

Innen isolierend, aussen leitend

Topologische Isolatoren sind am SNI ein wichtiges Thema

In den letzten Monaten haben wir immer mal wieder topologische Isolatoren erwähnt. Was hat es mit diesen Materialien auf sich, die zwar eigentlich Isolatoren sind, aber an ihren Kanten oder Oberflächen Strom leiten? Welche Hoffnungen sind mit diesen neuen Materialien verbunden, woher kommt der eigenartige Name und welche Fragen sind für Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler des SNI zurzeit relevant?

Neuartige, vielversprechende Materialien

Topologische Isolatoren sind eine ganz eigene Materialklasse, deren Beschreibung ein neues Forschungsfeld eröffnet hat, dem sich auch Wissenschaftler des SNI widmen.

Allen topologischen Isolatoren ist gemeinsam, dass sie sich in ihrem Inneren wie Isolatoren verhalten. Die Ränder dagegen haben metallische Eigenschaften und sind elektrisch leitend. Ein dreidimensionaler Kristall eines topologischen Isolators leitet den Strom also nur an seiner Oberfläche, während im Inneren kein Strom fließen kann. Zweidimensionale atomar-dünne topologische Materialien leiten nur an den Kanten und bei einem eindimensionalen Material bewegen sich die Ladungsträger nur an den beiden Enden.

Besonders ist neben diesem «Zwischenzustand» zwischen Isolator und Leiter, dass aufgrund quantenmechanischer Gesetze der Stromtransport in den erwähnten Bereichen nahezu verlustfrei erfolgt. Daher verspricht der Einsatz topologischer Materialien in elektronischen Bauteilen eine bisher nicht erreichte Effizienz ohne störende Wärmeentwicklung.

Zudem wird diskutiert, dass eindimensionale topologische Isolatoren ein idealer Speicher für Quanteninformation sein könnten. Ein Nanodraht wird dazu durch

Topologie

Die Topologie ist ein Teilgebiet der Mathematik. Sie befasst sich mit der schrittweisen Verformung von Strukturen. Aus einer Knetkugel lässt sich beispielsweise durch blosses Umformen eine Platte herstellen – weshalb Kugel und Platte topologisch gesehen dasselbe sind. Soll jedoch aus der Kugel ein Ring entstehen, müsste ein Loch hinzugefügt werden. Ring und Kugel sind topologisch gesehen verschieden.

Bei den topologischen Isolatoren sind die besonderen Eigenschaften sehr stabil und geschützt. Sie bleiben auch bei Fehlern im Material oder Veränderungen erhalten.



Kugel und Platte sind topologisch dasselbe. Sie unterscheiden sich topologisch von einem Ring oder einer Röhre, die wiederum topologisch gleich sind.

geeignete Massnahmen zu einem eindimensionalen topologischen Isolator gemacht. Dieser besitzt zwei «metallische» Randzustände – also leitende Bereiche – am linken sowie am rechten Ende des Drahtes. Aus diesen beiden Zuständen lässt sich ein Qubit, die kleinste Informationseinheit des Quantencomputers, definieren. Es kann nur schwer zerstört werden und wäre daher gut gegen Störungen von aussen geschützt.

Komplexe Ursachen

Bei einem topologischen Isolator wird nicht einfach ein leitendes mit einem isolierenden Material verbunden. Die Unterschiede in der elektrischen Leitfähigkeit entstehen erst durch

«Ich bin fasziniert, dass wir heute neue, in der Natur nicht vorkommende Materialien herstellen können – rein durch ein geschicktes Stapeln von zweidimensionalen Kristallen. Diese Kristalle können ganz neuartige Eigenschaften aufweisen und auch zu topologischen Isolatoren werden. Das macht es besonders spannend.»

Prof. Dr. Christian Schönberger forscht mit seinem Team ebenfalls an topologischen Isolatoren.

verschiedene Phänomene, die nicht ganz einfach zu verstehen sind und für die ein paar Grundlagen erklärt werden müssen.

Die Elektronen, die um die Atomkerne schwirren, sind für die chemischen Bindungen und damit für den Zusammenhalt eines Materials verantwortlich. Bei einem Isolator bilden alle Elektronen im sogenannten Valenzband Bindungen mit den benachbarten Atomen aus. Es handelt sich um kovalente, gesättigte Bindungen, die keinen Ladungstransport erlauben und das Material daher zum Isolator machen.

Physiker beschreiben einen Isolator etwas abstrakter. Die Bindungselektronen füllen alle möglichen Zustände des sogenannten Valenzbandes. Über eine Energielücke getrennt existiert neben dem voll besetzten Valenzband ein Leitungsband, in dem sich unter isolierenden Bedingungen jedoch keine Elektronen befinden. Die Energielücke beschreibt, wieviel Energie zugeführt werden muss, damit ein Elektron aus dem Valenzband in das Leitungsband «angeregt» wird. Dies kann beispielweise durch thermische Energie geschehen. Je grösser die Energielücke ist, desto mehr Energie muss zugefügt werden und desto besser ist der Isolator.

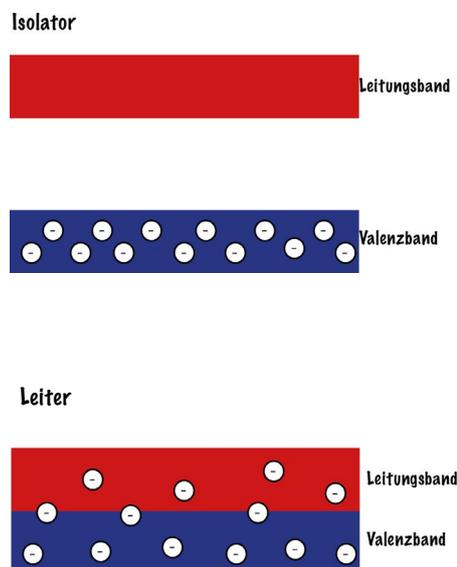
Bei einem Metall, das stromleitend ist, sind die chemischen Bindungen nicht kovalent gesättigt. Das Leitungsband und

das Valenzband überlappen, eine Energielücke existiert nicht. Es gibt daher immer frei bewegliche Elektronen und es bedarf keiner thermischen Anregung bevor Strom fließen kann. Auch bei tiefen Temperaturen sind Metalle daher elektrisch leitend.

Wenn Sie mehr über topologische Isolatoren erfahren wollen:

The birth of topological insulators

Joel E. Moore
Nature 464 (2010),
194–198
<https://www.nature.com/articles/re08916?draft=collection>



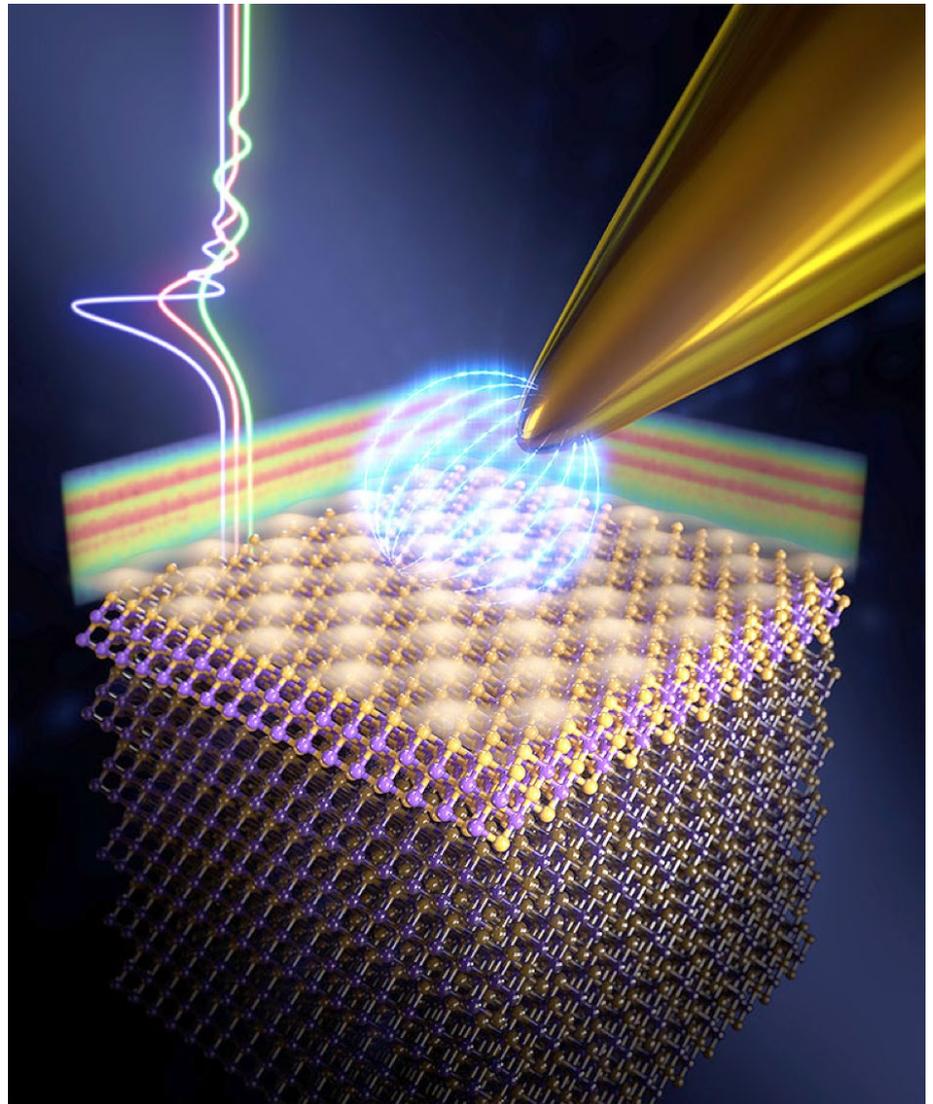
Bei einem Isolator sind Valenz- und Leitungsband durch eine Energielücke getrennt. Die Energielücke beschreibt, wieviel Energie zugeführt werden muss, damit ein Elektron aus dem Valenzband in das Leitungsband «angeregt» wird. Bei einem elektrischen Leiter existiert keine Energielücke. Es gibt daher immer frei bewegliche Elektronen und es bedarf keiner Anregung bevor Strom fließen kann.

Topologische Isolatoren besitzen im ihrem Inneren wie herkömmliche Isolatoren eine Energielücke und leiten den Strom nicht. An den Kanten oder bei dreidimensionalen Materialien an den Oberflächen des topologischen Isolators gibt es jedoch Zustände, deren Energien innerhalb dieser Energielücke liegen. Elektronen können diese Energiezustände einnehmen und sind damit in der Lage Strom zu leiten.

Topologisch geschützt

Jeder topologische Isolator wird durch einen topologischen Index gekennzeichnet. Dies ist ein numerischer Wert, der sich aus der Bandstruktur des Moleküls ableitet und sich nur sehr schwer verändern lässt. Wenn nun ein topologischer Isolator mit einem herkömmlichen Isolator in Berührung kommt, der einen anderen topologischen Index aufweist, verschwindet aufgrund der physikalischen Gesetze die Energielücke an der Berührungsstelle. Das Material bekommt an der Kontaktstelle metallische Eigenschaften und wird zum elektrischen Leiter.

Dies geschieht beispielsweise, wenn sich der topologische Isolator im Vakuum befindet. Im Vakuum fließt kein Strom, es ist ein Isolator. An der Grenzfläche zwischen topologischem Material und Vakuum fließt jedoch durch das Verschwinden der Energielücke Strom – bei einem dreidimensionalen Körper an den Aussenflächen, bei einer zweidimensionalen Schicht an den Kanten und bei einem eindimensionalen Nanodraht an den Enden. Veränderungen oder Fehler im Material verändern diese Eigenschaften des topologischen Isolators nicht. Im Fachjargon heisst dies, sie seien topologisch geschützt.



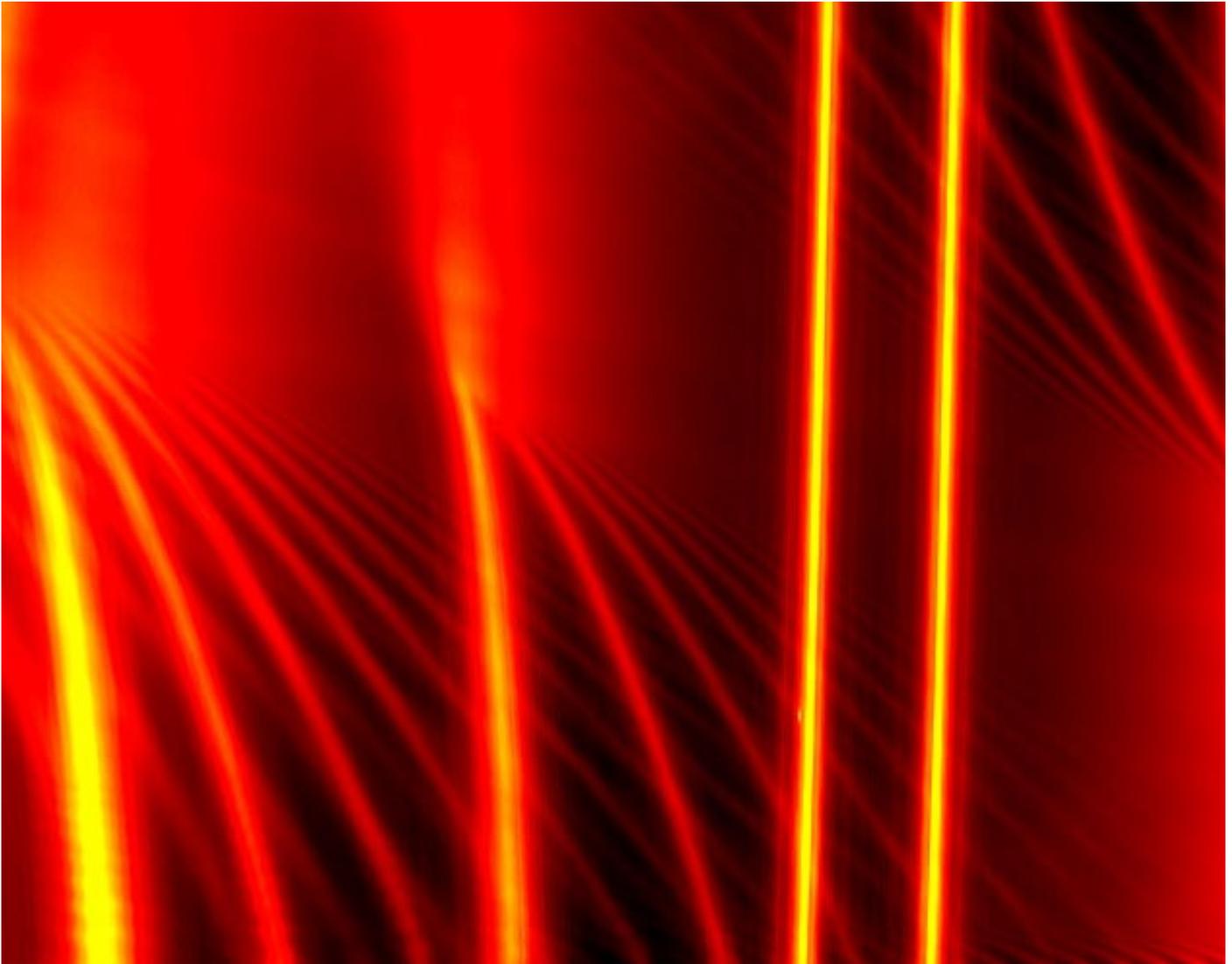
Die Goldspitze wird über die Oberfläche des topologischen Isolators bewegt und erfährt Energieverluste nur bei diskreten, quantisierten Energien (angedeutet durch die Kurven). Das hängt mit den Bildladungszuständen (engl. Image potential states, IPS) zusammen, die sich über der leitenden Oberfläche des topologischen Isolators bilden und schematisch im Hintergrund abgebildet sind. (Bild: Universität Basel, Departement Physik)

Kaum Reibung in topologischen Isolatoren

In Basel beschäftigen sich einige Forschungsgruppen mit diesen ganz besonderen Materialien. So zeigte die Gruppe von Professor Ernst Meyer kürzlich in «Nature Materials» erstmals anhand von Messungen, dass in topologischen Isolatoren durch Reibung wesentlich weniger Wärme erzeugt wird als in herkömmlichen Materialien. Dr. Dilek Yildiz hat dazu im Rahmen ihrer Doktorarbeit an der SNI-Doktorandenschule mithilfe eines Rasterkraftmikroskops im Pendelmodus untersucht, wie sich Reibung an der Oberfläche eines topologischen Isolators aus Bismut-Tellurid auswirkt. «Neben dem nur geringen Energieverlust durch Wärme, konnten wir einen neuartigen, quantenmechanischen Mechanismus beschreiben, mit dem sich die Reibung ganz gezielt steuern lässt. Das ist für potenzielle Anwendungen ganz entscheidend», bemerkt Professor Ernst Meyer.

Fingerabdruck möglich

Das Team von Professor Dominik Zumbühl hat eine Methode entwickelt, mit der die leitenden Bereiche eines topologischen Isolators



Gemessener Tunnelstrom in einem Quanten-Hall-System. Die Fächer aus roten und gelben Kurven entsprechen jeweils einem «Fingerabdruck» der leitenden Randzustände. Jede einzelne Kurve bildet dabei separat einen der Randkanäle ab. (Bild: Universität Basel, Departement Physik)

individuell untersucht werden könnten. Mithilfe der Tunnelspektroskopie konnten die Wissenschaftler einen exakten Fingerabdruck der leitenden Bereiche eines Quanten-Hall-Systems mit einer Auflösung im Nanometerbereich erstellen. Auch bei einem Quanten-Hall-System bilden sich am Rand leitende Bereiche (Randkanäle) aus. Die Forscher gehen davon aus, dass sich die Methode auch für die detailgenaue Untersuchung topologischer Isolatoren eignet.

Neue Materialien gesucht

Die Gruppe von Professor Christian Schönberger ist mit ihrer Forschung unter anderem auf der Suche nach ganz neuen Materialien, welche die Eigenschaften

eines topologischen Isolators besitzen. Im Rahmen eines ERC Advanced Grant untersucht die Gruppe sogenannte van der Waals-Heterostrukturen. Das sind Stapel zweidimensionaler Kristalle, die aus einzelnen Atomlagen verschiedener Materialien bestehen und durch van der Waals-Kräfte zusammengehalten werden. «Ich bin fasziniert, dass wir heute neue, in der Natur nicht vorkommende Materialien herstellen können – rein durch ein geschicktes Stapeln von zweidimensionalen Kristallen. Diese Kristalle können ganz neuartige Eigenschaften aufweisen und auch zu topologischen Isolatoren werden. Das macht es besonders spannend», kommentiert Christian Schönberger.

Wir werden sicher in den nächsten Jahren noch sehr viel mehr über topologische Materialien erfahren. Es wird sich zeigen, ob sie in elektronischen Bauteilen eingesetzt werden oder ob sie bei der Realisierung eines leistungsfähigen Quantencomputers eine Rolle spielen werden.