

# Kurzzusammenfassung

Die bekanntlich beste Wahl um den Widerstand einer Probe zu messen und damit die Widerstandseigenschaften zu bestimmen, sind 4-Punkt elektronische Transportmessungen, weil die Kontaktwiderstände vernachlässigbar klein sind. Von den vielen bereits entdeckten Varianten der 4-Punkt-Methode, ist das 4-Spitzen Rastertunnelmikroskop das effektivste experimentelle Hilfsmittel zur Messung des Probenwiderstands auf kleinen Längenskalen, einschließlich der Möglichkeit den Spitzenabstand zu variieren.

Im Fokus der Grundlagenforschung stehen geschichtete Materialien aufgrund ihrer faszinierenden Eigenschaften und ihres hohen Potenzials in einer Vielzahl von Anwendungen. Darüber hinaus sind sie auch mögliche Eltern-Materialien für sogenannte 2D-Materialien aufgrund einer typischen, schwächeren chemischen Bindung entlang einer kristallinen Achse. Neben den bekannten Eltern-Materialien wie Graphit, hexagonales Bornitrid und Übergangs-Metall-Dichalkogenide gibt es eine weitere Klasse von geschichteten Materialien, die sogenannten MAX Phasen, welche sowohl metallische als auch keramische Eigenschaften umfassen. Diese einzigartige Kombination ergibt sich aus einem komplexen, anisotropen Bindungsschema, das zu einer anisotropen Leitfähigkeit führt. Werden diese geschichteten Materialien als dünne Filmproben hergestellt, umfassen sie in der Regel eine Bindungsanisotropie senkrecht zur Oberfläche. Somit wird eine Anisotropie zwischen den Leitfähigkeiten in der Ebene und senkrecht zur Probenoberfläche erwartet. Führt man die Widerstandsfähigkeit als Tensor zweiter Ordnung ein, können solche anisotropen elektronischen Transporteigenschaften bestimmt werden. Die Widerstandsfähigkeit wird dann durch eine symmetrisch abhängige Anzahl unabhängiger Komponenten ausgedrückt, die aus Widerstandsmessungen in verschiedenen Richtungen der Probe bestimmt werden können. Die Komponenten, welche in der Ebene liegen, können mit mehreren bekannten Methoden einfach charakterisiert werden. Solange ein Material nur als dünner Film hergestellt werden kann, ist es bislang nicht möglich die Widerstandsfähigkeitskomponente senkrecht zur Ebene ohne zusätzliche Behandlungen oder Modifikationen der Probe zu bestimmen.

Daher wird in dieser Arbeit eine neuartige direkte und parameterfreie Methode entwickelt, welche die senkrecht aus der Probe gerichtete Widerstandsfähigkeit ohne weitere Behandlung der Probe bestimmt. Mit einem Multi-Spitzen-Rastertunnelmikroskop werden 4-Punkt-Transportmessungen mit variablem Spitzenabstand durchgeführt. Die Beobachtung des Übergangs vom 3D-Transportbereich für kleine Abstände zwischen den Spitzen zum 2D-Bereich für große Abstände ermöglicht die Bestimmung der Widerstandsfähigkeiten, sowohl in der Ebene als auch senkrecht zur Ebene. Nach der analytischen Beschreibung der Methode werden die experimentellen Verfahren zur Messung der elektronischen Transporteigenschaften mit einem Multi-Spitzen-Rastertunnelmikroskop beschrieben, insbesondere die Einflüsse von Probengröße und -form, Oberflächenmorphologie und Korn-Größe, die Größe des Spitzen-Proben-Kontakts sowie die wichtigsten experimentellen Fehlerquellen.

Mit dieser Methode wird eine erste direkte und parameterfreie Messung der anisotropen elektrischen Widerstandsfähigkeit einer magnetischen  $(\text{Cr}_{0.5}\text{Mn}_{0.5})_2\text{GaC}$  MAX Phasen Probe vorgestellt. Mit Messungen auf nur einer dünnen Filmprobe ermöglicht die Beobachtung des Übergangs zwischen dem 3D- und dem 2D-Transportfall die gleichzeitige Bestimmung von in der Ebene und senkrecht zur Ebene gerichteten Widerstandsfähigkeiten und ergibt eine große Anisotropie. Die Widerstandsfähigkeit senkrecht zur Ebene ist um den Faktor 500 größer als die in der Ebene, was auf das komplexe Bindungsschema der MAX Phasen zurückzuführen ist. Das hier bestimmte

Verhältnis der Widerstandsfähigkeiten gibt einen besseren und quantitativeren Einblick in das Zusammenspiel von kristalliner Struktur, Bindungsstruktur und elektronischen Transporteigenschaften.

Zusätzlich werden  $(\text{Cr}_{2/3}\text{Ho}_{1/3})_2\text{AlC}$  Kristallite, die zu den i-MAX Phasen mit chemischer Ordnung in der Ebene gehören, untersucht. Die Ergebnisse liefern signifikante Hinweise auf eine anisotrope Widerstandsfähigkeit sowohl in als auch senkrecht zu der Ebene. Die Anisotropie in der Ebene ist eine Folge der chemischen Ordnung der Übergangsatome und der seltenen Erd-Atome. Die im Vergleich zu herkömmlichen MAX Phasen schwächere Anisotropie zwischen der senkrecht zur Ebene und in der Ebene liegende Widerstandsfähigkeit wird durch die Vorhersagen über geringere anisotrope Bandstrukturen für i-MAX Phasen bestätigt. Diese Messungen stellen die erste Charakterisierung der anisotropen Widerstandsfähigkeit in einer i-MAX Phase dar. Darüber hinaus sind sie ein *Proof-of-Principle* für die Bestimmung des gesamten Widerstandsfähigkeitensensors eines Materials mit orthorhombischer oder höherer Symmetrie durch die Hilfe der 4-Punkt elektronischen Transportmessungen an einzelnen dünnen oder kristallinen Proben.