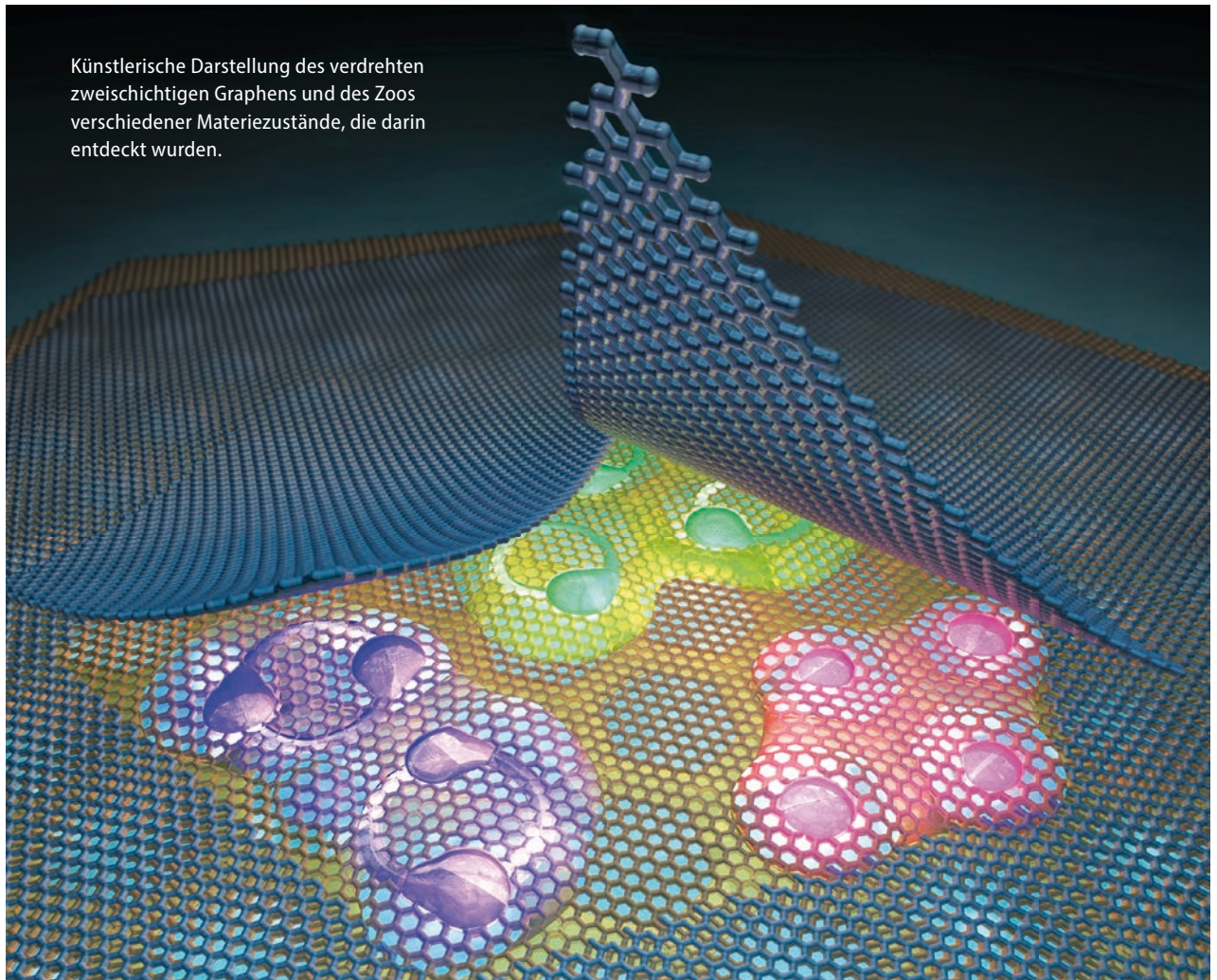


Künstlerische Darstellung des verdrehten zweischichtigen Graphens und des Zoos verschiedener Materiezustände, die darin entdeckt wurden.



## FESTKÖRPERPHYSIK

# Effektvolle Drehung

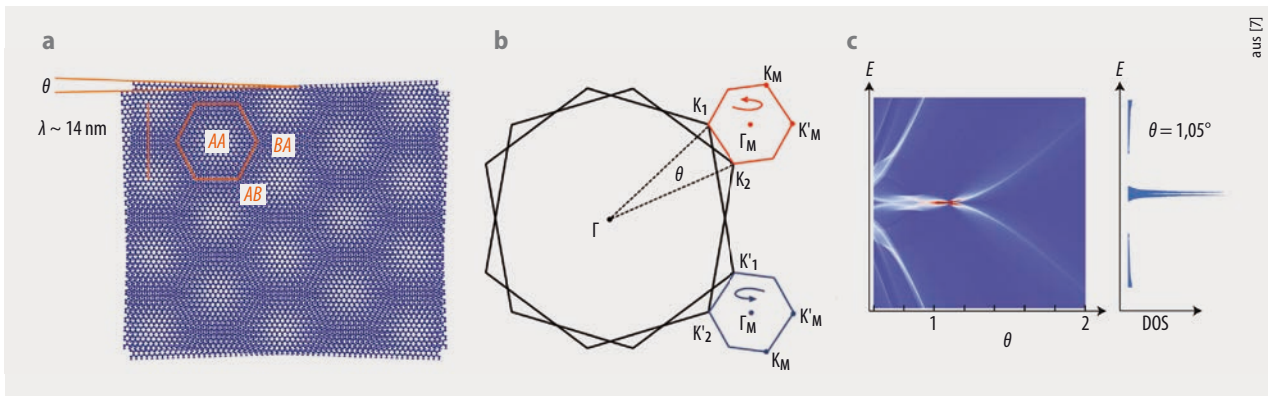
Eine einfache Drehung zweier Graphenschichten unter dem „magischen“ Winkel sorgt für eine Vielzahl neuer Zustände und exotischer Eigenschaften.

Dmitri K. Efetov

Die Entdeckung neuartiger Materialien hat seit der Steinzeit technologische Revolutionen ausgelöst. Die heutzutage wichtigsten Materialien sind die Bausteine moderner Technologien wie Halbleiter, Magnete oder Supraleiter. Sie bilden die Grundlage für Computerchips, Speicher und wissenschaftliche Geräte. Für die weitere Entwicklung wären Materialien wünschenswert, die viele unterschiedliche Eigenschaften gleichzeitig besitzen können. Diese sollten gesteuert ein- und ausschaltbar sein, um je nach Bedarf per Knopfdruck einen Magneten oder einen Supraleiter zu erhalten.

Traditionell sind Materialeigenschaften das Ergebnis der Zusammensetzung und Anordnung von Atomen in Kristallen. Abhängig davon, welche Atomspezies in einem Material gemischt sind, ordnen sich die Atome in unterschiedlichen periodischen Strukturen mit verschiedenen Symmetrien und elektronischen Eigenschaften an. Diese Attribute definieren somit die Eigenschaften des Materials und bestimmen, ob es beispielsweise ein Halbleiter, Magnet oder Supraleiter ist.

Um immer reichhaltigere Materialeffekte zu finden, hat sich die Wissenschaft in den letzten Jahrzehnten darauf



**Abb. 1** Werden zwei Schichten Graphen um genau  $1,1^\circ$  gegeneinander verdreht, entsteht ein Moiré-Potential (a). Die Einheitszelle ist viel größer als bei einschichtigem Graphen. Die Brillouin-Zonen der beiden einzelnen Graphenschichten werden im Impulsraum ebenfalls um den Winkel  $\theta$  gedreht. Das Moiré-Potential führt zu zwei entarteten Mini-Brillouin-Zonen in den K- und K'-Punkten. Diese Täler bewirken eine vierfache Entartung der Elektronen (b). Die Zustandsdichte ist eine kontinuierliche Funktion von  $\theta$  (c) und kennzeichnet die Entwicklung der Bandstruktur mit dem Winkel  $\theta$ . Die Breite der Bänder nahe  $\theta \sim 1,1^\circ$  konvergiert gegen Null, sodass sich ultraflache Bänder mit ultrahoher Zustandsdichte (DOS) bilden.

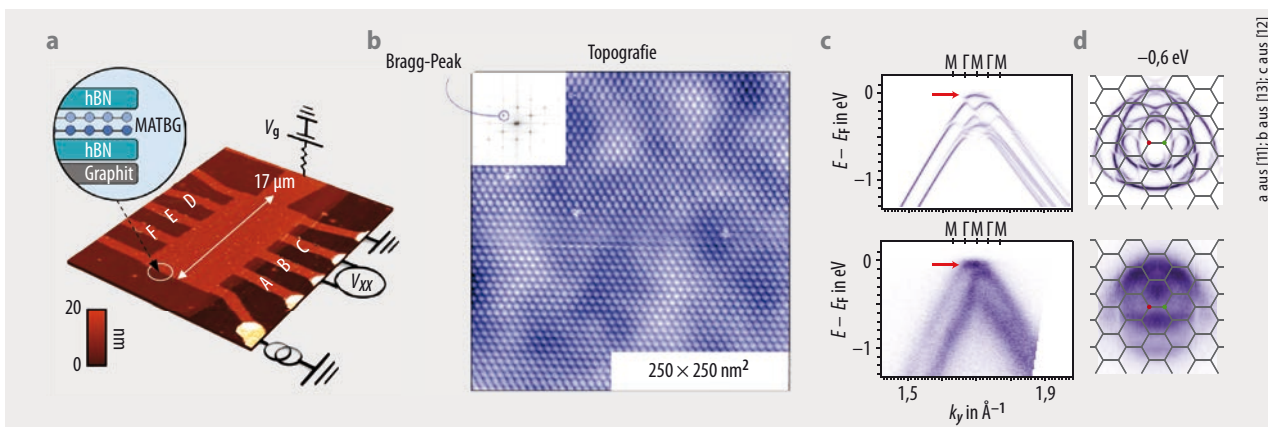
konzentriert, immer kompliziertere Kristalle herzustellen. Damit ist es gelungen, eine zunehmende Anzahl verschiedener Atomspesies in einem Material zu mischen und eine Vielfalt exotischer Spezies zu entdecken, die in der Natur nicht vorkommen. Ein Beispiel ist der Kuprat-Supraleiter  $\text{Hg}_{12}\text{Tl}_3\text{Ba}_{30}\text{Ca}_{30}\text{Cu}_{45}\text{O}_{127}$ . Um diese Materialien in der modernen Elektronik einzusetzen, müssen ihre Abmessungen nanometerklein sein. Die Miniaturisierung hat zudem einen weiteren positiven Effekt: Da die Materialien zunehmend empfindlich gegenüber angelegten elektrischen und magnetischen Feldern werden, können wir diese Felder nutzen, um die Materialeigenschaften kontrolliert zu verändern.

### Verdrehtes Graphen in zwei Lagen

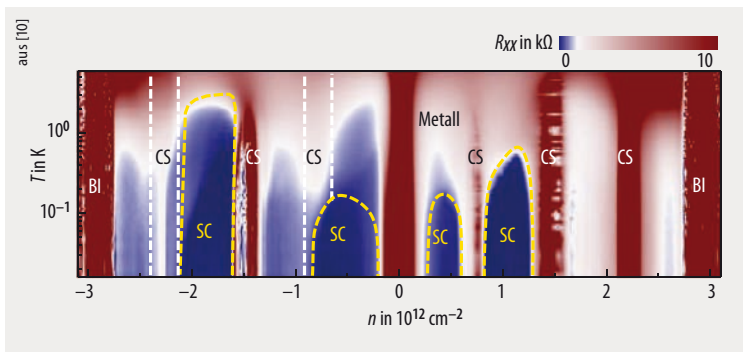
Besondere Eigenschaften besitzen zwei Graphenschichten, die leicht verdreht übereinander liegen (Twisted Bilayer Graphene). Graphen besteht aus Kohlenstoff und ist das

dünnste Material, das in einem zweidimensionalen hexagonalen Gitter angeordnet ist. Graphen gilt seit seiner Entdeckung im Jahr 2004 als Kandidat, um die Elektronik zu revolutionieren [1]. Es ist ein elektronischer Leiter, in dem sich der Strom leicht mithilfe einer äußeren Spannung steuern lässt. Aufgrund seiner Einfachheit fehlen jedoch kompliziertere elektronische Phasen wie magnetische oder supraleitende.

Das ändert sich, wenn eine zweite Graphenschicht ins Spiel kommt: Ein Team von Physikern am MIT unter Leitung von Pablo Jarillo-Herrero experimentierte mit Graphen und versuchte, zwei Schichten verdreht übereinanderzulegen [2, 3]. Alle früheren Versuche hatten gezeigt, dass sich die Eigenschaften von solchem Bilayer-Graphen nicht sehr von denen einzelner Schichten unterscheiden. Basierend auf einer Vorhersage von Allan MacDonald [4], einem Physiker der University of Texas in Austin, aus dem Jahr 2011, erkannte Jarillo-Herrero jedoch, dass eine sehr



**Abb. 2** Die Strukturen einer typischen Probe des verdrehten zweilagigen Graphens lassen sich mittels Rasterkraftmikroskopie und Transportmessschaltung darstellen (a). Das Graphen (MATBG) ist in einer vierfachen Van-der-Waals-Heterostruktur eingeschlossen, die aus zweidimensionalen hexagonalen Bornitrid-Isolatoren und einer metallischen Graphitschicht besteht. Diese dient als Gate zur kapazitiven Steuerung der Trägerdichte im Graphen. Die Kartierung der Proben mittels Rastertunnelmikroskopie zeigt das Moiré-Potential mit den periodisch ausgerichteten AA-Moiré-Gitterstellen, die durch die Bragg-Peaks hervorgehoben wurden (b). Theoretische Berechnungen und Photoemissionsspektroskopie der Energiedispersion und der Fermi-Oberfläche von zweilagigem Graphen, das unter einem Winkel  $\theta \sim 1,3^\circ$  verdreht ist, stimmen gut überein (c). Im Vergleich zu normalem zweilagigen Graphen ist die Bandstruktur stark renormalisiert, wobei sich ultraflache Bänder nahe dem Energienullpunkt bilden (Pfeile).

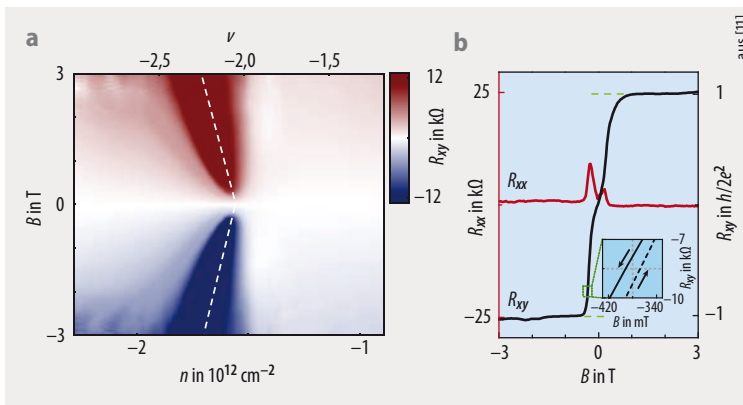


**Abb. 3** Die Transportmessungen in den flachen Bändern der magischen Graphenschichten sind als Funktion der Temperatur und der Ladungsträgerdichte gezeigt. Die vierfach entarteten Moiré-Bänder lassen sich kontinuierlich durch das Gate füllen und entleeren und zeigen eine Folge korrelierter Isolatorzustände (CS, rot) bei ganzzahliger Füllung  $\pm 1, \pm 2, \pm 3$  der Elektronen oder Löcher pro Moiré-Einheitszelle. Diese sind von supraleitenden Kuppeln flankiert (SC, blau).

leichte Drehung der beiden Graphenschichten gegeneinander einen großen Unterschied machen kann. Eine zweilagige Graphenschicht, verdreht unter dem magischen Winkel von  $1,1^\circ$ , wird beim Abkühlen nahe dem absoluten Nullpunkt zu einem korrelierten Isolator und gleichzeitig, bei einer etwas anderen Elektronendichte, zu einem Supraleiter [2, 3]. Dies ist erstaunlich, da sich die Elektronen in einem korrelierten Isolator aufgrund einer starken Elektronen-Wechselwirkung lokalisieren, während sie sich in einem Supraleiter ungehindert bewegen können. Weitere Experimente zeigten, dass sich dieses verdrehte Graphen unter leicht unterschiedlichen Bedingungen magnetisch verhält [5] und topologische Phasen besitzt [6]. Das gleichzeitige Auftreten dieser Eigenschaften und die Möglichkeit, durch einfaches Anlegen einer Spannung zwischen ihnen zu wählen, macht verdrehtes zweilagiges Graphen zu einem der exotischsten Materialien der Festkörperphysik.

### Vom Moiré-Übergitter zu flachen Energiebändern

Ein Schlüssel für all diese Phasen in verdrehten Graphen-Doppelschichten ist das periodische Moiré-Potential, das



**Abb. 4** Die Transportmessungen von Chern-Isolatorzuständen, die bei einem Füllfaktor  $\nu = -2$  in verdrehtem zweilagigen Graphen entstehen, führen zu einem quantisierten Hall-Widerstand im Phasenraum der Dichte gegen das Magnetfeld (a). Diese Zustände quantisieren in Abwesenheit eines Magnetfelds und zeigen eine beträchtliche magnetische Hysterese (b).

zwischen den beiden verdrehten Graphenschichten entsteht. Der Name Moiré stammt von Mohairziegen, deren Wolle beim Zusammenklumpen ein ähnliches Muster erzeugt. In ähnlicher Weise tritt bei verdrehtem zweilagigen Graphen eine einfache geometrische Interferenz der hexagonalen Kohlenstoffgitter auf, wodurch dieses Konzept auch auf andere Materialien anwendbar ist [4, 7]. Das Moiré-Potential hat eine viel größere Einheitszelle und Gitterkonstante  $\lambda$  als das zugrundeliegende Graphengitter und variiert direkt mit dem Verdrehungswinkel  $\theta$  zwischen den kristallographischen Gitterrichtungen der einzelnen Graphenschichten (**Abb. 1a**). Im Impulsraum sind die Brillouin-Zonen der beiden einzelnen Graphenschichten ebenfalls um  $\theta$  verdreht. Aufgrund des Moiré-Potentials bilden sich zwei neue, viel kleinere Mini-Brillouin-Zonen in den K- und K'-Punkten. Diese Täler führen zu einer vierfachen Entartung der Elektronen, je zwei für die Spins und zwei für die Täler (**Abb. 1b**).

Das räumlich oszillierende Moiré-Potential kann die Energiedispersion dramatisch verändern. In Graphen-Monolagen tunneln Elektronen nur in einer Ebene zwischen Gitterstellen, was aufgrund von Symmetrieüberlegungen zu einer linearen Dispersionsbeziehung führt. Im natürlich vorkommenden zweilagigen Graphen können Elektronen jedoch zwischen den einzelnen Schichten tunneln. Dadurch wird die Energiedispersion hyperbolisch. In verdrehtem zweilagigen Graphen führt das Moiré-Muster zu räumlich oszillierenden Tunneltermen zwischen den Schichten, die sich normalerweise für beliebige Werte von  $\theta$  gegenseitig aufheben und die beiden Graphenschichten entkoppeln. Allan MacDonald erkannte jedoch mit der Lösung seines für dieses Problem neu aufgestellten Kontinuummodells, dass bei sehr kleinem  $\theta$  das Tunneln zwischen den Schichten groß wird und zu einer starken Renormierung der Bänder führt [4]. Dies sorgt letztlich für eine gegen Null konvergierende Bandbreite und führt am Winkel  $\theta \sim 1,1^\circ$  zu ultraflachen Bändern (**Abb. 1c**). Für diesen magischen Winkel beträgt die Moiré-Gitterkonstante  $\lambda$  etwa 14 nm. Dies entspricht etwa 10 000 Kohlenstoffatomen pro Moiré-Einheitszelle, was genaue Berechnungen erschwert.

Die ultraflachen Bänder sind der Schlüssel zum Verständnis der reichen Phänomenologie der unter dem magischen Winkel verdrehten Graphenschichten. Da sich die Geschwindigkeit der Elektronen als die Ableitung der Energiedispersion ergibt, werden Elektronen wegen der Flachheit der Bänder extrem langsam und hören praktisch auf, sich zu bewegen. Ohne kinetische Energie dominiert die Energie der Elektron-Elektron-Wechselwirkung im Hamilton-Operator. Da alle Elektronen in solch flachen Bändern fast die gleiche Energie haben, ist die Zustandsdichte extrem groß. Dies erhöht die elektronischen Wechselwirkungen im System weiter und begünstigt die Bildung exotischer Quantenphasen.

### Falten ausbügeln, und zwar nanometergenau

Experimentell schien es unmöglich, den Verdrehungswinkel  $\theta$  mit einer Präzision von bis zu  $0,1^\circ$  zu steuern und damit solche Systeme zu realisieren. Denn Graphen ist

nur eine Atomschicht dick. Aus einem solch flexiblen und dehnbaren Material lassen sich nur schwer Doppelschichten mit einem homogenen Verdrehungswinkel herstellen, ohne Falten oder Blasen zu induzieren. Erst 2018 gelang dies der Gruppe am MIT [2, 3], weil Graphen zu den Van-der-Waals-Heterostrukturen gehört [8]. Bei ihnen ist es möglich, einzelne zweidimensionale Schichten aufzunehmen und diese vertikal miteinander oder mit anderen Materialspezies zu verbinden. Tatsächlich lassen sich hierbei die Schichtdicke einer Monolage und die Ausrichtungsgenauigkeit mit Bruchteilen eines Grades kontrollieren.

Vorarbeiten dazu leistete ein Jahr davor die Tutuc-Gruppe an der University of Texas, welche die Tear-and-Stack-Methode entwickelte [9]. Diese erlaubt es, Graphenschichten mit der exakt gleichen Gitterorientierung zu erhalten und diese ganz leicht zu verdrehen. Montageprotokolle und Probenkonzepte verbesserte später das ICFO-Team in Barcelona. Dort gelang es, ultrasaubere Proben mit sehr homogenem Verdrehungswinkel zu erzeugen [10, 11]. Der Trick bestand darin, nach Herstellung der Doppelschichten die entstandenen Falten und Blasen zu entfernen. Das ausgeklügelte Konzept ähnelt dem Bügeln auf der Nanoskala. Solche Proben sind typischerweise in isolierende Schichten von zweidimensionalem hexagonalem Bornitrid eingekapselt und sitzen auf einer dünnen Graphitschicht, die als elektrostatisches Gate wirken kann (Abb. 2a). Die weitere Charakterisierung durch Rastertunnelmikroskopie und Photoemissionsspektroskopie bestätigte, dass die Proben tatsächlich homogene Moiré-Muster und flache Bänder bilden (Abb. 2b, c) [12, 13].

### Entdeckung neuer Quantenphasen

Die ersten Transportmessungen der MIT-Gruppe an solchen Proben offenbarten eine reichhaltige Fülle korrelierter Isolatorphasen, wenn die Elektronenkonzentration in der Probe ganzzahligen Elektronen oder Löchern pro Moiré-Einheitszelle entsprach, definiert durch den Füllfaktor  $\nu = \pm 1, \pm 2, \pm 3$  [2, 3, 10, 11]. Diese Phasen entstehen, da die Elektronen aufgrund ihrer geringen kinetischen Energie nur schwach zwischen den Moiré-Gitterstellen tunneln. Die hohen Energiekosten der Coulomb-Wechselwirkung, die jedes Elektron durch das Tunneln zu bereits besetzten Gitterstellen zahlt, behindern diesen Prozess zusätzlich. Bei voller Belegung verbleiben keine freien Gitterplätze. Dadurch lokalisieren sich die Elektronen, was die Probe isolierend macht. Eine leichte Dotierung weg von ganzzahligen Füllungen öffnet leere Gitterstellen und ermöglicht einen Elektronenfluss – die Probe wird metallisch. Aufgrund der vierfachen Spin- und Talentartung der Moiré-Bänder bricht jeder korrelierte Isolatorzustand eine bestimmte Symmetrie und führt unter anderem zu Spin- oder Tal-polarisierten Bändern.

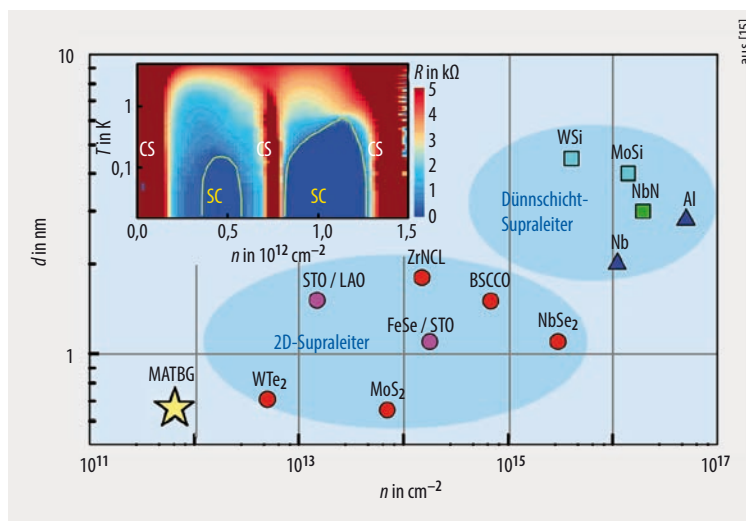
Zusätzlich zu den korrelierten Isolatoren bilden sich bei leichtem Dotieren der Isolatoren überraschenderweise auch zahlreiche supraleitende Kuppeln. Dort fällt der Widerstand bei einer kritischen Temperatur von bis zu 5 Kelvin auf Null ab [2, 3, 10, 11, 14]. Der Widerstand tritt jedoch wieder auf, wenn ein Magnetfeld senkrecht dazu angelegt

oder ein Strom eingespeist wird, der über dem kritischen Strom liegt. Das auffälligste Merkmal waren Josephson-Übergänge, die sich durch charakteristische Fraunhofer-Interferenzmuster zeigten. Sie entstanden aufgrund von Störstellen, die phasentrennte Regionen in der Probe induzierten, bei denen sich supraleitende und normale Regionen abwechselten (Abb. 3).

2019 haben mehrere Gruppen magnetische und topologisch nicht-triviale Bänder in verdrehtem zweilagigen Graphen beobachtet. Diese offenbarten sich durch eine Hysterese und einen quantisierten Hall-Widerstand, wenn kein oder ein sehr schwaches Magnetfeld senkrecht anlag [5, 6, 10, 11, 14]. Experimentell finden sich diese Zustände bei einem Wert von  $h/Ce^2$ . Die Entwicklung der Zustände beginnt an ganzzahligen Füllfaktoren  $\nu$  und folgt im Phasenraum des Dichte- und Magnetfelds dem Verlauf von  $Ce/h$ , wobei  $h$  die Planck-Konstante,  $C$  die Chern-Zahl und  $e$  die Elektronenladung sind (Abb. 4).

Solche Zustände könnten durch das Brechen der Tal-symmetrie im System entstehen, wo eine Berry-Krümmung ungleich Null zu Orbitalzuständen führt. Dies ruft wiederum einen Orbitalmagnetismus hervor. Durch die Magnetisierung bilden sich orbitale Chern-Isolatoren, die zum anomalen Quanten-Hall-Effekt führen. Hierbei entstehen quantisierte topologische Ströme an den Probenrändern in Abwesenheit eines Magnetfelds.

All diese elektronischen Zustände lassen sich durch das Anlegen einer kleinen Spannung an einem Gate aufeinander abstimmen. Dieses Gate kann das Graphen aufladen und die Phasen ein- und ausschalten. Dieser Schalter ermöglicht es, einen isolierenden Zustand in einen supraleitenden kontrolliert umzuwandeln und diesen in einen magnetischen oder topologischen Zustand. Nach jahrelanger Forschung macht dies nun unerwartet ein exotisches Material möglich.



**Abb. 5** Die verschiedenen Supraleiter unterscheiden sich in ihrer minimal erreichbaren Filmdicke  $d$  und Ladungsträgerdichte  $n$ . Die unter dem magischen Winkel verdrehten zweilagigen Graphenproben sind die dünnsten Supraleiter mit einer Ladungsträgerdichte, die um Größenordnungen niedriger ist als in den meisten anderen Systemen. Dennoch ist ihre supraleitende Übergangstemperatur von 5 Kelvin relativ groß. Ihr typisches Phasendiagramm, ist mit demjenigen von Kupraten (Inset) vergleichbar.

## Von der Verdrehung zur Supraleitung

Im Fokus der Moiré-Materialforschung liegt das Verständnis der mikroskopischen Mechanismen hinter der supraleitenden Phase. Die Supraleitung weist mehrere ungewöhnliche Eigenschaften auf. Sie entsteht in einem zweidimensionalen System und stammt aus einem Elektronenensemble, dessen Dichte um mehrere Größenordnungen niedriger ist als für jeden anderen bekannten Supraleiter (**Abb. 5**) [15]. Dennoch ist die supraleitende Kopplungsstärke extrem hoch. Die kritische Temperatur von bis zu 5 K ist im Vergleich zur extrem niedrigen Fermi-Temperatur außerordentlich hoch und nur mit Hochtemperatur-Supraleitern vergleichbar. Am auffälligsten ist, dass die Supraleitung in verdrehten Graphen-Doppelschichten in Gegenwart starker elektronischer Korrelationen besteht, was zunächst Vergleiche mit anderen stark korrelierten Supraleitern wie den Kupraten (**Abb. 5**, Inset), Pnictiden und schweren Fermionenverbindungen motivierte. Diese Ähnlichkeit führte zu der Vermutung, dass Elektronenkorrelationen die Supraleitung in verdrehten Graphen-Doppelschichten unterstützen. Neuere Arbeiten konnten jedoch einen konventionelleren Mechanismus nicht ausschließen, den Elektronen und Phononen vermitteln. Die jüngst entdeckten topologischen Zustände [5, 6, 10, 11, 14] machen auch eine topologische Supraleitung möglich. Bislang gibt es nur wenige experimentelle Beweise, da nur eine Handvoll Experimente mit supraleitendem Graphen erfolgten. Daher ist der genaue Ursprung der Supraleitung noch nicht bekannt.

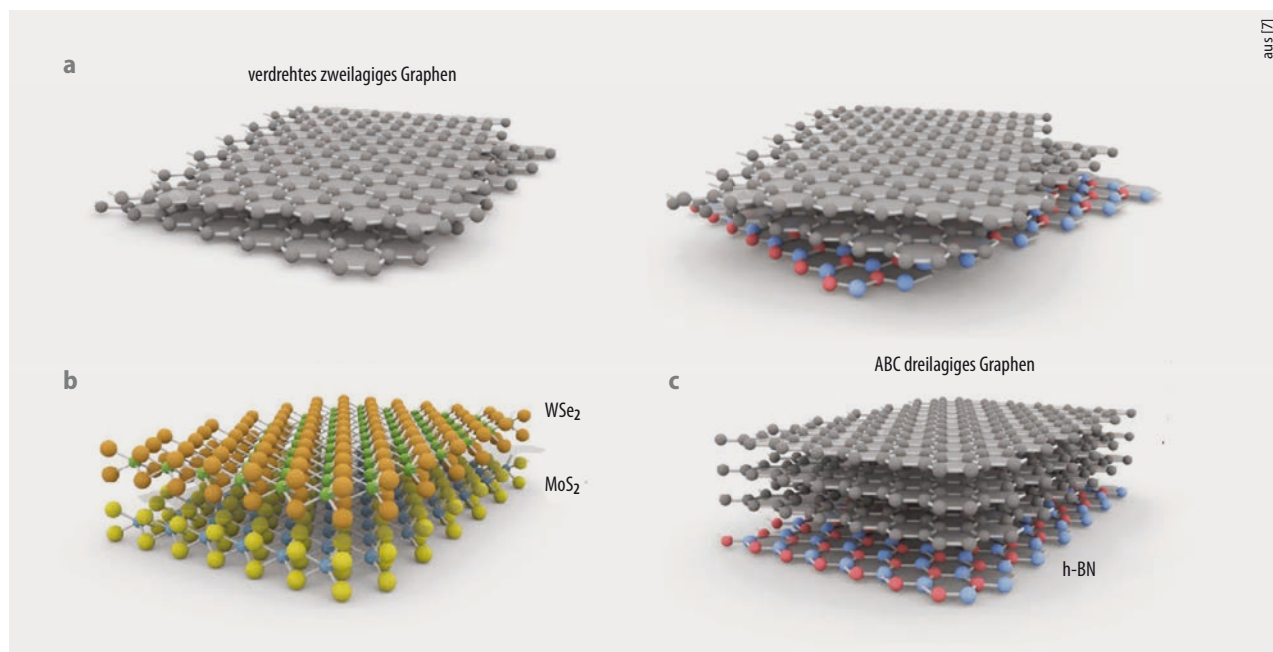
Die Supraleitung lässt sich in zweilagigem Graphen, das unter dem magischen Winkel verdreht ist, recht gut untersuchen. Dieses System bietet mehrere neuartige Steuerknöpfe, um seine elektronische Bandstruktur, Wechselwirkungsenergien und Symmetrien einzustellen und ist

mit anderen zweidimensionalen Materialien in Heterostrukturen integrierbar. Hierbei lässt sich die kinetische Energie der Elektronen durch eine geringfügige Variation des Verdrehungswinkels ändern, während die Wechselwirkungsenergie durch die Veränderung der dielektrischen Umgebung variiert werden kann. Diese elektrostatische Steuerung erlaubt es aufgrund der extrem geringen Dichte des Elektronensystems, die flachen Bänder vollständig zu füllen und zu entleeren. Die Untersuchung dieser Einstellmöglichkeiten hat erst begonnen, weist aber bereits der zukünftigen Forschung den Weg.

Dennoch bedeutet die Untersuchung der Supraleitung in diesen Graphensystemen auch eine große Herausforderung. Denn viele experimentelle Techniken, die sich für die Analyse traditioneller Systeme eignen, lassen sich bei diesem zweidimensionalen System mit seiner extrem geringen Dichte nicht ohne Weiteres anwenden. Zum Beispiel kann der Meißner-Effekt aufgrund der geringen Elektronendichte zu schwach sein, um ihn mittels Magnetsensoren zu erfassen. Auch die magnetische Eindringtiefe ist nur schwer zu untersuchen, da das Graphensystem dünner ist als die erwartete Eindringtiefe. Spezifische Wärme- und Wärmetransporttechniken kommen nicht infrage, da keine geeigneten Nano-Thermometer vorliegen. Die inelastische Neutronenstreuung ist aufgrund des winzigen Querschnitts der zweidimensionalen Proben ebenfalls kaum anwendbar. Und die Auflösung der winkelaufgelösten Photoemission reicht nicht aus, um supraleitende Lücken unterhalb von wenigen meV zu erkennen.

## Ausblick

Zweilagiges Graphen, das unter dem magischen Winkel verdreht ist, bietet völlig neue Möglichkeiten, Material-



**Abb. 6** Flache Bänder und starke Korrelationen gibt es nicht nur in zweilagigem verdrehten Graphen, ohne (links) und mit Ausrichtung auf hexagonalem Bornitrid (a), sondern auch in weiteren Moiré-Systemen, beispielsweise in Doppelschichten aus Übergangsmetall-Chalkogeniden (b) oder in rhomboedrischem, dreilagigem Graphen, das an hexagonalem Bornitrid ausgerichtet ist (c).

eigenschaften zu manipulieren. Daraus hat sich die neue Forschungsrichtung Twistronics entwickelt. Das Konzept der einfachen Drehung zweier Materialschichten funktioniert nicht nur für Graphen, sondern auch für mehr als 2000 andere zweidimensionale Materialien (Abb. 6). Die Bildung flacher Bänder und der zugehörigen starken Korrelationen wurde bereits an zwei verdrehten AB-Doppelschichten von Graphen sowie an unter dem magischen Winkel verdrehtem zweilagigen Graphen demonstriert, das an hexagonalen Bornitrid-Substraten ausgerichtet ist. Hierdurch ist die Inversionssymmetrie effektiv gebrochen. Verdrehte halbleitende Schichten aus WSe<sub>2</sub> und MoS<sub>2</sub> weisen ähnliche Phasen und ein Kontinuum von Winkeln auf, unter denen die Bänder flach werden.

Diese Arbeit beschränkt sich nicht nur auf Zweischichtsysteme, sondern ist auch auf eine größere Anzahl von Schichten übertragbar wie die kürzlich demonstrierten ABC-Graphen-Dreilagenschichten, die ebenfalls auf hexagonalem Bornitrid ausgerichtet sind. Zukünftige Arbeiten werden sich auf Systeme mit immer höheren Wechselwirkungsenergien konzentrieren – mit dem großen Ziel, die kritischen Temperaturen der Quantenphasen zu erhöhen. Dies würde mögliche Anwendungen extrem vereinfachen. Die möglichen Kombinationen sind endlos, und die Forschung steht noch am Anfang [7].

Die Arbeiten an diesen Materialien bergen Potenzial für neue technologische Durchbrüche. Um den supraleitenden Zustand in verdrehten zweilagigen Graphenschichten zu bilden, sind extrem wenige Elektronen nötig. Dies macht das System sehr empfindlich für elektromagnetische Strahlung (Abb. 5). Einzelne Lichtquanten können den supraleitenden Zustand effizient erwärmen und aufbrechen und damit als wichtige Bausteine in Quantencomputern und für das Quanteninternet dienen [15]. Die Fähigkeit, nach Belieben von supraleitenden zu magnetischen und zu topologischen Zuständen zu wechseln, kann die Energieeinsparung gegenüber heutigen Systemen revolutionieren. Damit lassen sich die verschiedenen Phasen einfach hybridisieren, indem nur in bestimmten Bereichen der Proben elektrische Felder angelegt werden. Hierdurch entstehen effektiv funktionale Netzwerke aus supraleitenden, topologischen und

magnetischen Phasen. Diese Materialien sind leichter zu kontrollieren und bieten immer mehr Funktionalität bei gleichzeitiger Miniaturisierung.

### Literatur

- [1] K. S. Novoselov et al., PNAS **102**, 10451 (2005)
- [2] Y. Cao et al., Nature **556**, 80 (2018)
- [3] Y. Cao et al., Nature **556**, 43 (2018)
- [4] R. Bistritzer und A. H. MacDonald, PNAS **108**, 12233 (2011)
- [5] A. L. Sharpe et al., Science **365**, 605 (2019)
- [6] M. Serlin et al., Science **367**, 900 (2019)
- [7] L. Balents et al., Nat. Phys. **16**, 725 (2020)
- [8] A. K. Geim und I. V. Grigorieva, Nature **499**, 419 (2013)
- [9] K. Kim et al., PNAS **114**, 3364 (2017)
- [10] X. Lu et al., Nature **574**, 653 (2019)
- [11] P. Stepanov et al., Nature **583**, 375 (2020)
- [12] S. Lisi et al., Nat. Phys. (2020), DOI: 10.1038/s41567-020-01041-x
- [13] T. Benschop et al., arXiv:2008.13766 (2020)
- [14] I. Das et al., arXiv:2007.13390 (2020)
- [15] P. Seifert et al., Nano Lett. **5**, 20 (2020)

### Der Autor



**Dmitri K. Efetov** ist in Moskau geboren und in Deutschland aufgewachsen. Er hat an der ETH Zürich Physik studiert und promovierte 2014 an der Columbia University in New York, wo er sich mit der Suche nach Supraleitung in Graphen beschäftigte. Nach einem Postdoc-Aufenthalt am MIT wechselte er 2017 als Professor und Gruppenleiter an das ICFO nach Barcelona. Seine Gruppe untersucht Moiré-Materialien mit elektronischem Transport und optoelektronischen Techniken.

**Prof. Dr. Dmitri K. Efetov**, ICFO – The Institute of Photonic Sciences, Mediterranean Technology Park, Av. Carl Friedrich Gauss, 3, 08860 Castelldefels (Barcelona), Spanien

## MBE KOMPONENTEN | DR. EBERL

- Compact research MBE system with small footprint; low energy and liquid nitrogen consumption
- Applications: II-VI, III-V, IV-IV, metals, magnetic materials, topological insulators, nanowire growth, oxides, organics
- 9 source ports: effusion cells, e-beam evaporators, etc.
- Substrate: flag-style plate 10x10 mm<sup>2</sup> or wafer ≤ 2"
- UHV pumping system: base pressure < 5x10<sup>-11</sup> mbar
- Stainless steel LN2 cooling shroud
- In-situ monitoring

