

Lina Bockhorn

Quantenwelten in 2D Materialien

Das Verhalten von elektrischen Bauteilen kann mit fortschreitender Miniaturisierung nicht mehr nur durch klassische Physik beschrieben werden, sondern auch quantenmechanische Effekte müssen berücksichtigt werden. Dabei sind nicht alle quantenmechanischen Eigenschaften unerwünscht, so dass nach neuen Materialien gesucht wird, die die klassischen siliziumbasierten Bauteile ergänzen können. Auf der Suche nach vielversprechenden Kandidaten für maßgeschneiderte elektrische Bauteile sind 2D Materialien aufgrund ihrer ungewöhnlichen physikalischen Eigenschaften in den Fokus geraten. Insbesondere die Kombination von verschiedenen 2D Materialien zu Heterostrukturen ermöglicht die Anpassung optischer, mechanischer, elektronischer und magnetischer Eigenschaften.

Um einen Einblick in den Ladungstransport oder die elektrische Bandstruktur eines neuen 2D Materials zu erhalten, eignen sich elektrische Transportmessungen. Hierfür wird typischerweise ein konstanter Strom über die Probe angelegt und eine Spannung gemessen. Aufgrund der höheren Qualität wird für Transportmessungen exfoliertes 2D Material genutzt, allerdings steht dann nur eine Fläche von wenigen $10 \mu\text{m}^2$ für die elektrische Kontaktierung zu Verfügung, wie z. B. in Abb. 1 (a) zu sehen ist. Dies erfordert einen höheren technischen Aufwand, unter anderem Elektronenstrahlolithografie, welcher aber mit einem tieferen Einblick in die elektronischen Eigenschaften des 2D Materials belohnt wird. Die Strukturierung einer zusätzlichen Gate-Elektrode ermöglicht die Durchstimbarkeit der Ladungsträgerdichte. Um den quantenmechanischen Transport an einer kontaktierten Probe zu beobachten, muss die thermisch angeregte Bewegung der Ladungsträger minimiert werden. Aus diesem Grund werden Transportmessungen häufig bei sehr tiefen Temperaturen unter 1,5 K durchgeführt.

Ein 2D Material, das bekannt ist für seine ungewöhnlichen elektrischen Eigenschaften, ist Graphen [1, 2]. Graphen ist eine Modifikation des Kohlenstoffs mit zweidimensionaler Struktur, welches in einer hexagonalen Struktur kristallisiert. Da Graphen keine Bandlücke aufweist, eignet es sich nicht als klassisches, elektronisches Bauteil, was nicht seiner Faszination schadet. Nahe den Punkten, an denen sich Leitungs- und Valenzband berühren, ist die Dispersionsrelation

Dr. Lina Bockhorn
 Institut für Festkörperphysik - Abteilung Nanostrukturen
 Leibniz Universität Hannover
 Appelstraße 2, D-30167 Hannover
 bockhorn@nano.uni-hannover.de
<https://www.fkp.uni-hannover.de/de/arbeitsgruppen/ag-haug>
 DOI-Nr.: 10.26125/s4jk-fg74

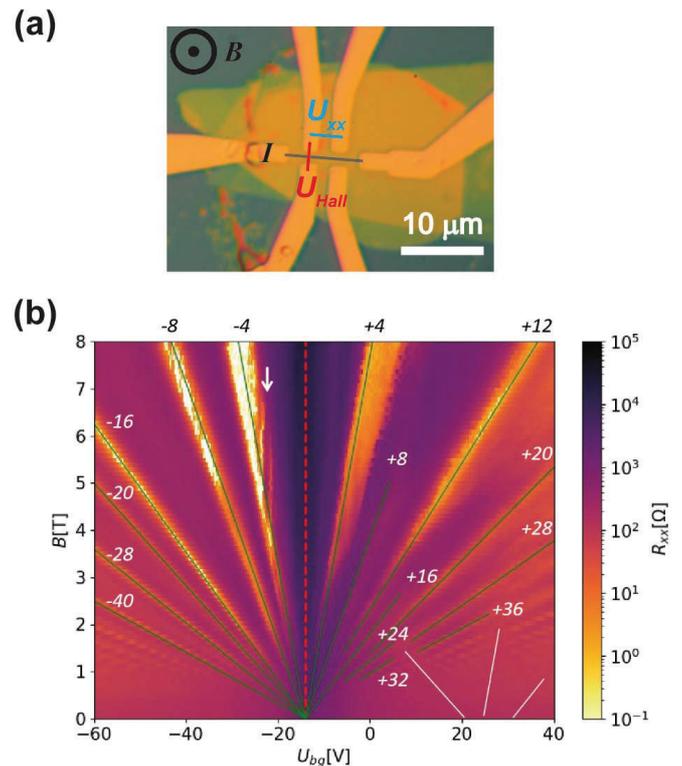


Abb. 1: (a) Optische Aufnahme einer kontaktierten verdrehten Graphendoppellage eingekapselt in Bornitrid [3] (b) Längswiderstand $R_{xx} = U_{xx}/I$ in Abhängigkeit vom Magnetfeld B und einer Gate-Spannung U_{bg} gemessen an einer verdrehten Graphendoppellage [4]. Deutlich lässt sich um -17 V ein Landau-Fächer beobachten. Ein zweiter Landau-Fächer, dessen Ursprung das Moiré-Gitter ist, ist bei etwa 23 V zu sehen.

für eine Einzellige Graphen linear, welche sonst nur für relativistische masselose Teilchen beobachtet wird. So lassen sich die elektronischen Eigenschaften durch die Dirac-Gleichung beschreiben und sich eine Chiralität von Graphen herleiten. Die Chiralität ist verantwortlich für die hohe Leitfähigkeit von Graphen und ermöglicht ein perfektes quantenmechanisches Tunneln.

Zur Untersuchung der elektronischen Eigenschaften von Graphen wird ein magnetfeldinduziertes quantenmechanisches Phänomen genutzt, der Quanten-Hall-Effekt. Hierfür wird neben den elektrischen Transportmessungen bei tiefen Temperaturen ein hohes Magnetfeld benötigt, das durch eine supraleitende Spule in einem Kryostaten erzeugt wird. Wie in Abb. 1 (a) dargestellt, wird das Magnetfeld B senkrecht zur Probenebene angelegt, so dass senkrecht zum angelegten Strom die Hall-Spannung U_{Hall} beobachtet wird sowie längs zum Strom die Längsspannung U_{xx} . Im Gegensatz zum klassischen linearen Anstieg der Hall-Spannung mit dem Magnetfeld werden im quantenmechanischen Regime Plateaus beobachtet. Begleitet

werden die Plateaus in der Hall-Spannung von Minima in der Längsspannung, so dass die Längsspannung U_{xx} oszilliert; auch Shubnikov-de Haas Oszillation genannt. Die Ursache hierfür ist, dass im Magnetfeld die Ladungsträgerzustände quantisieren und diskrete Energieniveaus ausbilden, die Landau-Niveaus. Die Hall-Plateaus sowie die korrespondierenden Minima in der Längsspannung markieren den Übergang zwischen einzelnen Landau-Niveaus. Neben dem Magnetfeld kann auch die Ladungsträgerkonzentration mit der Gate-Elektrode variiert werden, so dass die diskreten Energieniveaus als Fächer, auch Landau-Fächer, sichtbar werden. In Abb. 1 (b) ist der Längswiderstand, $R_{xx} = U_{xx}/I$, in Abhängigkeit vom Magnetfeld B und einer Gate-Spannung U_{bg} bzw. der Ladungsträgerdichte zu sehen. Deutlich lässt sich um $U_{bg} = -17$ V ein Landau-Fächer beobachten.

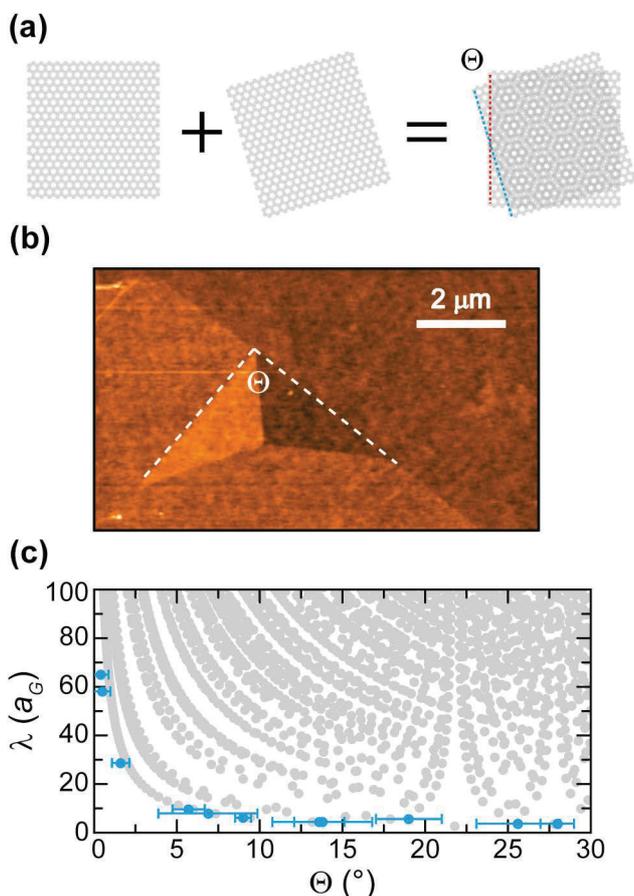


Abb. 2: (a) Werden zwei periodische Gitter unter einem bestimmten Winkel Θ kombiniert, wird ein Übergitter mit der gleichen Struktur sichtbar. (b) Rasterkraftmikroskopische Aufnahme einer gefalteten Graphenprobe [9]. (c) Die grauen Punkte entsprechen vollständig periodischen Konfigurationen des Moiré-Gitters in Abhängigkeit der Wellenlänge λ . Die finalen Drehwinkel für Strukturen vergleichbar mit (b) sind als blaue Punkte dargestellt [9].

Beim Stapeln von einzelnen oder mehreren Graphenlagen unter einem bestimmten Winkel Θ übereinander entsteht durch die Kombination von zwei periodischen Gittern ein Übergitter, das Moiré-Gitter, das die ursprüngliche hexagonale Struktur auf größerer Skala widerspiegelt, siehe Abb. 2 (a). Dadurch eröffnen sich neue physikalische Eigenschaften, die stark vom Winkel Θ zwischen den einzelnen Graphenlagen abhängen [5, 6, 7], z. B. zeigt Graphen supraleitende Eigenschaften bei bestimmten kleinen Winkeln [8]. Bei hinreichend kleinen Win-

keln überlagern sich die Dispersionsrelationen der einzelnen Graphenlagen und können nicht mehr unabhängig voneinander betrachtet werden, sie hybridisieren und die Bandstruktur wird immer flacher. Dann wird zusätzlich zum erwarteten Landau-Fächer ein zweiter Landau-Fächer beobachtet, der vom Moiré-Gitter verursacht wird, wie es z. B. in Abb. 1(b) zu sehen ist.

Nicht nur das Stapeln von einzelnen Graphenlagen ist möglich, sondern auch das Falten. Vergleichbar mit Papier lassen sich aus Graphen sogar kunstvolle Origami und Kirigami Figuren herstellen. Dabei handelt es sich nicht nur um Kunst, sondern dies hat ebenso einen wissenschaftlichen Nutzen. Als Pendant zur Schere dient hier eine harte, meist Diamant beschichtete Rasterkraftmikroskopspitze, mit der in Graphen geschnitten wird, um einen Faltprozess auszulösen [9, 10]. In Abb. 2 (b) ist eine rasterkraftmikroskopische Aufnahme einer gefalteten Graphenprobe zu sehen. Diese hat sich während des Faltprozesses nicht nur vorwärtsbewegt, sondern sich auch um einen bestimmten Winkel gedreht [11]. Die Auswertung der Drehwinkel dieser Art von gefalteten Graphenproben ermöglichen einen tiefen Einblick in den Faltprozess. Der Faltprozess kommt zum Erliegen, wenn das Moiré-Gitter vollständig periodisch ist. In Abb. 2 (c) ist eine Auswahl von Winkeln in Abhängigkeit von der Wellenfunktion λ dargestellt, bei denen das Moiré-Gitter vollständig periodisch ist [12]. Die finalen Winkel der gefalteten Graphenproben sind als blaue Punkte zu sehen. Hier wird deutlich, dass der Faltprozess bei periodischen Konfigurationen des Moiré-Gitters stoppt [11]. Gefaltete Graphenproben sind nicht nur für ihre spannenden geometrischen Eigenschaften bekannt, sondern zeigen auch einzigartige elektrische Eigenschaften. Hier lassen sich nicht nur typische elektrische Eigenschaften von verdrehten Graphendoppellagen beobachten, sondern auch ein Einfluss der Faltkante, die beide Lagen miteinander verbindet. An der Faltkante existiert ein scharfer Übergang zwischen zwei Bereichen, in denen sowohl ein äußeres Magnetfeld als auch das elektrische Feld in unterschiedliche Richtungen zeigen. Dieser scharfe Übergangsbereich ermöglicht die Beobachtung von topologischen Phänomenen [13], wie z.B. Snake-States.

Noch gibt es wenige technische Anwendungen von 2D Materialien, z. B. die Graphen-Widerstandsnormale, aber dennoch bleibt die Welt der 2D Materialien und ihrer elektrischen Eigenschaften ein Feld mit großem Potential. Ein gutes Beispiel hierfür ist Hafniumpentatellurid (HfTe_5) aus der Familie der Übergangsmetallchalkogenide. Während das Volumenmaterial von HfTe_5 eine kleine Bandlücke von etwa 22 meV bis 50 meV hat [14, 15, 16], wird theoretisch vorhergesagt, dass einzelne Lagen dieses Materials Quanten-Spin-Hall-Isolatoren mit einer großen Bandlücke sind. Anhand von temperaturabhängigen Transportmessungen an unterschiedlich dicken HfTe_5 wurde deutlich, dass die Bandlücke mit abnehmender Schichtdicke zunimmt. Daraus wurde für eine Einzellage eine Bandlücke von 403 meV extrapoliert [17], was nahezu exakt der theoretischen Vorhersage entspricht [18]. Anhand dieser Beispiele zeigt sich, dass die Untersuchung der elektrischen Eigenschaften von 2D Materialien immer wieder neue spannende Phänomene hervorbringt, die den technischen Aufwand bei der Probenherstellung rechtfertigt.

Referenzen

- [1] K. S. Novoselov et al., *Science* **306**, 666 (2004).
- [2] A. K. Geim and K. S. Novoselov, *Nat. Mater.* **6**, 183 (2007).
- [3] X. Zhang, Masterarbeit, Leibniz Universität Hannover (2022).
- [4] B. Zheng, Masterarbeit, Leibniz Universität Hannover (2020).
- [5] J. D. Sanchez-Yamagishi et al., *Phys. Rev. Lett.* **108**, 076601 (2012).
- [6] Y. Kim et al., *Phys. Rev. Lett.* **110**, 096602 (2013).
- [7] H. Schmidt et al., *Nature Communications* **5**, 5742 (2014).
- [8] Y. Cao et al., *Nature* **556**, 43–50 (2018).
- [9] J. C. Rode et al., *Ann. Phys.* **529**, 1700025 (2017).
- [10] J. C. Rode et al., *2D Mater.* **6**, 015021 (2018).
- [11] L. Bockhorn et al., *Appl. Phys. Lett.* **118**, 173101 (2021).
- [12] E. J. Mele, *Phys. Rev. B* **81**, 161405 (2010).
- [13] S. J. Hong et al., *2D Mater.* **8**, 045009, (2021).
- [14] Z. Fan et al., *Sci. Rep.* **7**, 45667 (2017).
- [15] H. Wang et al., *Phys. Rev. B* **93**, 165127 (2016).
- [16] Y. Zhang et al., *Sci. Bull.* **62**, 950–6 (2017).
- [17] C. Belke et al., *2D Mater.* **8**, 0350292021 (2021).
- [18] H. Weng, Xi Dai and Z. Fang, *Phys. Rev. X* **4**, 011002 (2014).

ZITATBOX

Albert Schweitzer (1875 - 1965)

„Die höchste Erkenntnis, zu der man gelangen kann, ist die Sehnsucht nach Frieden.“

„Mit den Jahren runzelt die Haut, mit dem Verzicht auf Begeisterung aber runzelt die Seele.“

„Der Zufall ist das Pseudonym, das der liebe Gott wählt, wenn er inkognito bleiben will.“

„Gut ist Leben erhalten, Leben fördern, entwicklungs-fähiges Leben auf seinen höchsten Wert bringen. Böse ist Leben vernichten, Leben beeinträchtigen, entwicklungs-fähiges Leben hemmen. Das Leben als solches ist das geheimnisvoll Wertvolle, dem ich in Gedanken und Tun Ehrfurcht zu erweisen habe.“

„Man muss seinen Mitmenschen Zeit widmen; denn wir leben nicht in einer Welt, die uns allein gehört.“

„Wir leben in einem gefährlichen Zeitalter. Der Mensch beherrscht die Natur, bevor er gelernt hat, sich selbst zu beherrschen.“

Quelle: <https://gutezitate.com/autor/albert-schweitzer>

Dr. Lina Bockhorn



Als Kind wollte ich entweder Rallye-Fahrerin oder Wissenschaftlerin werden. Beides habe ich in den folgenden Jahren nicht weiterverfolgt, weil mir noch nicht klar war, ob ich den elterlichen landwirtschaftlichen Betrieb übernehmen möchte oder wenigstens Tiermedizin studieren sollte. Erst in der Oberstufe hat mich mein damaliger Physik-LK-Lehrer ermutigt, etwas zu wählen was meinen Stärken entspricht. So schrieb ich mich 2002 für den Diplomstudiengang Physik an der Leibniz Universität Hannover ein.

Da mir die Laborpraktika in der Festkörperphysik am besten gefielen, bat ich Prof. Rolf J. Haug 2007 um eine Diplomarbeit und forschte ein Jahr lang im Regime des fraktionalen Quanten-Hall-Effektes. Dazu gehörte neben Magnetotransportmessungen bei Temperaturen im mK-Bereich auch die Arbeit in einem Reinraum. Da mir diese Arbeit gefiel, war ich hochofrenet 2008 über die Möglichkeit eine Doktorarbeit zu einem ähnlichen Thema zu schreiben. Nach viel Zeit im Labor, den üblichen wissenschaftlichen Unwägbarkeiten und einigen internationalen Konferenzen, habe ich 2013 meine Doktorarbeit mit dem Titel „Untersuchung der Magnetotransporteigenschaften von hochbeweglichen zweidimensionalen Elektronensystemen“ verteidigt.

Nach einer kurzen Postdoc-Phase sowie einem Ausflug in die Wirtschaft, fing ich 2016 bei der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt (PTB) in der Abteilung Radioaktivität an. Klingt zunächst ungewöhnlich für eine Festkörperphysikerin, aber zu diesem Zeitpunkt wurde in der Abteilung ein neuartiges, hochauflösendes Beta-spektrometer aufgebaut, so dass Kenntnisse im Bereich der Tieftemperatur- als auch der Halbleiterphysik benötigt wurden. Ich hatte Freude daran ein Labor aufzubauen, erste Proben zu realisieren und am Ende zu sehen, wie das Projekt erfolgreich anlief.

Trotz der einzigartigen Forschungsumgebung an der PTB und der guten interdisziplinären Zusammenarbeit, fehlte mir oft der Umgang mit dem wissenschaftlichen Nachwuchs. Umso erfreuter war ich, als ich 2019 im Rahmen vom Exzellenzcluster Quantum Frontiers eine Stelle zum Thema 2D Materialien an der Leibniz Universität Hannover bekam. Nun befasse ich mich mit den elektronischen Eigenschaften von verdrehten Graphendoppellagen sowie Streuphänomenen in zweidimensionalen Elektronengasen. Zudem halte ich seit letztem Jahr eine Vorlesung, die sich mit den physikalischen Eigenschaften von 2D Materialien befasst, und betreue mehrere Master- und Bachelorarbeiten.