

## ■ Majorana auf Draht

In einem Hybridsystem aus Halbleiter-Nanodraht und supraleitendem Kontakt wurden eindeutige Hinweise auf Majorana-Fermionen gefunden.

Vor 75 Jahren postulierte Ettore Majorana die Existenz eines Teilchens, das sein eigenes Antiteilchen ist. Das von ihm vorhergesagte Majorana-Fermion hält damit wohl den Rekord für das am längsten theoretisch vorhergesagte Elementarteilchen ohne experimentellen Nachweis. In den letzten Jahren wurde verstärkt in Festkörpern nach Anregungen gesucht, die den Charakter von Majorana-Fermionen haben.<sup>1)</sup> Diese Suche fand nun ihren vorläufigen Höhepunkt in eindeutigen experimentellen Hinweisen auf Majorana-Fermionen in supraleitenden Hybridsystemen [1].

Im Festkörper spielen Elektronen und Löcher die Rolle von Teilchen und Antiteilchen. Um ein Majorana-Fermion zu erzeugen, liegt es daher nahe, eine Anregung zu suchen, die eine Überlagerung von Elektron und Loch ist – und damit sowohl Teilchen als auch Antiteilchen. Natürliche Kandidaten hierfür sind Supraleiter, in denen der Unterschied zwischen Teilchen und Loch durch die Präsenz von Cooper-Paaren verwischt wird: Ein Loch mit Ladung  $+e$ , d. h. ein fehlendes Elektron, und ein Cooper-Paar (Ladung  $-2e$ ) erscheinen zusammen wie ein Elektron mit Ladung  $-e$ . Teilchen- und lochartige Anregungen sind somit intrinsisch verbunden, und eine teilchenartige Anregung bei Energie  $E$  bezüglich der Fermi-Energie ist äquivalent zu einer lochartigen Anregung bei  $-E$  (mathematisch durch Erzeugungs- und Vernichtungsoperatoren ausgedrückt:  $\gamma^\dagger(E) = \gamma(-E)$ ). Eine Anregung an der Fermi-Energie ist also sowohl Teilchen als auch Antiteilchen (bei  $E = 0$  ist  $\gamma^\dagger = \gamma$ ) und somit ein Majorana-Fermion.

Die Schwierigkeit besteht nun darin, lokal eine einzelne derartige Anregung zu erzeugen, denn zwei Majorana-Fermionen ergeben wieder ein gewöhnliches Fermion. In der Tat ist dies nur in topologischen Supraleitern möglich. Diese weisen neben einer supraleitenden

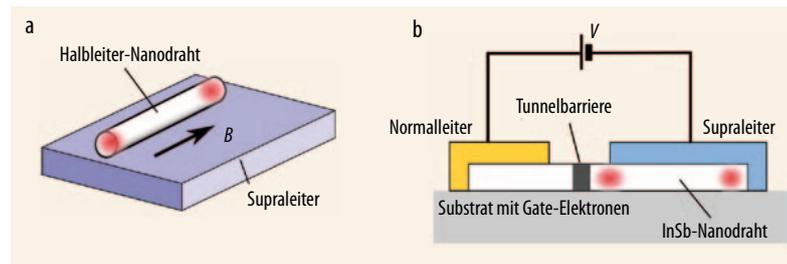


Abb. 1 Ein Halbleiter-Nanodraht in Kontakt mit einem konventionellen Supraleiter im Magnetfeld kann an den Enden Majorana-Fermionen beherbergen

Bandlücke im Volumen auch lokalisierte Zustände an den Rändern auf. Solche Randzustände bleiben bestehen, solange das System nicht drastisch verändert wird – was in diesem Fall bedeutet, die supraleitende Bandlücke zu schließen. Man spricht daher von einem „topologischen“ Schutz dieser Zustände.

Bei einem topologischen Supraleiter in Form eines eindimensionalen Nanodrahts existiert jeweils ein Randzustand an den Enden. Diese beiden gebundenen Zustände sind dann automatisch Majorana-Fermionen, wie Alexei Kitaev gezeigt hat [2]. Topologische Supraleiter kommen nun aber als solche nicht in der Natur vor. Liang Fu und Charles Kane haben jedoch erkannt, dass sich ein Hybridsystem aus einem konventionellen Supraleiter und einem topologischen Isolator wie ein topologischer Supraleiter verhält und somit Majorana-Fermionen beherbergen kann [3]. Seither ist die Zahl der theoretischen Vorschläge für supraleitende Hybridsysteme mit Majorana-Fermionen förmlich explodiert (einen Überblick bietet [4]).

Das nun experimentell realisierte System haben 2010 unabhängig voneinander zwei Gruppen vorgeschlagen [5, 6]. Es ist eine Hybridvariante von Kitaevs Nanodraht und besteht aus einem Halbleiter-Nanodraht in Kontakt mit einem konventionellen Supraleiter (Abb. 1a). Das Zusammenspiel aus der durch den Proximity-Effekt induzierten Supraleitung, der Spin-Bahn-Wech-

(a: Prinzip, b: Schema des Experiments aus [1]). Die roten „Flecken“ deuten die Position der Majorana-Fermionen an.

selwirkung und einer hinreichend großen Zeeman-Aufspaltung im Draht führt dann effektiv zu einem topologischen Supraleiter.

Die experimentelle Gruppe um Leo Kouwenhoven in Delft hat diesen Vorschlag nun mit epitaktisch gewachsenen InSb-Nanodrähten verwirklicht [1]. Diese Nanodrähte, die eine starke Spin-Bahn-Wechselwirkung und einen  $g$ -Faktor von 50 aufweisen, wurden mit einer supraleitenden NbTiN-Legierung kontaktiert und in ein Magnetfeld gebracht. Durch den hohen  $g$ -Faktor lässt sich eine hinreichend große Zeeman-Aufspaltung erzeugen, ohne die Supraleitung in den Kontakten zu zerstören.

Um nachzuweisen, dass wirklich Majorana-Fermionen erzeugt wurden, versah die Delfter Gruppe die InSb-Nanodrähte sowohl mit einem supraleitenden als auch mit einem normalleitenden Kontakt und induzierte vor dem Supraleiter eine Tunnelbarriere durch Gates (Abb. 1b). Die Tunnelwahrscheinlichkeit ist dann proportional zur Zustandsdichte des supraleitenden Bereichs hinter der Barriere, die sich somit direkt aus dem differentiellen Leitwert  $G$  ablesen lässt. Die Präsenz eines Majorana-Fermions erhöht durch resonantes Tunneln mithilfe des gebundenen Zustandes an der Fermi-Energie die Tunnelwahrscheinlichkeit für kleine angelegte Spannungen. Daher ist die Signatur eines Majorana-Fermions ein höherer Leitwert um den Nullpunkt der angelegten Spannung.

<sup>1)</sup> vgl. Matthias Troyer, Das Rätsel um Majorana, Physik Journal, Februar 2012, S. 19

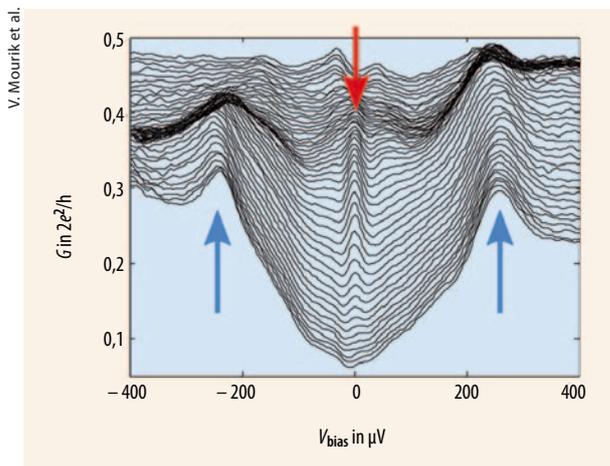


Abb. 2 Der differentielle Leitwert  $G$  als Funktion der angelegten Spannung  $V_{\text{bias}}$  ist innerhalb der supraleitenden Bandlücke unterdrückt (blaue Pfeile) und weist bei  $V_{\text{bias}} = 0$  einen Peak (rot) auf. Die Kurven gehören zu verschiedenen Magnetfeldern  $B$  (von 0 bis 490 mT, in Schritten von 10 mT) und sind der Übersicht halber vertikal verschoben (außer  $B = 0$  mT).

Ohne Magnetfeld beobachtete die Delfter Gruppe in der Tat eine Unterdrückung des Leitwerts innerhalb der induzierten supraleitenden Bandlücke, während sich bei einem endlichen Magnetfeld ein Peak am Nullpunkt der angelegten Spannung („zero bias“) entwickelte, der über einen weiten Magnetfeldbereich unverändert bestehen blieb (Abb. 2).

Im Prinzip können derartige Anomalien von verschiedensten Effekten herrühren. Die Autoren argumentieren jedoch, dass außer Majorana-Fermionen kein anderer bekannter Effekt mit der Beobachtung – ein *zero-bias peak*, der erst bei endlichem Magnetfeld auftritt

und nicht als Funktion des Magnetfelds wandert – kompatibel ist. Darüberhinaus führte die Delfter Gruppe eine Reihe von Kontrollexperimenten durch: Beispielsweise zeigten sie, dass der Majorana-Peak, wie theoretisch vorhergesagt [5, 6], verschwindet, wenn das externe Magnetfeld in Richtung des Spin-Bahn-Felds des Nanodrahts zeigt.

Inzwischen sind zwei weitere Experimente, ebenfalls basierend auf InSb, aber mit zwei supraleitenden Kontakten, veröffentlicht worden [7, 8]. Rokhinson et al. beobachteten dabei Effekte, die sich auf eine Änderung der Periodizität des Josephson-Effekts zurückführen lassen, ein vielleicht noch direkterer Nachweis von Majorana-Fermionen [8]. Allerdings enthalten [7, 8] nicht die vielen von der Kouwenhoven-Gruppe durchgeführten Kontrollexperimente.

Natürlich sind die hier diskutierten Majorana-Fermionen „nur“ Quasiteilchen, d. h. Anregungen eines Kollektivs gewöhnlicher Elektronen, und mitnichten ein neues Elementarteilchen. Kann man abgesehen davon dennoch von der Entdeckung eines neuen Teilchens sprechen? Die Antwort darauf ist Nein und Ja zugleich. Die Majorana-Teilchen hier erfüllen nicht exakt die Gleichung, die Majorana für Elementarteilchen aufstellte: Schließlich handelt sich um gebundene Zustände ohne räum-

liche Freiheitsgrade. Um die Position eines Majorana-Fermions innerhalb des Nanodrahtes zu ändern, dem Teilchen also räumliche Freiheitsgrade zu verschaffen, muss die topologische Struktur des ganzen Nanodrahtes verändert werden, beispielsweise durch Gates. Berücksichtigt man dies, so verhalten sich die Majorana-„Fermionen“ nicht einmal wie Fermionen, sondern wie nichtabelsche Anyonen: Beim Vertauschen zweier Teilchen erhält die Wellenfunktion nicht einfach ein Minuszeichen, sondern wird mit einer unitären Matrix multipliziert, sodass auch die Reihenfolge der Vertauschungen wichtig wird. Der Nachweis dieses exotischen Charakters wird die große Herausforderung der Zukunft sein. Sollte er gelingen, wird man sicher mit Recht von einem neuen Teilchen sprechen können.

Michael Wimmer

Dr. Michael Wimmer, Instituut Lorentz, Universiteit Leiden, Niels Bohrweg 2, 2333CA Leiden, Niederlande

[1] V. Mourik et al., Science, 12. April 2012 DOI:10.1126/science.1222360  
 [2] A. Yu. Kitaev, Phys. Usp. 44 (Suppl.), 131 (2001)  
 [3] L. Fu and C. L. Kane, Phys. Rev. Lett. 100, 096407 (2008)  
 [4] C. W. J. Beenakker, arXiv:1112.1950; J. Alicea, arXiv:1202.1293  
 [5] R. M. Lutchyn, J. D. Sau and S. Das Sarma, Phys. Rev. Lett. 105, 077001 (2010)  
 [6] Y. Oreg, G. Refael and F. von Oppen, Phys. Rev. Lett. 105, 177002 (2010)  
 [7] M. T. Deng et al., arXiv:1204.4130  
 [8] L. Rokhinson et al. arXiv:1204.4212

ÜBERGESCHWAPPT

Wer kennt das nicht? Gerade hat man sich frischen Kaffee eingeschenkt, aber bereits auf dem Weg zum Schreibtisch schwappt ein Teil davon aus der Tasse. Diesem Problem haben sich zwei Wissenschaftler der University of California angenommen und untersucht, welche Faktoren dabei eine Rolle spielen. Dazu haben sie Testpersonen gebeten, mit einer vollen Kaffeetasse zu gehen und sich dabei entweder auf den Kaffee zu konzentrieren oder diesen zu ignorieren. Und siehe da: Wer auf den Kaffee achtet, verschüttet seltener etwas vom kostbaren Nass. In einem zylindrischen Becher, der 10 cm hoch ist und einen Durchmesser von 7 cm hat, regt der Kaffeträger bei normaler Gehgeschwindigkeit

eine „Kaffeeoszillation“ an. Bereits winzige Abweichungen, wie ein ungleichmäßiger Schritt oder ein kleiner Ruck, können diese Oszillation so verstärken, dass der Kaffee übergeschwappt. Was tun? Langsam gehen und etwa 1 cm zwischen Kaffee und Becherkante lassen, dann sollte dem Kaffeegenuss nichts mehr im Wege stehen. H. C. Mayer und R. Krechetnikov, Phys. Rev. E 85, 046117 (2012)

