

## Zweidimensionale und Van-der-Waals-Kristalle

# Bose-Einstein-Kondensat aus Exzitonen?

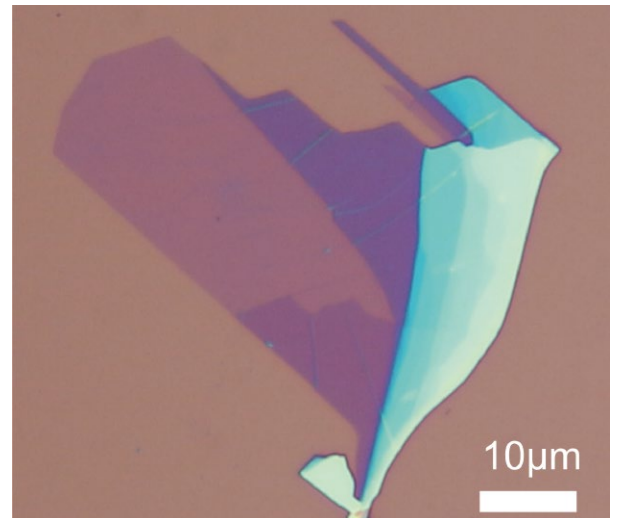
URSULA WURSTBAUER | ALEXANDER W. HOLLEITNER

*Zweidimensionale Kristallsysteme faszinieren, weil sie stark ausgeprägte Vielteilchenphänomene bei den Ladungsträgern zeigen. Das boomende Forschungsgebiet konzentriert sich längst nicht mehr nur auf einlagige Kristallsysteme wie Graphen. Schichtweise aufeinandergestapelt, ermöglichen künstliche Van-der-Waals-Kristalle eine Fülle neuartiger physikalischer Systeme. In halbleitenden Heterostrukturen gelang es uns nun, erste Hinweise für ein optisch generiertes Bose-Einstein-Kondensat von Exzitonen zu finden.*

Mit der Entdeckung des Quanten-Hall-Effekts, für die Klaus von Klitzing 1985 den Nobelpreis für Physik erhielt (s. Physik in unserer Zeit **2019**, 50(3), 116), wurde deutlich: Zweidimensionale (2D) Ladungsträgersysteme besitzen ganz besondere, faszinierende Quanteneigenschaften. Das liegt daran, dass sich die Ladungsträger innerhalb einer Ebene frei bewegen können; ihre Bewegung in der dritten Dimension hingegen wird entweder direkt durch die Zweidimensionalität, also Flachheit, des Materials selbst oder durch ein quantenmechanisches Einschlusspotential eingeschränkt.

2D-Systeme (Abbildung 1) sind für die physikalische Grundlagenforschung und innovative Technologien sehr interessant. Sie besitzen hochmobile Ladungsträger, neben Elektronen sind dies in zweidimensionalen Halbleiterkristallen – unserem eigenen Forschungsgebiet – auch Löcher. Vor allem aber reduziert die Zweidimensionalität die Abschirmung der Umgebung im Vergleich zu dreidimensionalen Kristallen. Damit „spürt“ ein Ladungsträger die Anwesenheit der anderen Ladungsträger viel stärker über die Coulomb-Wechselwirkung, was zu einem ausgeprägtem Quanten-Vielteilchenverhalten führen kann. Die Forschung spricht von korrelierten bis hochkorrelierten Ladungsträgersystemen. Der reduzierte Phasenraum in 2D-Systemen

*This is an open access article under the terms of the Creative Commons Attribution License, which permits use, distribution and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.*



**Abb. 1** Lichtmikroskop-Aufnahme einer  $WS_2$ -Mono- und Multilage auf einem Siliziumdioxid-Substrat. Der fast transparente Teil des Kristalls ist eine Monolage, mit zunehmender Anzahl der Lagen wird der Kristall immer weniger durchsichtig (Bild: V. Döring, D. Tiede, WWU).

unterstützt Quanteneffekte und ist daher für die Beobachtung der darin auftretenden Vielteilchenphänomene interessant.

Ein prominentes Beispiel hierfür sind hochmobile zweidimensionale Systeme in Siliziuminversionsschichten – solche Schichten sind in konventionellen Halbleiterbauelementen eigentlich die an Ladungsträgern verarmten Zonen. Ein anderes Beispiel sind sogenannte Quantentröge aus modulationsdotiertem Galliumarsenid (GaAs), in denen verstärkt Elektronenkorrelationen entstehen. Diese Strukturen können zum Beispiel fraktionale Quanten-Hall-Zustände oder periodische Anordnungen von Elektronen (Electron Solids) ausbilden. Solche und weitere korrelierte Phasen treten meist bei sehr niedrigen Temperaturen und hohen Magnetfeldern auf.

Alle diese Beispiele stehen allerdings noch für eigentlich dreidimensionale Strukturen, die so gestaltet sind, dass in ihnen zweidimensionale Ladungsträgersysteme entstehen. Noch viel ausgeprägter sind die mit der Dimensionalität verbundenen und durch Wechselwirkungseffekte getriebenen Quantenphänomene in „echten“ 2D-Kristallen. Einige Effekte sind darin sogar erst realisierbar, weil hier die Abschirmeffekte so gering sind, dass die Ladungsträger stark miteinander wechselwirken. Echte zweidimensionale Kristalle haben daher nicht nur einen 2D-Charakter im Impulsraum, sondern auch im realen Raum. 2D-Kristalle bieten überdies die Möglichkeit einer weiteren Miniaturisierung von aktiven und passiven elektronischen Bauelementen in allen Raumdimensionen. Darüber hinaus lassen sich solche 2D-Kristalle durch „Aufeinanderstapeln“ zu hybriden Systemen aus verschiedenen Materiallagen kombinieren. Sie bieten damit aufregende Perspektiven für neue Phänomene und Materialsysteme.

### Zweidimensionale Kristalle

Zweidimensionale Kristalle sind hochgeordnete Strukturen mit einer Schichtdicke von nur einem Atom oder wenigen Atomen. Die aus ihnen aufgebauten Volumenmaterialien sind in der Regel sandwichartige Schichtstrukturen. In der Ebene sind die Atome der 2D-Kristalle durch kovalente oder ionische Bindungen stark gebunden. Bei Volumenmaterialien hingegen sind die einzelnen 2D-Kristallschichten nur durch schwache Van-der-Waals-Kräfte zu „Stapeln“ gekoppelt. Der bekannteste Van-der-Waals-Kristall ist Graphit, das in Bleistiften, als trockenes Schmiermittel, aber auch in der Leistungselektronik Anwendung findet (Abbildung 2).

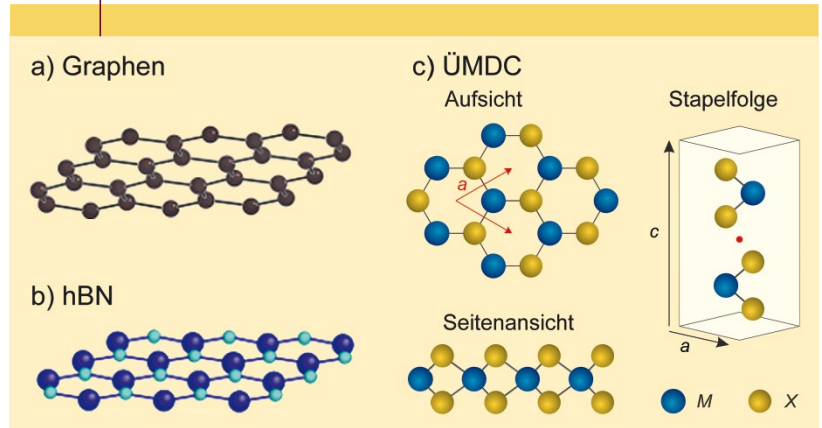
Lange Zeit wurde angenommen, dass rein zweidimensionale Festkörperkristalle thermodynamisch instabil sind, wenn sie aus Volumenkristallen isoliert werden. Erst 2004 zeigten Andre Geim und Konstantin Novoselov anhand von Graphit: Tatsächlich können einzelne Monolagen, Graphen genannt, oder auch wenige Atomlagen dünne, lateral makroskopisch ausgedehnte Kristallmembrane vom Volumenmaterial isoliert und auf ein beliebiges Trägersubstrat übertragen werden [1]. Dieses mikromechanische Spalten kann mit einem handelsüblichen Klebefilm erfolgen. Die so übertragenen, weniger als 1 nm dünnen Kristalle sind sogar auf vielen Substraten mit einem einfachen Lichtmikroskop und dem menschlichen Auge sichtbar, dank eines hohen optischen Phasenkontrasts durch Interferenz von dünnen Schichten.

Nach der 2010 mit dem Physik-Nobelpreis gekrönten Entdeckung von Graphen wurden zahlreiche weitere 2D-Kristalle mit oft faszinierenden Eigenschaften identifiziert. 2D-Materialien decken eine Vielzahl physikalischer, mechanischer und chemischer Eigenschaften ab. Mittlerweile sind Materialien mit metallischen, halbleitenden, ferromagnetischen und supraleitenden Eigenschaften bekannt. Hinzu kommen niedrigdimensionale Materialien, die besondere topologische Eigenschaften oder das schon erwähnte korrelierte Ladungsträger-Verhalten zeigen. Manche 2D-Materialien sind auch als Trägermaterial von Einzelphotonen-Lichtquellen einsetzbar.

Viele 2D-Kristalle sind mechanisch erstaunlich robust und dennoch flexibel. Überdies existieren inerte und (photo-)katalytisch aktive Materialien; und es wurde aufgezeigt, dass 2D-Transistoren mindestens gleichwertige, teils bessere Eigenschaften als etablierte Bauelemente aus Silizium oder Galliumarsenid besitzen [2]. Auch wurde bereits der Prototyp eines rein zweidimensionalen Mikroprozessors aus 2D-Materialien mit Strukturgrößen im Mikrometerbereich realisiert [3].

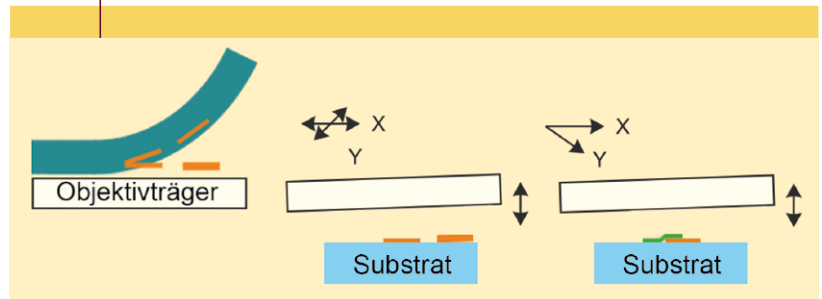
Der eigentliche Vorteil dieser Materialien besteht allerdings darin, dass sie durch sogenanntes deterministisches Stapeln beliebig kombiniert werden können. Damit sind Van-der-Waals-Materialien nicht den Einschränkungen unterworfen, die sich in konventionellen 3D-Kristallen aus den starken chemischen Bindungen zwischen den einzelnen Kristallebenen ergeben.

ABB. 2 | ZWEIDIMENSIONALE KRISTALLE



a) Gittermodell einer Monolage Graphen, das aus hexagonal angeordneten Kohlenstoffatomen besteht. b) Gittermodell einer Monolage von hexagonalem Bornitrid, das aus Bohr- und Stickstoffatomen besteht. c) Gittermodell einer Monolage eines Übergangsmetall-Dichalkogenids (ÜMDC), das ebenfalls eine hexagonale Gittersymmetrie aufweist. Ein Übergangsmetall M, zum Beispiel W oder Mo, ist hier mit zwei Chalkogenatomen X, etwa S oder Se, koordiniert. Damit besteht eine Monolage aus einer kovalent gebundenen Dreifachstruktur (links). Rechts: Beim Stapeln sind die Lagen über Van-der-Waals-Kopplung gebunden, und in der natürlichen Stapelfolge besitzt die Doppellage ein Symmetriezentrum (roter Punkt zwischen den Lagen).

ABB. 3 | MIKROMECHANISCHES SPALTEN



Probenherstellung durch mikromechanisches Spalten, dazu dient ein Klebefilm auf einem viskoelastischen Stempel. Damit wird die erste Monolage auf ein Substrat übertragen, das sich auf dem Objektivträger eines Mikroskops befindet (links). Vor dem Auflegen der zweiten Monolage wird dieser entweder verschoben und/oder gedreht (Mitte und rechts). Unten: jeweils Seitenansicht.

### Vielteilchen-Phänomene

Liegen zwei verschiedene 2D-Kristalle aufeinander, dann gibt es zwischen ihnen verschiedenste Effekte der Wechselwirkung und damit der Hybridisierung von Orbitalen. Daher kann man die physikalischen Eigenschaften durch geschickte Kombination verschiedener 2D-Einzellagen zu neuartigen Van-der-Waals-Kristallen maßschneidern (Abbildungen 3 und 4). Dazu zählt auch, dass man die Monolagen in der Kristallrichtung leicht gegeneinander verdreht kombinieren kann, wobei bereits minimale Änderungen im Rotationswinkel zu völlig unterschiedlichem Verhalten führen können.

Kürzlich wurde gezeigt, dass zwei um etwa 1,1° gegeneinander verdrehte Graphenlagen stark korreliertes Ladungs-

trägerverhalten zeigen. In einer solchen Doppellage fand sich bei diesem magischen Winkel bei kryogenen Temperaturen um 1 K eine supraleitende Phase. Diese liegt im Phasendiagramm wiederum in der unmittelbaren Nähe einer entstehenden – emergenten – isolierenden und einer magnetisch geordneten Phase [4]. Dieses korrelierte, also durch komplexe Wechselwirkungseffekte induzierte Verhalten ist das Resultat eines durch die Rotation entstandenen, periodischen Moiré-Übergitters (Abbildung 5). Im Energiebandschema führt es zu einer sehr flachen Minibandstruktur.

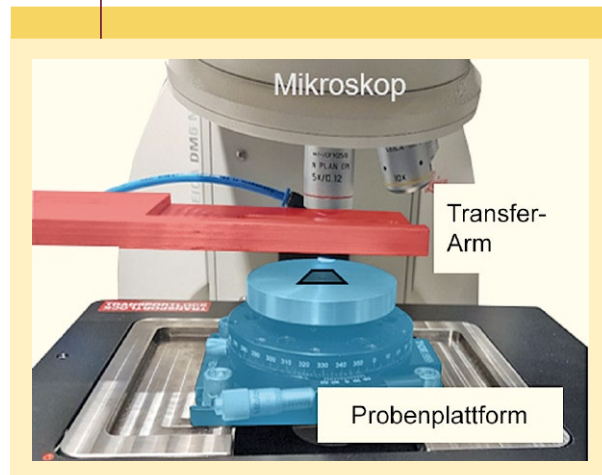
Solche über die Ladungsträgerdichte und Rotationswinkel durchstimmbaren, emergenten Quantenzustände sind nicht nur für Graphen, sondern allgemein für Van-der-

Waals-Zweilagensysteme vorhergesagt [5, 6]. Eine besondere Rolle spielen hierbei halbleitende Übergangsmetall-Dichalkogenide (ÜMDC, Abbildung 2c) wie Molybdän-Disulfid ( $\text{MoS}_2$ ), bekannt auch als Molybdänit, das als trockenes Schmiermittel zum Beispiel für Motorrad- und Fahrradketten Verwendung findet, oder Wolfram-Diselenid ( $\text{WSe}_2$ ) und Molybdän-Diselenid ( $\text{MoSe}_2$ ) (Abbildung 6) so wie Wolfram-Disulfid ( $\text{WS}_2$ ).

Diese ÜMDC besitzen eine von der Anzahl der Lagen abhängige Bandlücke im sichtbaren bis nahinfraroten Energiebereich zwischen etwa 1,1 und 2,2 eV. Für die Einzellagen sind die ÜMDC direkte Halbleiter: Sie lassen im Impulsraum einen vertikalen Übergang zwischen Leitungsbandminimum und Valenzbandmaximum für ein Elektron zu, das ein entsprechendes Photon absorbiert oder emittiert. Zwei- und Mehrlagen sind hingegen indirekte Halbleiter (Abbildung 6a), das heißt für optische Interbandübergänge ist eine Beteiligung von quantisierten Gitterschwingungen – Phononen – zur Impulserhaltung notwendig.

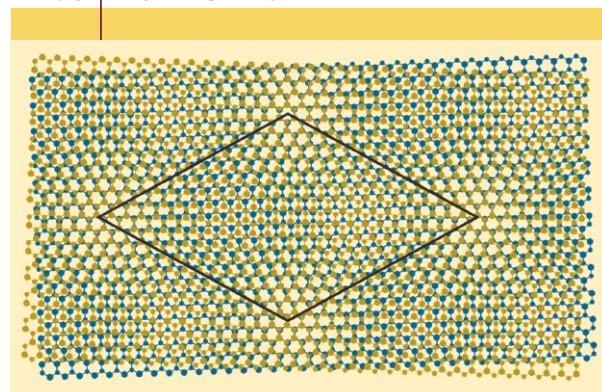
Die Familie von „gestapelten“ 2D-Kristallen in ihrer Gesamtheit nimmt somit eine Sonderstellung innerhalb der dreidimensionalen Kristalle ein. Sie sind einerseits als Quantenmaterialien wie geschildert durchstimmbare, was verschiedenste Quantenzustände hervorbringt. Andererseits bieten ihre charakteristischen Eigenschaften ein Potenzial für Anwendungen in der bislang von Silizium dominierten Elektronik: Photovoltaik, Spintronik, Sensorik und diverse Formen der Festkörper-Beleuchtung (Solid-State Lightning) wie LED oder OLED. Wegen ihrer besonderen elektrochemischen Eigenschaften eignen sie sich zudem für die Entwicklung neuer Katalysatoren.

**ABB. 4 | TRANSFER-MIKROSKOP**



Bei einem solchen Transfer-Mikroskop kann man die Probenplattform (blau) und den Transferarm für die Probe (rot) über Mikrometerschrauben und Steppermotoren präzise in x,y,z-Richtung einstellen – also die Rotation und Neigung beim Stapeln verschiedener Monolagen (Bild: nach F. Sigger, TUM).

**ABB. 5 | MOIRÉ-ÜBERGITTER**



Moiré-Übergitter aus zwei gestapelten 2D-Kristallen mit jeweils hexagonalem Gitter und identischen Gitterkonstanten, also Atomabständen. Sie sind um etwa  $4^\circ$  gegeneinander verdreht. Die schwarze Raute umschließt eine Einheitszelle des Moiré-Gitters.

### Exzitonen in 2D-Kristallen

Das bislang diskutierte korrelierte Vielteilchen-Verhalten wird von Bandlektronen bedingt, die im gitterperiodischen Potential auf erlaubten Energiebändern wechselwirken. ÜMDC sind aber Halbleiter, weshalb Elektronenfehlstellen im Valenzband des Kristallgitters, also Löcher, als effektiv positive Ladungsträger ins Spiel kommen. Über die Coulomb-Wechselwirkung ziehen Elektronen und Löcher sich gegenseitig an und bilden starke gebundene Elektron-Lochpaare, sogenannte Exzitonen.

Die starke Coulomb-Wechselwirkung lässt sich mit der reduzierten Abschirmung des elektrischen Feldes zwischen Elektron und Loch erklären, die ihre Ursache in der speziellen dielektrischen Umgebung in den 2D-Kristallen hat. Analog zum Wasserstoffatom kann man die Energieeigenwerte eines Exzitons nach dem Rydberg-Modell als eine Folge aus Grundzustand und angeregten Zuständen  $n$  nähern (Abbildung 7a):

$$E_X^n \propto \frac{1}{(n-1/2)^2} \frac{1}{\epsilon_0 \epsilon_r^2},$$

mit  $\epsilon_0$  der Permeabilität des Vakuums und  $\epsilon_r$  des Kristalls.

Das Besondere ist nun, dass im strikten 2D-Fall die Umgebung und der Kristall sehr unterschiedliche Permeabili-

täten besitzen ( $\epsilon_0 < \epsilon_r$ , Abbildung 7c). Meist befindet sich der Kristall auf einem isolierenden Substrat und ist entweder mit einer isolierenden Deckschicht (Abbildung 6) oder Vakuum beziehungsweise Luft umgeben. Dies ermöglicht die gezielte Beeinflussbarkeit der Bindungsenergie der Exzitonen durch die dielektrische Umgebung [12, 13].

Regt man nun immer höhere Zustände des Exzitons an, dehnt es sich mit wachsendem Bohr-Radius weiter aus als im Grundzustand. Damit fällt ein räumlich immer größerer Anteil des elektrischen Feldes zwischen Elektron und Loch innerhalb des 2D-Kristalls ab. Die so erhöhte Abschirmung durch den Kristall schwächt die Bindung zwischen Elektron und Loch. Je höher ein solches Exziton angeregt wird, desto schwächer ist es also durch die dielektrische Umgebung, etwa dem Substrat, beeinflussbar. Grundsätzlich sorgt dieser Sprung zwischen Kristall und Umgebung dafür, dass der energetische Abstand zwischen Grundzustand und angeregten Zuständen des Exzitons in 2D-Materialien vom theoretischen Wasserstoffspektrum abweicht [14, 15].

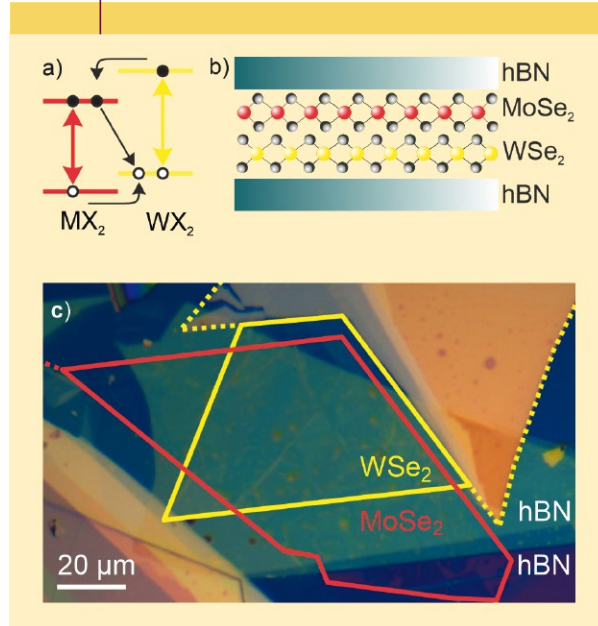
Insgesamt führt die reduzierte Abschirmung von Elektron-Lochpaaren dazu, dass die Licht-Materie-Wechselwirkung in zweidimensionalen Halbleitern von exzitonischen Effekten dominiert wird und sehr groß sein kann. So werden von einem weniger als 1 nm dünnen  $\text{MoS}_2$ -Kristall mehr als 15% des Lichts bestimmter Wellenlängen absorbiert [16]. Das macht das Material sehr interessant für die Anwendung in Solarzellen. In diesem Zusammenhang ist zu erwähnen, dass es mittlerweile zunehmend Erfolge bei der großflächigen und somit kosteneffizienten Herstellung von 2D-Kristallen gibt. Beispiele sind die Abscheidung und das Kristallwachstum aus der Gasphase oder die chemische Delamination, also Ablösen von einzelnen Schichten vom Volumenkristall, in Kombination mit speziellen Beschichtungsverfahren.

### Exzitonisches Bose-Einstein-Kondensat

Auch für die Grundlagenforschung sind Exzitonen sehr interessant. Als gebundener Zustand von zwei fermionischen Teilchen, die halbzahligen Spin besitzen, haben Exzitonen einen ganzzahligen Spin. Quantenmechanisch können sie daher durch eine bosonische Wellenfunktion beschrieben werden. Als bosonische Quasiteilchen genügen Exzitonen somit der Bose-Einstein-Statistik, Elektronen als Fermionen hingegen der Fermi-Dirac-Statistik. Ein weiterer signifikanter Unterschied zwischen beiden Teilchenarten besteht darin, dass Fermionen dem Paulischen Ausschlussprinzip unterliegen und somit zwei Fermionen nicht gleichzeitig an demselben Ort im identischen Quantenzustand existieren können. Mehrere ununterscheidbare Bosonen können jedoch den gleichen quantenmechanischen Zustand einnehmen.

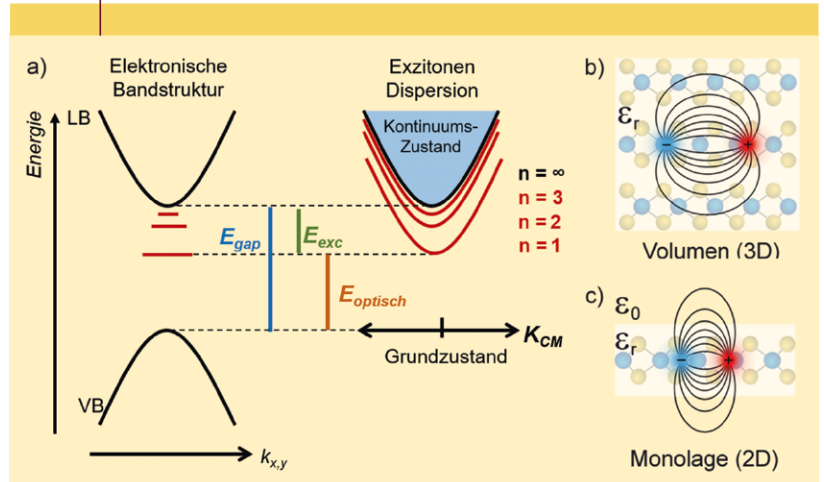
Der Grundzustand eines solchen bosonischen Vielteilchen-Ensembles ist ein Bose-Einstein-Kondensat (Bose-Einstein Condensate, BEC). Ein weitestgehend griffiges, klassisches Analogon sind geeignete gekoppelte Oszillatoren, die sich spontan synchronisieren. Ein anschauliches Beispiel sind Metronome auf einer sich frei bewegendem Platte (Ab-

ABB. 6 | ÜBERGANGSMETALL-DICHALKOGENIDE



a) Vereinfachte Darstellung der Bandanpassung in einer Heterostruktur aus  $\text{MX}_2$ ,  $\text{WX}_2$  ( $X = \text{S}, \text{Se}$ ). b) Diese Van-der-Waals-Heterostruktur besteht aus einer  $\text{MoSe}_2$ - und einer  $\text{WSe}_2$ -Lage, zum Schutz gegen Einfluss von Adsorbaten eingekapselt in isolierendem, hexagonalem Bornitrid (hBN). c) Lichtmikroskopbild einer solchen hBN/ $\text{MoSe}_2$ / $\text{WSe}_2$ /hBN-Heterostruktur (Aufnahme: L. Sigl, M. Troue, TUM).

ABB. 7 | EXZITONEN



a) Elektronische und exzitonische Dispersion im Vergleich. Die elektronische Bandstruktur beschreibt das Einteilchenverhalten. Sie kann daher optische Übergänge von gebundenen Elektron-Lochpaaren (Exzitonen) nicht korrekt darstellen, weil die Bindungsenergie zu Zuständen in der Bandlücke zwischen Valenz (VB)- und Leitungsband (LB) führen würde (rote Linien). Die optisch gemessene Energie  $E_{\text{optisch}}$  von Interbandübergängen in Emissions- oder Absorptionsexperimenten ist um die exzitonische Bindungsenergie ( $E_{\text{exc}}$ ) im Vergleich zur Bandlücke  $E_{\text{gap}}$  reduziert. Die Rydberg-Zustände der Exzitonen ähneln dem Wasserstoffspektrum und sind in einer Vielteilchen-Dispersion (Exzitonen-Dispersion) dargestellt. b) Exziton in einem Volumenmaterial (3D) und c) in der Monolage eines 2D-Kristalls. Im 2D-Fall führt die reduzierte Abschirmung durch die dielektrische Umgebung zu einer stärkeren Bindung zwischen Elektron und Loch. Diese Bindung kann durch die elektrische Umgebung, zum Beispiel das Substrat, beeinflusst werden (b, c nach [14]).

bildung 8). Natürlich sind die Exzitonen quantenmechanisch zu beschreiben. Dennoch sorgen Wechselwirkungen wie die exzitonische Dipolwechselwirkung für eine phasenstarre Synchronisierung der Wellenfunktionen.

Während man bei quantenmechanischen Eigenschaften zumeist an die Zustände einzelner Teilchen oder nanoskaliger Objekte denkt, die über die zugehörige Wellenfunktion mit eindeutiger Amplitude und Phase bestimmt sind, ist ein BEC ein makroskopischer Zustand von vielen delokalisierten Bosonen, die durch eine einzige Wellenfunktion mit identischer Phase beschrieben werden. Dieses faszinierende Phänomen eines kollektiven, makroskopischen Quantenzustands bewirkt eine langreichweitige Phasenkohärenz. Diese erlaubt es, quantenphysikalische Phänomene im Bereich von klassischen Zeit- und Längenskalen zu beobachten [7]. Mittlerweile wurden Bose-Einstein-Kondensate mit unterschiedlichen Atomen in magnetooptischen Fallen im Mikrokkelvin-Bereich erzeugt. Für verschiedene Quasiteilchen, darunter Exzitonen, wird die Möglichkeit solcher Kondensate in Zweilagigen-Halbleiterkristallen diskutiert – bislang meist in Systemen, die auf Galliumarsenid (GaAs) basieren [7].

Eine solche Kondensation funktioniert grundsätzlich nur in Ensembles von stark wechselwirkenden Exzitonen. Sie müssen dazu entartet sein, das heißt, die gleiche Ener-

gie besitzen. Zudem müssen sich die Exzitonen unterhalb einer kritischen Entartungstemperatur befinden, die unter anderem von der Teilchendichte des bosonischen Ensembles und der Bindungsenergie der Exzitonen abhängt. Um allerdings das Phänomen und die besonderen Eigenschaften eines BEC für moderne Quantentechnologien nutzbar zu machen, ist ein Kondensat erstrebenswert, das bei vernünftig erreichbaren Temperaturen auf einem skalierbaren festkörperbasierten Chip realisierbar und steuerbar ist.

Bereits 2014 wurde anhand eines einfachen theoretischen Modells vorhergesagt, dass exzitonische Suprafluidität, also ein exzitonisches BEC, in ÜMDC-Bilagensystemen nahe der Raumtemperatur realisiert werden kann [8]. Da die Exzitonen wie bereits diskutiert analog zum Wasserstoffatom beschrieben werden können, sind die Bindungsenergie und der effektive Bohr-Radius direkt miteinander verknüpft. Der Radius für Exzitonen in 2D-Kristallen ist im Bereich von nur einem Nanometer bis wenigen Nanometern zu finden [11]. Der kleine exzitonische Bohr-Radius in ÜMDC hat einen unmittelbaren Einfluss auf die Exzitonendichte  $n_X$  und somit auf die Entartungstemperatur

$$T_E \propto n_X/k_B,$$

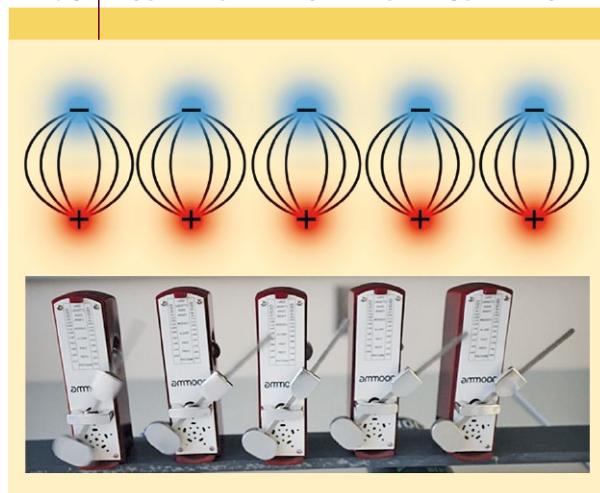
mit dem Boltzmann-Faktor  $k_B$  [8]. Je kleiner der Bohr-Radius der Exzitonen, umso höher ist ihre Dichte und umso höher die Entartungstemperatur, also die Übergangstemperatur zu einem korrelierten System. Ende 2019 und 2020 gelang es zwei unabhängigen Teams, in den USA und in unseren Münchner und Münsteraner Gruppen, erste experimentelle Anzeichen für einen Vielteilchenzustand von Exzitonen in MoSe<sub>2</sub>/WSe<sub>2</sub>-Doppellagen bis zu einer Temperatur von etwa 10 K zu finden [9, 10], welcher die Signatur eines Kondensats aufweist.

Die Experimente nutzten aus, dass sich die Elektronen der Exzitonen im Leitungsband einer ÜMDC-Monolage, ihre Löcher hingegen im Valenzband einer anderen Lage befinden (Abbildung 6). Das reduziert in diesen Zweilagensystemen den räumlichen Überlapp der Wellenfunktionen der Elektron-Lochpaare signifikant, was die Lebenszeit der Exzitonen verlängert und so experimentell zugänglich macht. Die räumliche Ladungstrennung sorgt für ein Dipolmoment, das die Wechselwirkung zwischen den Exzitonen verstärkt. Kondensate aus derartigen dipolaren Exzitonen wurden bereits für konventionelle Quantentrogssysteme in 3D-Halbleiterstrukturen diskutiert [11]. Dort ist die Bindungsenergie der Exzitonen jedoch zwei Größenordnungen schwächer und somit die Dichte  $n_X$  der Exziton-Ensembles viel geringer als in 2D-Kristallen, wo die Bindungsenergie im Bereich von 0,5 eV liegt.

### Ausblick

Die beschriebenen Experimente zeigen, dass zweidimensionale Materialien besonders interessant für die Grundlagenforschung sind. Hinzu kommt: Weil sie nicht durch Kristall-

**ABB. 8 | BOSE-EINSTEIN-KONDENSAT AUS EXZITONEN**



**Oben: Schematische Darstellung eines Ensembles aus Exzitonen mit parallelem Dipolmoment. Grundvoraussetzung für ein BEC ist, dass alle Exzitonen gleiche Phase und Energie aufweisen, also synchron sind. Synchronisation ist allerdings zwar notwendig, aber keine hinreichende Bedingung zur Bose-Einstein-Kondensation und ein klassisches Phänomen. Unten: Eine klassische Veranschaulichung bietet die Selbstsynchronisation mechanischer Metronome, die die einem rollbare gelagerten Brett parallel aufgestellt sind. Anfänglich schwingen die Metronome mit leicht verstimmt Frequenzen, also Energie, und beliebigen Phasendifferenzen untereinander. Durch Impuls- und Energieübertrag über die bewegliche Unterlage gleichen sich die Metronome in Frequenz und Phase an und schwingen nach einer gewissen Synchronisationsphase synchron (Video siehe unter Zusatzmaterial).**

bindungen zwischen den Ebenen limitiert sind, können die 2D-Kristalle nahezu beliebig mit anderen Materialien oder untereinander kombiniert werden. Damit kann man neuartige Funktionalitäten auf kleinstem Raum realisieren. Manche der 2D-Materialien sind inert und weisen neben chemischer auch eine hohe mechanische Stabilität auf, was neue Anwendungsgebiete in der flexiblen Elektronik, Sensorik und Medizin eröffnet.

Neue Freiheitsgrade wie die Rotation zwischen einzelnen Lagen, die über den Moiré-Effekt zu einer Modulation der elektronischen Bandstruktur führt, machen Van-der-Waals-Materialien zu enorm flexiblen Quantenmaterialien. Darin ermöglicht die starke Wechselwirkung von (Quasi-)Teilchen, die zum einen durch die reduzierte Dimensionalität und zum anderen durch das beeinflussbare dielektrische Abschirmverhalten bedingt wird, exotische quantenkorrelierte Zustände. Einige davon sind sogar in einem anwendungsrelevanten Temperaturbereich realisierbar, wie hier am Beispiel der Bose-Einstein-Kondensation ausgeführt. Neben dem akademischen Wissensgewinn und der Erforschung von grundlegenden Vielteilchenquantensystemen eröffnen Van-der-Waals-Kristalle einen Zugang zur Realisierung neuartiger Quantentechnologien.

### Zusammenfassung

*Zweidimensionale (2D) Kristalle zeigen verstärkt Vielteilchenphänomene, was sie für Forschung und Anwendungen interessant macht. Dafür sorgt die viel geringere Abschirmung der Ladungsträger im Vergleich zum dreidimensionalen Fall. Verantwortlich dafür sind die Flachheit des Materials, die dielektrische Umgebung und mit der reduzierten Dimensionalität verbundene Quanteneinschränkungen. 2D-Kristalle können zudem aufeinander gestapelt werden, wobei die einzelnen Schichten nur durch Van-der-Waals-Kräfte verbunden sind. Solche künstlichen Van-der-Waals-Kristalle erlauben die Realisierung einer Fülle von neuartigen physikalischen Systemen. In halbleitenden Heterostrukturen gelang es nun, erste Hinweise für ein optisch generiertes Bose-Einstein-Kondensat von Exzitonen zu finden.*

### Stichwörter

Zweidimensionale Kristalle, 2D-Kristalle, Van-der-Waals-Materialien, Quanten-Vielteilchenphänomen, korrelierte Ladungsträger, Exziton, Bose-Einstein-Kondensat von Exzitonen.

### Danksagung

Open Access Veröffentlichung ermöglicht und organisiert durch Projekt DEAL.

### Literatur

- [1] K. S. Novoselov et al., *Science* **2004**, 306, 666.
- [2] B. Radisavljevic et al., *Nat. Nanotechnol.* **2011**, 6, 147.
- [3] S. Wachter et al., *Nat. Commun.* **2017**, 8, 14948.
- [4] X. Lu et al., *Nature* **2019**, 574, 653.
- [5] F. Wu et al., *Phys. Rev. Lett.* **2018**, 121, 26402.
- [6] Y. Tang et al., *Nature* **2020**, 579, 353.
- [7] J. P. Eisenstein, A. H. MacDonald, *Nature* **2004**, 432, 691.
- [8] M. M. Fogler, L. V. Butov, K. S. Novoselov, *Nat. Commun.* **2014**, 5, 4555.
- [9] Z. Wang et al., *Nature* **2019**, 574, 76.
- [10] L. Sigl et al., *PRR* **2020**, 2, 042044 (R).
- [11] S. Dietl et al., *Phys. Rev. B* **2017**, 95, 85312.
- [12] J. Klein et al., *Appl. Phys. Lett.* **2019**, 115, 261603.
- [13] M. Florian et al., *Nano Lett.* **2018**, 18, 2725.
- [14] A. Chernikov et al., *Phys. Rev. Lett.* **2014**, 113, 76802.
- [15] A. Raja et al., *Nat. Commun.* **2017**, 8, 15251.
- [16] U. Wurstbauer et al., *J. Phys. D: Appl. Phys.* **2017**, 50, 173001.

### Zusatzmaterial

Das Video zu Abbildung 8b zeigt, wie sich Metronome auf einer schwingfähigen Unterlage gegenseitig synchronisieren, im Gegensatz zu einer starren Unterlage. Sie finden es auf <http://wiley.com/doi/piuz202101600-sup-0001-supinfo> unter „Supporting Information“. Alternativ können Sie den Kurzlink <https://t1p.de/Metronome> eintippen oder den QR-Code hier und neben Abbildung 8 mit einer QR-Code-App fotografieren.

Zusatzmaterial



### Die Autoren



Ursula Wurstbauer studierte Physik an der Universität Regensburg und promovierte dort 2008. Nach Postdoc-Aufenthalten u.a. an der Columbia University in New York war sie Gruppenleiterin an der Technischen Universität München (TUM) und Mitglied des Exzellenzclusters Nanosystems Initiative Munich. Seit 2019 ist sie Professorin am Physikalischen Institut der Universität Münster und Mitglied des Center for Soft Nanoscience (SoN).



Alexander Holleitner studierte Physik an der Ludwig-Maximilians-Universität (LMU) und promovierte dort 2002. Nach einem Postdoc-Aufenthalt an der University of California, Santa Barbara, war er 2006 Juniorprofessor an der LMU. Seit 2007 ist er Professor für Physik an der TUM und leitet dort das Zentrum für Nanotechnologie und Nanomaterialien des Walter Schottky Instituts (WSIs). Seit 2020 hält er den gleichnamigen Lehrstuhl an der TUM und ist Direktor am WSI.

### Anschriften

Prof. Dr. Ursula Wurstbauer, Physikalisches Institut, Westfälische Wilhelms-Universität Münster, Wilhelm-Klemm-Str. 10, 48149 Münster. [Wurstbauer@uni-muenster.de](mailto:Wurstbauer@uni-muenster.de)

Prof. Dr. Alexander W. Holleitner, Walter-Schottky-Institut und Physik-Department, TU München, Am Coulombwall 4a, 85748 Garching. [Holleitner@wsi.tum.de](mailto:Holleitner@wsi.tum.de)