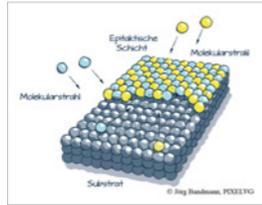


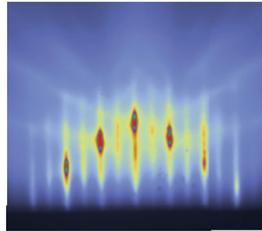
Extrem dünne, perfekte Kristallschichten stellen wir atomgenau aus unterschiedlichen Materialien mit Molekularstrahl-Epitaxie her. Die Dicke, Zusammensetzung und Qualität der Schichten kann man mithilfe der Beugung von Röntgenstrahlen oder Elektronenstrahlen bestimmen.

→ Bei der Molekularstrahl-Epitaxie werden Atome (gelb, blau) im Vakuum verdampft und diese ordnen sich auf dem Kristall (grau) in atomaren Lagen an.



Wir erzeugen und untersuchen auf diese Art „topologische Isolatoren“. Das sind Halbleiter aus schweren Elementen wie Quecksilber, Tellur, Bismut oder Zinn. Sie sind im Inneren isolierend, aber an ihren Oberflächen gibt es metallisch leitende Elektronenzustände.

→ Perfekte Kristalle beugen einen Elektronenstrahl in ein Linienmuster. Aus dem Abstand der Reflexe eines Röntgenstrahls können die Dicke und Zusammensetzung der Schicht bestimmt werden.



→ Topologische Isolatoren sind wie eine Keksdose: außen leitend und innen isolierend.



Perfekte Kristalle bestehen aus regelmäßig angeordneten Atomen. Um sie herzustellen, braucht es optimale Bedingungen:

- Ultrahochvakuum wie im Weltraum, erzeugt mit Pumpen, die Gase an kalten, reaktiven Oberflächen binden
- hochreine Molekül-Strahlen und Blenden
- ein passendes, kristallines Substrat bei richtiger Temperatur



↑ In einer der weltweit größten Ultrahochvakuum-Anlage mit sechs Molekularstrahl-Epitaxie-Kammern können wir Kristallschichten aus vielen verschiedenen Materialien herstellen.

Neben diesen aufwendigen Anlagen braucht es auch Geschick: Schaffst du, mit dem Kugelmodell den perfekten Kristall zu bauen?

↓ Die Topologie unterscheidet kompakte Körper und Körper mit Löchern: Krapfen und Nusscken haben eine einfache Topologie. Ein Donut (1 Loch) und eine Brezel (3 Löcher) haben nicht-triviale Topologien.

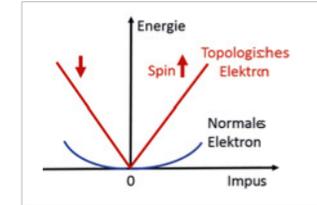
→ Mit Elektronenmikroskopie wird die perfekte Kristallstruktur einer nur acht Nanometer dicken Quecksilbertellurid-Schicht in Cadmium-Tellurid sichtbar.



Durch die Kopplung von Impuls und Spin können Elektronen in einer dünnen Schicht eines topologischen Isolatoren:

- nur an den Rändern Strom leiten
- sich mit 500 km/s bewegen, unabhängig vom Impuls (wie Licht)
- Strom ohne Widerstand leiten
- ausgerichtete Spins ohne Ladung transportieren, abhängig von der Impulsrichtung

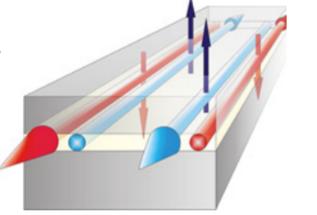
→ Die Energie $E = v \cdot p$ der spin-polarisierten Elektronen an der Oberfläche eines topologischen Isolatoren nimmt linear mit dem Impuls zu. Die Geschwindigkeit ist konstant $v = 500$ km/s, ähnlich wie bei Licht mit $v = 300.000$ km/s.



Die topologischen Eigenschaften der Elektronen erforschen wir in elektrischen Messungen bei extrem tiefen Temperaturen und sehr hohen Magnetfeldern. Topologische Elektronenzustände könnten in Zukunft genutzt werden für:

- Computerchips ohne Erwärmung
- Spintronik: Logik und Speicher mit Spins als „Bits“
- Quanten-Computer mit topologischen „Qubits“

→ Die Kopplung von Impuls und Spin der Elektronen bewirkt spin-polarisierte Ströme, die nur am Rand einer dünnen Schicht aus topologischem Isolator und ohne Widerstand fließen.



→ Quantencomputer rechnen mit „Qubits“, unendlich vielen Überlagerungen der Quantenzustände $|0\rangle$ und $|1\rangle$, während ein klassisches Bit nur entweder 0 oder 1 sein kann.

