



## **FORSCHUNGSARBEIT**

„Ein heißes Thema bei tiefen Temperaturen“

**VALENTIN L. MÜLLER**

Internationales Doktorandenkolleg Topologische Isolatoren

Julius-Maximilians-Universität Würzburg, Dezember 2018

# Ein heißes Thema bei tiefen Temperaturen

Valentin L. Müller ist Doktorand im Internationalen Doktorandenkolleg „Topologische Isolatoren“ des Elitenetzwerks Bayern am Standort Würzburg. Im Rahmen seines Promotionsvorhabens entwickelt er Techniken, um wenige Mikrometer große Strukturen basierend auf dem topologischen Isolator Quecksilbertellurid herzustellen und dessen grundlegende Eigenschaften zu untersuchen.

## Topologische Isolatoren

Bis vor kurzem wurden Festkörper in drei Kategorien unterteilt, denen jeweils die elektrischen Leitfähigkeiten zugrunde lagen: Leiter, Isolatoren und Halbleiter. Leiter enthalten eine große Anzahl beinahe freier Elektronen, die sich bedingt durch das Anlegen einer Spannung bewegen können. Sie sind folglich gute Leiter, haben also einen kleinen elektrischen Widerstand. Gute Leiter werden beispielsweise in Stromkabeln benötigt, um elektrischen Strom mit kleinen Verlusten zu transportieren. Isolatoren hingegen leiten den elektrischen Strom nicht, da ihre Elektronen fest an das zugrundeliegende Gitter gebunden sind. Solche Materialien können also als schützende Hülle um Stromkabel verwendet werden, damit man diese anfassen kann, ohne einen elektrischen Schlag zu bekommen. Halbleiter sind Isolatoren bei tiefen Temperaturen, leiten den Strom jedoch bei hohen Temperaturen, da dann ursprünglich fest gebundene Elektronen durch thermische Anregung in einen fast freien Zustand übergehen können. Solche Materialien werden in großem Umfang in der Halbleiterindustrie zur Herstellung von Computerchips verwendet.

Topologische Isolatoren können nicht in die oben genannten Kategorien eingeordnet werden. Diese Materialien sind in ihrem Inneren vergleichbar mit Isolatoren oder Halbleitern, leiten allerdings elektrischen Strom auch bei tiefen Temperaturen sehr gut. Um diesen Widerspruch zu verstehen, muss man einen Blick auf den Grenzbereich zwischen dem topologischen Isolator und dem ihn umgebenden Material werfen. Mithilfe von mathematischen Techniken aus dem Gebiet der Topologie kann gezeigt werden, dass sich in diesem Grenzbereich eine dünne Schicht leitender Elektronen bilden muss. Das Ausbilden dieser Schicht wird durch fundamentale Eigenschaften des topologischen Isolators bedingt und ist außergewöhnlich robust gegenüber äußeren Störungen. Diese ungewöhnliche Art der Leitfähigkeit bringt viele neue und spannende Phänomene mit sich, weshalb sich Physiker weltweit mit Grundlagenforschung in diesem Gebiet beschäftigen. Eine dieser bemerkenswerten Effekte ist, dass unter bestimmten Bedingungen der elektrische Widerstand eines topologischen Isolators unendlich klein werden kann!

## Quecksilbertellurid – Chancen und Herausforderungen

Viele Festkörper, die wir heutzutage zur Familie der topologischen Isolatoren zählen, sind aus anderen Gründen schon seit Jahrzehnten bekannt und erforscht. Allerdings haben erst vor wenigen Jahren theoretische Physiker die speziellen Eigenschaften dieser Materialien vorhergesagt. Wenig später konnten diese Vorhersagen experimentell bestätigt werden, da die Arbeitsgruppe von Professor Molenkamp 2007 nachwies, dass sich an den Grenzflächen von Quecksilbertellurid (HgTe) leitfähige Zustände ausbilden. Obwohl dieses Material schon seit den 60er Jahren zur Herstellung von Infrarotdetektoren verwendet wurde, hat es erst nach dieser Entdeckung Anerkennung als Paradebeispiel für topologische Isolatoren erfahren.

Das relative junge Forschungsgebiet der topologischen Isolatoren ist derzeit noch damit beschäftigt, grundlegende Eigenschaften dieser Materialien zu verstehen. Quecksilbertelluridschichten können in sehr

hoher Qualität hergestellt werden, weshalb dieses Material nach wie vor ein äußerst wichtiges Modellsystem ist. Ein großer Nachteil ist jedoch die geringe Widerstandsfähigkeit des Materials gegenüber mechanischer Einwirkung, höheren Temperaturen und einer Vielzahl von Chemikalien. Valentin entwickelt bestehende Herstellungsprozesse dahingehend weiter, dass man dünne Quecksilbertelluridschichten strukturieren kann, ohne das Material zu beschädigen. Letztendlich ist das Ziel, qualitativ hochwertige Mikrostrukturen herzustellen, anhand deren grundlegende Eigenschaften des Materials untersucht werden können.

Die dünnen Quecksilbertelluridschichten werden in Würzburg in herausragend hoher Qualität mithilfe einer speziellen Technik gewachsen, der sogenannten Molekularstrahlepitaxie. Das Strukturieren dieser Schichten findet in einem speziellen Labor statt, in dem die Luft speziell gefiltert wird, um die Konzentration von Staub möglichst gering zu halten und damit Kontaminationen der Probe zu verhindern. Die Herstellung einer einzelnen Probe kann durchaus mehrere Tage Arbeit in diesem Reinraum in Anspruch nehmen. Üblicherweise sind die resultierenden Strukturen nur wenige Mikrometer groß, was in etwa dem Durchmesser eines menschlichen Haars entspricht. Nach der Herstellung werden die Proben bis zu sehr tiefen Temperaturen heruntergekühlt, um die thermische Anregung von Elektronen zu verhindern. Meistens verwendet man dazu flüssiges Helium, was eine Temperatur von circa  $-269^{\circ}\text{C}$  hat. Die Leitfähigkeit bei diesen tiefen Temperaturen wird hauptsächlich durch die topologischen Oberflächenzustände bestimmt und kann als Funktion von externen Parametern wie elektrischen oder magnetischen Feldern, Temperatur oder Probengröße gemessen werden. Aus der Kombination der so gewonnenen Informationen kann man dann präzise Rückschlüsse auf grundlegenden Eigenschaften topologischer Isolatoren gewinnen.