöhnlich stabil sein, was auch experimentell beobachtet wird.

Für zukünftige Anwendungen zum Beispiel im Bereich der Spintronik eröffnen die gefundenen magnetischen Skyrmionen völlig neue Möglichkeiten, werfen gleichzeitig aber auch neue Fragen auf: Wie wirkt elektrischer Strom auf die Skyrmionen, und lassen sich die magnetischen Wirbel vielleicht sogar gezielt bewegen? Weltweit existieren Bestrebungen, isolierte Skyrmionen als Bits zur magnetischen Datenspeicherung zu verwenden. Unsere Entdeckung [2] zeigt, dass eine weitere Miniaturisierung dieser vergleichsweise großen Strukturen bis auf eine atomare Skala hin möglich ist.

Literatur

- [1] T. H. Skyrme, Proc. R. Soc. Lond. Ser. A 1961, 260, 127.
- [2] S. Heinze et al., Nature Phys. 2011, 7, 713.
- [3] S. Mühlbauer et al., Science 2009, 323, 915.
- [4] X. Z. Yu et al., Nature 2010, 465, 901.

Stefan Heinze, Uni Kiel; Kirsten von Bergmann, Uni Hamburg; Gustav Bihlmayer, Forschungszentrum Jülich

NANOELEKTRONIK

Einzelne Elektronen surfen auf einer Schallwelle

Schaltkreise, die mit einzelnen Elektronen arbeiten, können die Leistungsfähigkeit von Computern enorm steigern. Sie benötigen aber einen Mechanismus, um einzelne Elektronen zu befördern. Zwischen Quantenpunkten ist dies nur möglich, wenn diese sehr eng beieinander liegen. Am Institut-Néel CNRS Grenoble ist es unserer Forschergruppe zusammen mit Kollegen aus Tokio und Bochum gelungen [1, 2], einzelne Elektronen mit einer Schallwelle zwischen zwei benachbarten Quantenpunkten zu befördern. Dies bedeutet einen großen Schritt in Richtung Quanten-Informationstechnologie mit einzelnen Elektronen.

In einem gewöhnlichen Schaltkreis fließen pro Sekunde mehrere Billionen Elektronen. In der Nanotechnologie ist es mittlerweile möglich, einzelne Elektronen in circa 100 nm großen elektronischen Inseln (Quantenpunkten) „einzufangen.“ Die Aufgabe besteht nun darin, diese

einzelnen Ladungsträger zu verschieben.

Experimentell kann man die Präsenz eines einzelnen Elektrons mit Hilfe eines Quantenpunktkontaktes – einer Art Nanostrommeter – nachweisen. Hierzu wird ein Strom direkt neben dem Quantenpunkt durch

eine kleine Verengung vorbeigeleitet und gemessen (grüne Elektrode in Abbildung 1). Wenn man dieses Elektron entfernt oder ein zweites hinzufügt, hat dies einen Einfluss auf den Strom, der durch das Nanostrommeter fließt (Abbildung 2). Der Grund dafür ist, dass weniger negative Ladung im Quantenpunkt den benachbarten Quantenpunktkontakt verbreitert und sein elektrischer Widerstand sinkt. Bei mehr negativer Ladung im Quantenpunkt ist es umgekehrt.

Zusätzlich zu ihrer elektrischen Ladung haben Elektronen einen Drehimpuls (Spin), der wie ein Kreisel eine Drehrichtung hat und beliebig ausgerichtet werden kann. Der Spin lässt sich mit Quanteninformation kodieren. Auf diese Weise ist es gelungen, einzelne Elektronen zu manipulieren und statt klassischer Bits (Zustände 0 und 1) auch die

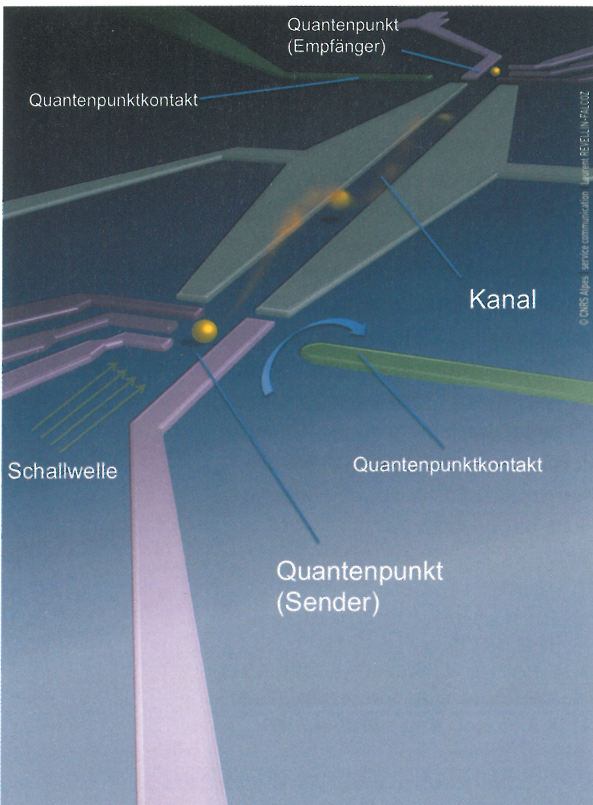
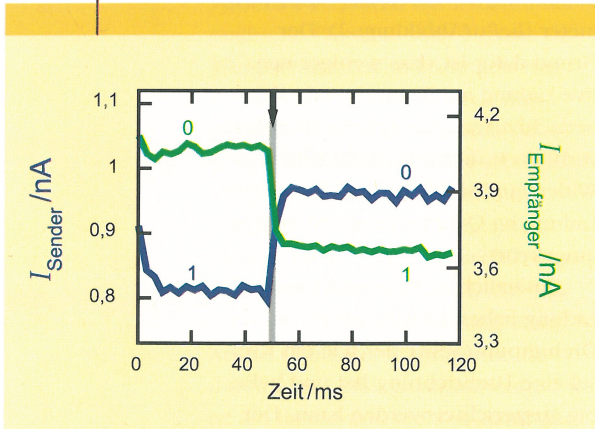


Abb. 1 Das Elektronen-Förderband besteht aus mehreren Goldelektroden auf der Oberfläche eines Galliumarsenid-Halbleiters. Zwei Quantenpunkte (violette Gate-Elektroden) sind mit zwei Kanalelektroden (grau) verbunden. Ein im vorderen Quantenpunkt eingepferchtes Elektron wird durch eine Schallwelle zum zweiten Quantenpunkt befördert. Die beiden Quantenpunktkontakte (grün) neben den zwei Quantenpunkten ermöglichen die Messung des Elektronenstatus (Grafik: CNRS Alpes).

ABB. 2 | ELEKTRONENTRANSPORT



Elektronenstatus in den beiden Quantenpunkten. Elektrische Ströme des Sender-Quantenpunkts (blau) und Empfänger-Quantenpunkts (grün). 0 und 1 bedeutet kein oder ein Elektron im Quantenpunkt. Am Zeitpunkt $t = 50$ ms wurde die Schallwelle losgeschickt.

wesentlich komplexeren Quantenbits zu kombinieren [3]. Um jedoch ein Netzwerk von diesen komplexen Quantenbits zu bauen, muss die in den Bits enthaltene Information ausgetauscht werden können.

Das ist eine große Herausforderung. Die Quanteninformation geht nämlich verloren, sobald das Elektron den Quantenpunkt verlässt und sich mit den zahlreichen anderen Elektronen des Schaltkreises vermischt. Um die Information dieses einen Elektrons zu erhalten, muss es vom Umfeld der anderen Elektronen geschützt transportiert werden.

Dies lässt sich mit einer Schallwelle erreichen. Diese deformiert nämlich den Kristall und erzeugt elektrische Felder, die es dem Elektron ermöglichen, sich frei zu bewegen. Das ist ähnlich wie bei einer Piezo-Feuerzeugzündung, in der durch schlagartige Deformation eines Kristalls eine hohe Zündspannung aufgebaut wird.

Bevor jedoch ein einzelnes Elektron zwischen zwei Quantenpunkten über eine Distanz von etwa drei Mikrometern transportiert werden kann, müssen alle anderen Elektronen im Umfeld entfernt werden. Dies erreichen wir, indem wir einen von Elektronen freien, leeren Kanal zwischen den beiden Quantenpunkten erzeugen, durch den sich das Elektron bewegen kann.

Experimentell entsteht dieser Kanal durch Anlegen einer negativen Spannung an den beiden Kanalelektroden (grau in Abbildung 1). Aufgrund der negativen Ladung der „Schaltkreis-Elektronen“ werden diese aus dem Kanal herausgetrieben, bis er völlig ausgetrocknet ist: gleichnamige Ladungen stoßen sich bekanntlich ab. Nun sendet man eine Schallwelle entlang des Kanals, die das einzelne Elektron geschützt vom Umfeld der anderen Elektronen durch den Kanal „schiebt“.

Die Schallwelle wird über den umgekehrten, oben beschriebenen Feuerzeugeffekt produziert: Wegen der piezoelektrischen Eigenschaften

von Galliumarsenid wird bei Anlegen einer Spannung der Kristall deformiert, was bei regelmäßiger Wiederholung zu einer Welle führt. Diese breitet sich in der Probe in einer ganz bestimmten Richtung mit einer Schallgeschwindigkeit von drei Kilometern pro Sekunde aus.

Die Höhe der Welle lässt sich so abstimmen, dass sie genau ein Elektron aus dem Quantenpunkt mitnimmt (Abbildung 1). Das Elektron wird von der Welle mitgerissen, durch den Kanal befördert und anschließend im zweiten Quantenpunkt wieder aufgefangen.

Mit einem zweiten Nanoströmometer am Empfänger-Quantenpunkt (Abbildung 1) konnten wir feststellen, ob dieses Elektron auch tatsächlich dort ankommt oder während des Transports verlorengeht. Abbildung 2 zeigt einen solchen Nachweis bei dem simultan der Strom der beiden Nanoströmometer vermessen wird. Dieser Transportmechanismus ist schon recht zuverlässig: Etwa 96 % der losgeschickten Elektronen erreichen ihr Ziel.

Um diese neuartige Transportmethode für den Austausch von Quanteninformation zwischen mehreren Quantenbits anzuwenden, muss noch gezeigt werden, dass bei dem Transport die Kohärenz des Elektronenspins erhalten bleibt [4]. Dies stellt die nächste Herausforderung auf dem Weg zum elektronischen Quantencomputer dar.

- [1] S. Hermelin et al. Nature **2011**, *447*, 435.
- [2] R. P. G McNeil et al. Nature **2011**, *447*, 439.
- [3] R. Hanson et al. Rev. Mod. Phys. **2007**, *79*, 12717.
- [4] J. A. H. Stotz et al. Nature Mater. **2005**, *4*, 585.

Christopher Bäuerle, Tristan Meunier, Institut Néel – CNRS, Grenoble; Andreas Dirk Wieck, Uni Bochum; Seigo Tarucha, Uni Tokio