

MAGNETISMUS

Knoten in der Magnetisierung

Was sind magnetische Skyrmionen und wofür braucht man sie?

Kirsten von Bergmann

Magnetische Skyrmionen sind spezielle Konfigurationen in der magnetischen Struktur. Ihre besonderen physikalischen Eigenschaften versprechen zukünftige Anwendungen in der Spintronik und Datenverarbeitung. Skyrmionen können in verschiedenen Größen und Materialien vorkommen. Trotz der Vielfalt entstehen sie alle aufgrund der Konkurrenz weniger magnetischer Wechselwirkungen. Auch die fundamentalen physikalischen Eigenschaften hängen großteils nicht von ihrer Größe und der Materialart ab. Daher untersuchen weltweit viele Forschungsgruppen magnetische Skyrmionen.

Ein Skyrmion ist eine teilchenartige magnetische Struktur (**Abb. 1**). In seinem Zentrum ist die Magnetisierung immer entgegengesetzt zur Magnetisierung in seiner Umgebung, dem ferromagnetischen Hintergrund. Der Übergang, also die 180° -Drehung der Magnetisierung vom Zentrum nach außen, erfolgt schrittweise und mit einheitlichem Drehsinn, in den Abbildungen ist dies der Uhrzeigersinn. Dadurch enthält ein Skyrmion immer atomare magnetische Momente in allen Raumrichtungen. Wo ein solches zweidimensionales Skyrmion aufhört, ist nicht ganz klar. Aus praktischen Gründen wird häufig der Bereich innerhalb der in der Ebene liegenden Magnetisierung genommen. In **Abb. 1** markieren dann die weißen Ringe den

Durchmesser der Skyrmionen, auch wenn sie tatsächlich etwas größer sind.

Ein Skyrmion entspricht einem Knoten in der Spintextur. Damit unterscheidet sich seine Topologie von der eines unverknoteten Ferromagneten. Ein bekanntes, anschauliches Beispiel für solch einen topologischen Knoten ist das Möbius-Band, das nicht durch kontinuierliche Verformung in ein Band ohne Verdrehung umzuwandeln ist. Auch ein Skyrmion kann nicht durch eine Verdrehung der atomaren magnetischen Momente in einen Ferromagneten übergehen. Um ein Skyrmion zu erzeugen oder zu vernichten, muss der Knoten diskontinuierlich geknüpft oder aufgebrochen werden. Da ein solcher Übergang eine hohe Energiebarriere haben kann, ist häufig die Rede von einem topologischen Schutz, der Skyrmionen stabilisiert. Alle Spins eines Skyrmions lassen sich auf eine Einheitskugel projizieren (**Abb. 1**, Mitte). Da sie dadurch genau einmal umhüllt wird, ist der Betrag der topologischen Ladung für ein Skyrmion 1. Wird die Richtung jedes atomaren magnetischen Moments invertiert, entsteht ein Skyrmion mit dem gleichen Drehsinn, aber dem umgekehrten Vorzeichen der topologischen Ladung.

◀ **Abb. 1** Ein magnetisches Skyrmion ist ein Knoten in der Magnetisierung. Jeder Kegel zeigt in die lokale Magnetisierungsrichtung, die Farbe markiert die Richtung relativ zur Ebene – rot nach oben, weiß in der Ebene und blau nach unten. Die beiden Skyrmionen existieren in entgegengesetzt magnetisierten Umgebungen, haben aber den gleichen Drehsinn der Magnetisierung. Auf eine Einheitskugel (Mitte) lassen sich die magnetischen Momente eines Skyrmions genau einmal projizieren. Daher ist der Betrag der topologischen Ladung eines Skyrmions 1, wobei das Vorzeichen zwischen den beiden gezeigten Konfigurationen wechselt.

Magnetische Wechselwirkungen

Atomare magnetische Momente können miteinander wechselwirken. Die geläufigste Kopplung ist die Heisenberg-Austauschwechselwirkung, bei der das Vorzeichen der Kopplungskonstanten J darüber entscheidet, ob eine parallele oder eine antiparallele Ausrichtung der beiden beteiligten Spins S_A und S_B bevorzugt ist. Die entsprechende Energie hat die Form $E = -J \cdot (S_A \cdot S_B)$. Die Dzyaloshinskii-Moriya (DM)-Wechselwirkung dagegen, die ihren Ursprung in der Spin-Bahn-Wechselwirkung hat, bevorzugt eine orthogonale Ausrichtung, $E = \mathbf{D} \cdot (S_A \times S_B)$. Sie kann in Systemen auftreten, deren Inversionssymmetrie gebrochen ist. Die DM-Wechselwirkung ist eine Grundvoraussetzung für die Entstehung und Stabilisierung magnetischer Skyrmionen.

Der Vektor \mathbf{D} legt sowohl den Drehsinn als auch die Ebene der Spinrotation fest. Für ein bestimmtes Material führt \mathbf{D} immer zum gleichen Drehsinn der Spinstruktur, während verschiedene Materialien unterschiedliche Rotationsrichtungen haben können. Für die Achse von \mathbf{D} gibt es Symmetriewahlregeln. Ein struktureller Symmetriebruch wie in Materialien mit chiraler Kristallstruktur führt meist zu helikaler Rotation der Spinstruktur. Wenn die Inversionssymmetrie aufgrund einer Oberfläche oder einer Grenzfläche in ansonsten hochsymmetrischen Systemen gebrochen ist, treten üblicherweise zyklische Spinrotationen auf (**Abb. 1**) [1].

Verdrehte Spinstrukturen

Das Vorzeichen der Heisenberg-Austauschwechselwirkung bestimmt, ob benachbarte magnetische Momente bestrebt sind, parallel oder antiparallel zu koppeln, also ob das System ferromagnetisch oder antiferromagnetisch ist. Durch die DM-Wechselwirkung können nicht-kollineare Konfigurationen entstehen, bei denen Spinrotationen mit entgegengesetztem Drehsinn unterschiedliche Energie haben. Es handelt sich also nicht um Chiralität in dem Sinne, in dem der Begriff in der Chemie für links- und rechtsdrehende Moleküle verwendet wird. Denn diese Art der Händigkeit ist verknüpft mit der Tatsache, dass Bild und Spiegelbild die gleiche Energie haben. Genau das ist bei den Spinrotationen, die durch DM-Wechselwirkung entstehen, nicht der Fall. Hier ist ein Drehsinn gegenüber dem anderen bevorzugt.

Mit dem folgenden Gedankenexperiment werden die Auswahlregeln für die Achse von \mathbf{D} am Beispiel magnetischer Filme auf Oberflächen phänomenologisch verständlich: Wenn eine helikale Spinspirale mit einem bestimmten Drehsinn auf einer Oberfläche an einer Spiegelebene σ gespiegelt wird, resultiert eine Spinspirale mit entgegengesetztem Drehsinn (**Abb. 2a**). Da hierbei die Energie erhalten bleibt, müssen beide Spinspiralen die gleiche Energie haben, sodass die DM-Wechselwirkung keinen Drehsinn auswählen kann. Wenn eine zyklische Spinspirale mit einem gegebenen Drehsinn gespiegelt wird (**Abb. 2b**), wird sie in sich selbst überführt. Da es keine Symmetrieeoperation gibt, die eine zyklische Spinspirale auf einer Oberfläche in den entgegengesetzten Drehsinn überführt, dürfen die beiden Spinspiralen unterschiedliche Energie haben. Daher sind Spinverdrehungen, die aus DM-Wechselwirkung resultieren, bei einer solchen Symmetrie immer zyklisch. Eigentlich werden Spins als Pseudovektoren nach anderen Regeln gespiegelt, das Ergebnis für die Symmetriewahlregel ist allerdings das Gleiche.

Die Konkurrenz zwischen Heisenberg-Austausch und DM-Wechselwirkung führt typischerweise zu Spinspiralen. Ihr Verhältnis zueinander bestimmt dabei den Winkel zwischen nächsten Nachbarn beziehungsweise die Periode der Spinspirale. Abhängig vom Vorzeichen des Heisenberg-Austauschs besitzt die Spinspirale Winkel kleiner oder größer als 90° (**Abb. 2c, d**). Das Vorzeichen der DM-Wechselwirkung bestimmt den Drehsinn der Spinspirale.

Skyrmionen dicht an dicht

Gitter aus magnetischen Skyrmionen kann man sich als Überlagerung von Spinspiralen vorstellen, die gleichzeitig in unterschiedliche Richtungen laufen. Zusätzlich zum Hei-

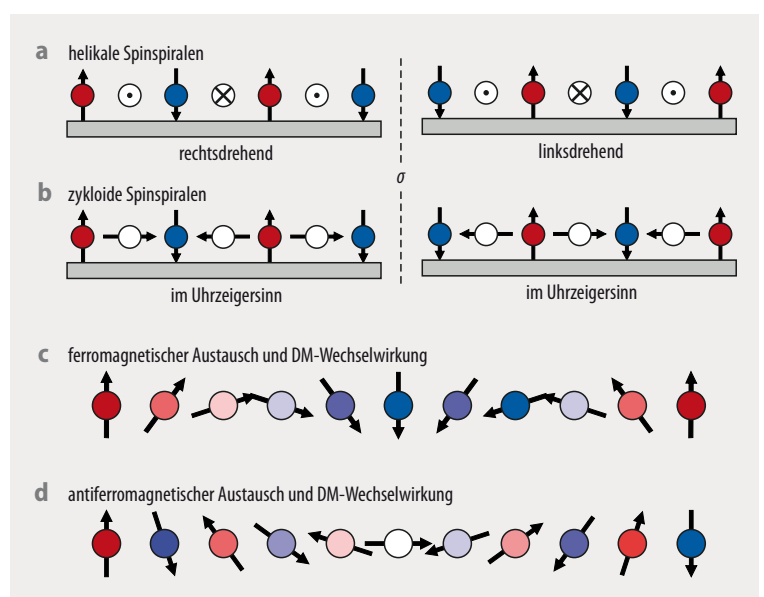
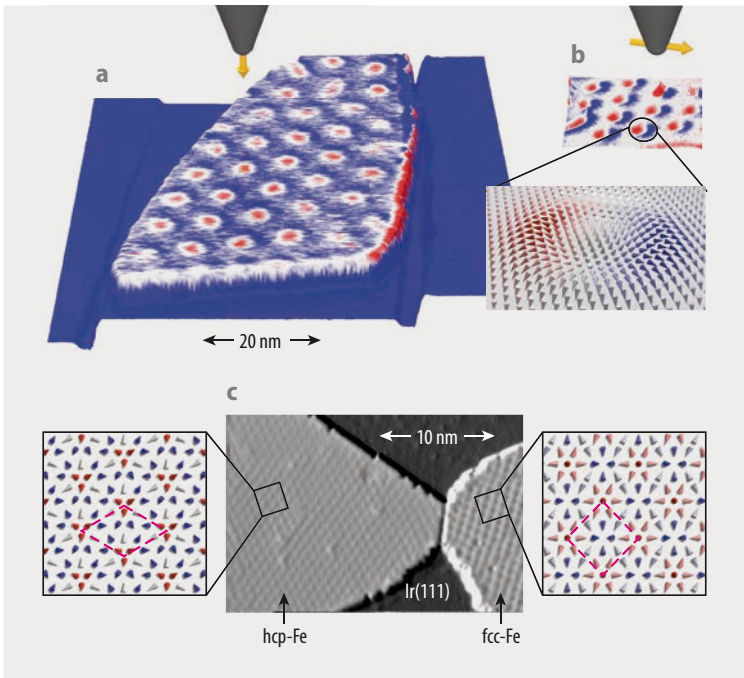


Abb. 2 Bei helikalen Spinspiralen steht die Drehebene der Spins senkrecht auf der Ausbreitungsrichtung (a). Zyklische Spinspiralen propagieren entlang einer Richtung in der Drehebene der Spins (b). Wenn ferromagnetischer Austausch und DM-Wechselwirkung konkurrieren (c), sind die Winkel zwischen benachbarten Spins kleiner als 90° , bei antiferromagnetischem Austausch (d) größer als 90° .



◀ **Abb. 3** Im Zentrum des Bildes (a), das mit spinpolarisierter Rastertunnelmikroskopie bei $T = 8\text{ K}$ und $B = 1,1\text{ T}$ aufgenommen wurde, ist eine biatomare Lage aus Pd und Fe auf einem Ir-Einkristall zu sehen [3]. Das Skyrmionengitter ist ungefähr hexagonal. Durch die senkrecht zur Oberfläche magnetisierte Spitze (gelber Pfeil) resultiert maximaler magnetischer Kontrast für nach oben und unten gerichtete magnetische Momente der Oberfläche: Die Skyrmionen erscheinen rund. Bei gedrehter Spitzenmagnetisierung (b) ist der magnetische Kontrast für Skyrmionen im gleichen Material anders ($T = 4\text{ K}$, $B = 1,5\text{ T}$); die vergrößerte Illustration zeigt ein entsprechendes Skyrmion, bei dem die atomaren magnetischen Momente parallel und antiparallel zur Spitzenmagnetisierung eingefärbt sind. Alle Skyrmionen sehen gleich aus und haben somit einheitlichen Drehsinn. Auch die beiden möglichen Stapelfolgen von atomaren Fe-Lagen auf einem Ir-Einkristall wurden bei $T = 4\text{ K}$ und $B = 0\text{ T}$ untersucht (c). Die beiden Illustrationen zeigen das zugehörige hexagonale (links) bzw. das nahezu quadratische Skyrmionengitter (rechts) [4]. Ein Kegel entspricht einem atomaren magnetischen Moment.

senberg-Austausch und zur DM-Wechselwirkung sind für ihre Entstehung weitere Energiebeiträge relevant: Meist ist der magnetische Grundzustand eine einzelne Spinspirale, und durch Anlegen eines externen Magnetfeldes entsteht daraus ein Skyrmionengitter, das im Vergleich eine größere Anzahl magnetischer Momente in Magnetfeldrichtung aufweist. Ein höheres angelegtes Magnetfeld richtet schließlich alle magnetischen Momente entlang des Feldes aus, sodass sich ein ferromagnetischer Zustand ergibt.

Ein Skyrmionengitter lässt sich mittels spinpolarisierter Rastertunnelmikroskopie vermessen. Diese Methode bietet Zugang zur magnetischen Struktur auf atomarer Skala und kommt häufig bei Modellsystemen auf Basis von Einkristallen zum Einsatz [2]. Durch eine magnetische Spitze variiert der spinpolarisierte Tunnelstrom abhängig von der lokalen relativen Spitzen- und Probenmagnetisierung. Wenn die Spitzenmagnetisierung senkrecht zur Oberfläche zeigt, wird auch die senkrechte Komponente der Probenmagnetisierung detektiert. Die magnetischen Skyrmionen, die in einer atomar dünnen Pd/Fe-Bilage durch ein Magnetfeld senkrecht zum Film stabilisiert werden, erscheinen in dem Fall rund (**Abb. 3a**). Sie sind wenige Nanometer groß und bestehen aus einigen Dutzend Oberflächenatomen [3]. Mit einer in der Probenebene magnetisierten Spitze erscheinen

in der Ebene ausgerichtete magnetische Momente mit dem größten magnetischen Kontrast (**Abb. 3b**). Da alle Skyrmionen im Bild des Rastertunnelmikroskops gleich aussehen, erbringt eine solche Messung den Nachweis, dass die Spinstruktur aller Skyrmionen in diesem System gleich ist, sie also den gleichen durch DM-Wechselwirkung vorgegebenen Drehsinn haben.

Statt eines Magnetfeldes können auf atomarer Skala auch exotischere Wechselwirkungen höherer Ordnung eine Rolle für die Stabilisierung von Skyrmionengittern spielen [4]. So kann eine atomare Lage aus Fe-Atomen auf einem Ir-Einkristall mit hexagonaler Oberflächenstruktur in zwei verschiedenen Stapelfolgen wachsen (**Abb. 3c**). Beide zeigen ein Skyrmionengitter mit einer Periode von etwa einem Nanometer. Hierbei ist das eine Skyrmionengitter hexagonal, das andere aufgrund der etwas verschiedenen magnetischen Wechselwirkungen nahezu quadratisch. Tatsächlich sind die Skyrmionen in diesen Gittern sehr klein, sodass sich nur wenige experimentelle Methoden eignen, um sie zu untersuchen. Die einzelnen Skyrmionen bestehen aus nur etwa 12 bis 15 Atomen; Skyrmionengitter mit weniger Atomen pro Skyrmion sind kaum möglich.

Größere Skyrmionen mit Durchmessern von mehr als 10 nm lassen sich auch mit vielen anderen Methoden un-

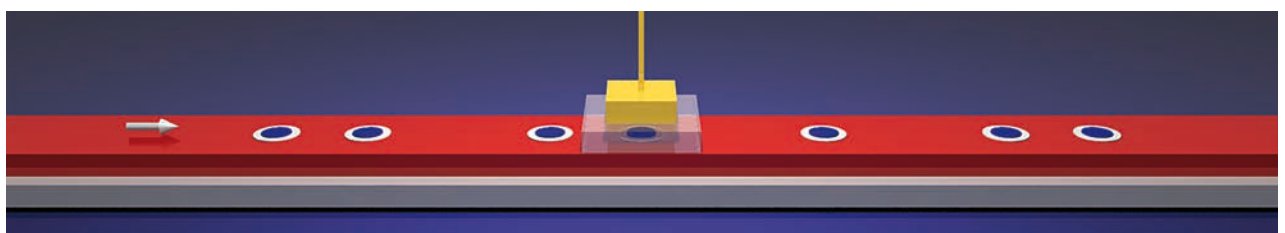


Abb. 4 Bei dem Racetrack-Memory-Konzept lassen sich die Skyrmionen (blau) mit einem Strom (grauer Pfeil) durch ein magnetisches Band (rot) transportieren. So gelangen sie zu einem ortsfesten Schreib-/Lesekopf. Dieser kann wie hier gezeigt aus einer planaren Tunnelbarriere (durchsichtig) mit einem metallischen Kontakt (gelb) und Zuleitung bestehen.

tersuchen. Häufig kommen dabei keine einkristallinen Modellsysteme mit perfekten atomaren magnetischen Lagen zum Einsatz, sondern körnige oder ungeordnete magnetische Filme, die leichter herzustellen sind. Oft sollen mehrere magnetische Lagen übereinander sicherstellen, dass die Filme durch die größere Menge magnetischen Materials auch bei Raumtemperatur magnetisch sind und thermische Fluktuationen der Magnetisierung keine große Rolle spielen. Für Anwendungen kommen natürlich keine Systeme infrage, die nur bei tiefen Temperaturen Skyrmionen zeigen, wie jene aus **Abb. 3**. An solchen Modellsystemen lassen sich jedoch die universellen physikalischen Eigenschaften von Skyrmionen besonders gut herausarbeiten.

Auf der Rennstrecke

Eine besonders nützliche Eigenschaft von Skyrmionen im Hinblick auf mögliche Anwendungen wie die Datenverarbeitung ist ihre Wechselwirkung mit sich bewegenden Elektronen [5, 6]: Bei einem in der Filmebene fließenden Strom können sich die magnetischen Momente durch den Übertrag eines Spinmoments von den Elektronen verdrehen. Da in einem stromdurchflossenen Film alle magnetischen Momente gleichermaßen betroffen sind, ist das Resultat äquivalent zu einer Bewegung der Skyrmionen in der Filmebene. Doch in realen magnetischen Filmen beeinflussen Defekte wie Korngrenzen oder Verunreinigungen die Bewegung der Skyrmionen. Daher erfordern viele Systeme experimentell noch eine Optimierung, um eine kontrollierte Bewegung zu erreichen.

Skyrmionen können als Informationsträger dienen: Bei Anwesenheit eines Skyrmions hat ein Bit den Zustand „1“ und bei Abwesenheit den Zustand „0“. Damit ist es möglich, gespeicherte Informationen entlang eines magnetischen Bandes zu transportieren. Ein solches Konzept von Datenspeicherung und -transport im Material zu einem ortsfesten Schreib-/Lesekopf ist als Racetrack-Memory bekannt (**Abb. 4**) und wurde zunächst für magnetische Domänenwände als Bits vorgeschlagen [7, 8]. Offensichtlich ist es dafür erforderlich, einzelne Skyrmionen als Bits herzustellen. Dies gelingt bei der richtigen Balance der entscheidenden Energiebeiträge, insbesondere Heisenberg-Austausch, DM-Wechselwirkung und angelegtem Magnetfeld. Solche einzelnen Skyrmionen sind typischerweise metastabil. Entsprechend befinden sie sich zwar nicht im energetisch günstigsten Zustand, zerfallen aber aufgrund einer Energiebarriere auch nicht.

Zusätzlich muss es möglich sein, die einzelnen Skyrmionen gezielt zu adressieren. Die erste von bislang nur wenigen Demonstrationen zum kontrollierten Schreiben und Löschen einzelner magnetischer Skyrmionen gelang mit der Spitze eines Rastertunnelmikroskops im Modellsystem einer Pd/Fe-Bilage bei tiefen Temperaturen (**Abb. 3a, b**). Im zeitaufgelösten Tunnelstrom ist ein überwiegend statistisches Schalten zwischen den beiden Zuständen – Skyrmion und Ferromagnet – zu beobachten (**Abb. 5a**). Während die Lebenszeiten der magnetischen Zustände, abhängig von der Tunnelspannung, einige Sekunden bis zu Bruchteilen von Sekunden betragen, sind die tatsächlichen Schaltzeiten

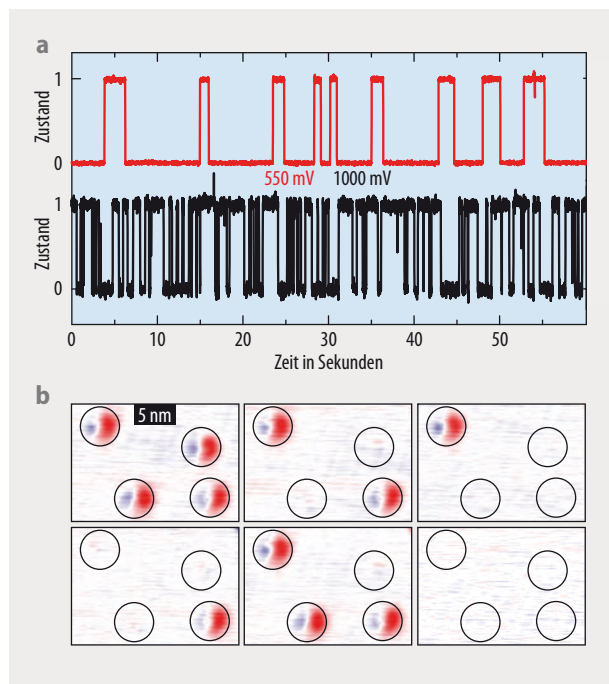


Abb. 5 Die ortsfeste zeitaufgelöste Messung des magnetischen Zustandes mit der spinpolarisierten Spitze eines Rastertunnelmikroskops zeigt das statistische Schalten (a): Bei einer „1“ befindet sich ein Skyrmion unter der Spitze. Bei einer „0“ ist die Magnetisierung unter der Spitze homogen, also ferromagnetisch ($T = 4$ K, $B = 2,9$ T). Im gleichen Probenbereich lassen sich verschiedene Konfigurationen von 0 und 1 schreiben (b), wie die wiederholte ortsaufgelöste Messung der Probenstelle mit unterschiedlicher Anzahl magnetischer Skyrmionen an den markierten Stellen in der Pd/Fe-Bilage auf einem Ir-Einkristall zeigt ($T = 4$ K, $B = 3,25$ T).

zu schnell, um mit dieser Methode aufgelöst zu werden. Durch gezieltes Adressieren mit der Spitze lassen sich im Probenbereich verschiedene Konfigurationen von „1“ und „0“ schreiben (**Abb. 5b**).

Elektrische Felder zwischen der Spitze des Rastertunnelmikroskops und der Probenoberfläche ermöglichen gerichtetes Schalten bei elongierten Skyrmionen in einem drei Atomlagen dicken Fe-Film auf einem Ir-Einkristall (**Abb. 6**) [9]. Dabei entscheidet direkt die Auswahl der Polarität der Tunnelspannung, ob Skyrmionen gelöscht oder geschrieben werden. Ein solcher Schaltprozess ist auch in planaren Tunnelkontakten (**Abb. 4**) möglich, wie sie heute schon zum Einsatz kommen.

Wohin laufen die Skyrmionen?

Bei einem Stromfluss entlang eines magnetischen Bandes gibt es aber nicht nur einen Spinmomentübertrag der Elektronen auf die magnetischen Momente. Gleichzeitig werden die Elektronen aufgrund der gewundenen Spinstruktur des Films abgelenkt. Dieser Effekt ist als zusätzlicher Beitrag zum Hall-Effekt messbar, also als Spannung orthogonal zum Stromfluss [10]. Dieses Phänomen ist als topologischer Hall-Effekt bekannt.

Infolgedessen bewegen sich auch die Skyrmionen nicht genau entlang der Richtung des Stromflusses, sondern unter einem Winkel dazu, dem Hall-Winkel [11]. Demnach

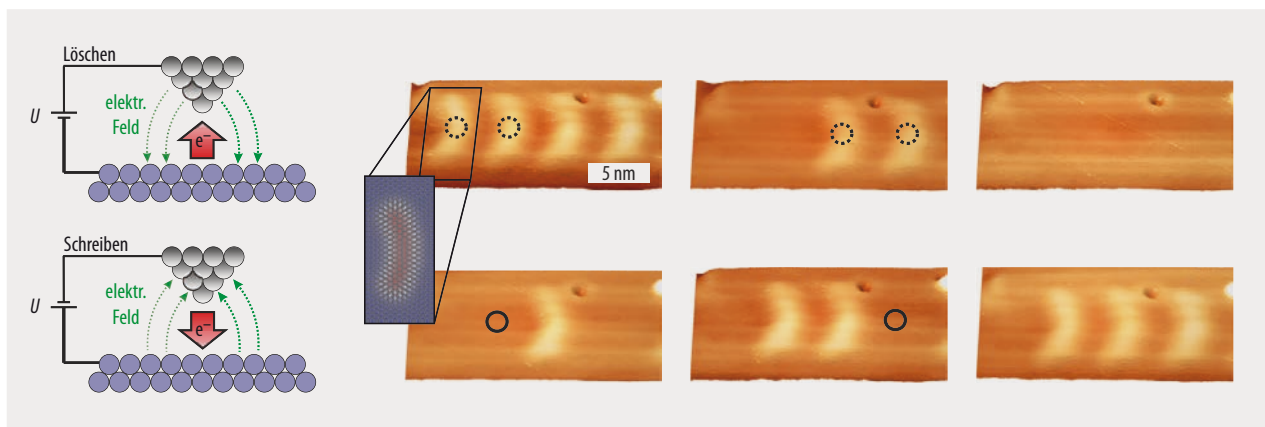


Abb. 6 Durch elektrische Felder zwischen der Spitze des Rastertunnelmikroskops und der Probenoberfläche tritt gerichtetes Schalten zwischen den magnetischen Zuständen von Skyrmion und Ferromagnet auf (links). Die Probe besteht aus einem drei Atomlagen dicken Fe-Film auf einem Ir-Einkristall, $T = 8 \text{ K}$ und $B = 2,5 \text{ T}$ [9]. Die Skyrmionen sind in diesem Fall elongiert, da sich die Verzerrung des magnetischen Films auf die Spintextur überträgt. Bei negativer Probenspannung werden Skyrmionen gelöscht (oben) und bei positiver geschrieben (unten).

bewegen sich die Skyrmionen bei einem Stromfluss entlang eines Bandes auch immer in Richtung Rand. Bei einer Invertierung aller magnetischen Momente kehrt sich die topologische Ladung um und die Skyrmionen laufen zum anderen Rand. Für die Nutzung im Racetrack-Memory ist das ungünstig, da Skyrmionen am Rand gelöscht werden können.

Doch es gibt verschiedene Ansätze, um verwandte teilchenartige Knoten in der Magnetisierung zu erhalten, die exakt geradeaus laufen können. Dabei steht die Idee im Vordergrund, dass zwei komplementäre Skyrmionen, also ein Paar mit entgegengesetzter topologischer Ladung, ineinander verwebt werden: Während das eine in einer Richtung abgelenkt wird, zieht es das andere in die Gegenrichtung. So entsteht durch Kompensation eine Bewegung exakt entlang der Stromrichtung.

Ein solches Skyrmionenpaar kann beispielsweise so aussehen, dass ein Skyrmion sich im Zentrum eines entgegengesetzten Skyrmions befindet. Solche „Target-Skyrmionen“ (Abb. 7a) wurden bereits experimentell beobachtet. Allerdings gelang es noch nicht, ihre stromgetriebene Bewegung zu zeigen. Eine weitere Möglichkeit besteht darin, zwei entgegengesetzte Skyrmionen übereinander zu stapeln. Dafür sind zwei magnetische Filme herzustellen, die durch Zwi-

schichten-Austauschkopplung bevorzugt antiferromagnetisch angeordnet sind (Abb. 7b). Kürzlich wurden in einer Probe aus solchen synthetischen Antiferromagneten entgegengesetzt gekoppelte Skyrmionen nachgewiesen [12]. Die übereinander gestapelten Skyrmionen erscheinen deutlich vielversprechender für Anwendungen als die ineinandergesetzten, da es schon viele Beispiele von Skyrmionen in magnetischen Filmen gibt, die sich übereinander legen und koppeln lassen. Werden gegensätzliche Skyrmionen so verwebt, dass ihre Atome abwechselnd angeordnet sind, entsteht ein antiferromagnetisches Skyrmion (Abb. 7c)

Die Suche nach antiferromagnetischen Skyrmionen

Während herkömmliche (ferromagnetische) Skyrmionen sich mit einer Vielzahl von Techniken untersuchen lassen, ist die Detektion antiferromagnetischer Skyrmionen nicht ganz so leicht. Sehr große antiferromagnetische Skyrmionen könnten über eine ortsaufgelöste Messung der Spinquantisierungsachse auffindbar sein. Viele experimentelle Methoden beruhen jedoch auf der Messung spinabhängiger elektronischer Übergänge in einem Atom. Aber sobald das Nachbaratom entgegengesetzt magnetisiert ist, mitteln sich die Beiträge zu null. Andere Methoden mes-

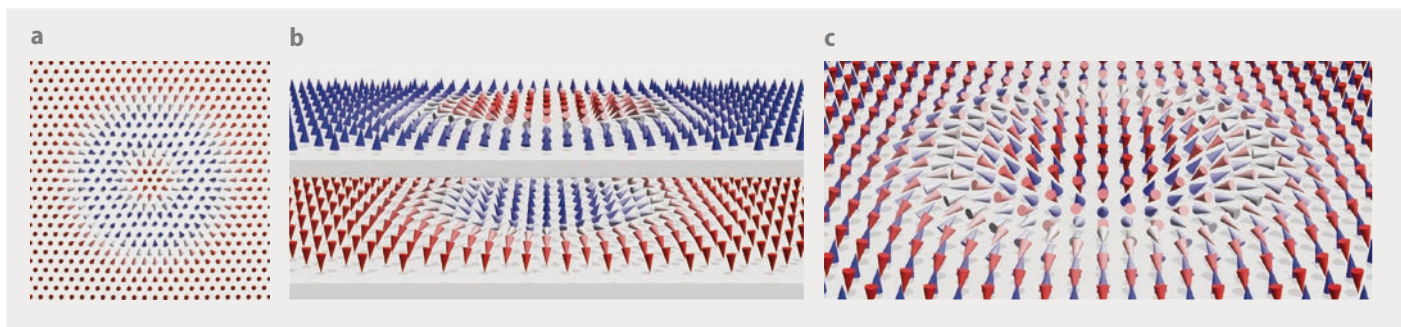


Abb. 7 Zwei komplementäre Skyrmionen lassen sich auf verschiedene Weise zusammensetzen: Beim Target-Skyrmion wird ein Skyrmion in ein anderes gesetzt (a), es wird auch Skyrmionium oder 2π -Skyrmion genannt. Ein synthetischer Antiferromagnet besteht aus zwei ferromagnetischen Lagen, die über Interlagen-Austauschkopplung antiparallel gekoppelt sind (b). Auch die Skyrmionen in den beiden Filmen sind antiparallel gekoppelt und damit komplementär. Zwei gegensätzliche Skyrmionen können auch auf atomarer Skala miteinander verweben und ein antiferromagnetisches Skyrmion bilden (c).

sen das Streufeld oberhalb einer Oberfläche, aber antiferromagnetische Materialien haben ein nahezu kompensiertes Streufeld, sodass eine sehr hohe Sensitivität erforderlich ist.

Um antiferromagnetische Skyrmionen zu entdecken und zu untersuchen, eignet sich die spinpolarisierte Rastertunnelmikroskopie. Da antiferromagnetische Skyrmionen jedoch immer nur metastabil sind – und nicht wie ihre ferromagnetischen Gegenstücke in variabel einstellbaren externen Magnetfeldern erzeugt werden können – sind die Anforderungen an die Balance der magnetischen Wechselwirkungen sehr hoch, um eine solche Spintextur im Film zu stabilisieren. Einige theoretische Arbeiten geben einen Phasenraum der magnetischen Parameter an, in denen isolierte antiferromagnetische Skyrmionen metastabil sind, allerdings bleiben die Energiebarrieren für den Zerfall klein.

Die experimentelle Herausforderung besteht darin, ein Material maßzuschneidern, das diese Bedingungen erfüllt. Bislang gelang es noch nicht, Skyrmionen in Antiferromagneten experimentell nachzuweisen. Kürzlich wurden aber Skyrmionen in einem Ferrimagneten gefunden. Dort existieren ähnlich wie beim Antiferromagneten zwei entgegengesetzt magnetisierte Untergitter. Aber diese kompensieren sich nicht genau, weil sie zum Beispiel aus unterschiedlichen Elementen bestehen. Mit einer element-spezifischen Methode lässt sich ausschließlich das Signal des einen Untergitters detektieren und eine Mittelung des Signals beider Untergitter vermeiden. In dem untersuchten Ferrimagneten wurden die stromgetriebenen Skyrmionen noch immer ein wenig abgelenkt [13]. Allerdings könnte es gelingen, Materialien herzustellen, bei denen sich die Hall-Winkel der beiden Untergitter exakt kompensieren und sich die Skyrmionen tatsächlich ohne Ablenkung bewegen, wie es für die echten antiferromagnetischen Skyrmionen zu erwarten ist.

Wofür sind Skyrmionen noch interessant?

Die aktuelle Forschung zielt darauf ab, Skyrmionen für Anwendungen nutzbar zu machen. Dazu wird derzeit daran gearbeitet, weitere Materialien zu finden, in denen Skyrmionen in ferromagnetischer oder antiferromagnetischer Umgebung stabilisiert werden können und in denen sie sich gleichzeitig kontrolliert bewegen, schreiben und löschen lassen. Das Verständnis der Rolle der verschiedenen magnetischen Wechselwirkungen nimmt zu, zum Beispiel die zusätzliche Stabilisierung durch Austausch zwischen weiter entfernten magnetischen Momenten oder durch magnetische Wechselwirkungen höherer Ordnung. Dies kann helfen, geeignete Systeme maßzuschneidern.

Neben Anwendungen des Racetrack-Typs, welche die experimentell schon häufig gezeigte Translation von Skyrmionen in einer Dimension verwenden, scheint es vielversprechend, die Bewegung und Anordnung von Skyrmionen in zwei Dimensionen, also in der Filmebene, zu nutzen. In diesem Zusammenhang werden Skyrmionen für alternative Methoden der Informationsverarbeitung diskutiert, beispielsweise für probabilistisches oder neuromorphes Rechnen. Experimentell wurde die zweidimensionale ther-

mische Diffusion von Skyrmionen innerhalb einer Scheibe als ein Baustein vorgeschlagen [14].

Theoretisch wurde vorhergesagt, dass Skyrmionen in Kontakt mit Supraleitern gebundene Majorana-Zustände erzeugen können, also Quasiteilchen, die gleichzeitig ihre eigenen Antiteilchen sind. Da Skyrmionen im Material bewegt werden können, sind solche Systeme geeignet, das Majorana-Braiding (Flechten) zu realisieren. Dies wäre ein wichtiger Schritt in Richtung topologisches Quantenrechnen [15]. Wenn diese Forschungsgebiete weiterhin so rasant Fortschritte machen wie bisher, sind in den nächsten Jahren weitere spannende Ergebnisse, aber auch neue offene Fragen im Bereich Skyrmionen zu erwarten.

*

Ich bedanke mich bei Dr. André Kubetzka für die umfangreiche Unterstützung bei der Erstellung der Abbildungen.

Literatur

- [1] K. von Bergmann et al., J. Phys.: Condens. Matter **26**, 394002 (2014)
- [2] R. Wiesendanger, Rev. Mod. Phys. **81**, 1495 (2009)
- [3] N. Romming et al., Science **341**, 636 (2013)
- [4] S. Heinze et al., Nat. Phys. **7**, 713 (2011)
- [5] C. Pfleiderer, Physik Journal, August/September 2016, S. 47
- [6] K. Everschor-Sitte, Physik Journal, August/September 2018, S. 49
- [7] S. S. P. Parkin et al., Science **320**, 190 (2008)
- [8] A. Fert et al., Nat. Nanotechn. **8**, 152 (2013)
- [9] P.-J. Hsu et al., Nat. Nanotech. **12**, 123 (2017)
- [10] A. Neubauer et al., Phys. Rev. Lett. **102**, 186602 (2009)
- [11] W. Jiang et al., Nat. Phys. **13**, 162 (2017)
- [12] W. Legrand et al., Nat. Mater. **19**, 34 (2020)
- [13] S. Woo et al., Nat. Commun. **9**, 959 (2018)
- [14] J. Závorka et al., Nat. Nanotechn. **14**, 658 (2019)
- [15] T. Karzig und B. Bauer, Physik Journal, Dezember 2019, S. 34

Die Autorin

Kirsten von Bergmann (FV Oberflächenphysik und FV Magnetismus) studierte Chemie an der Universität Bonn. Sie promovierte 2004 im Fachbereich Physik der Universität Hamburg, wo sie abgesehen von einem mehrmonatigen Forschungsaufenthalt bei IBM Almaden seitdem als Wissenschaftlerin tätig ist. 2013 erhielt sie den Gaede-Preis für ihre Arbeiten zu komplexen Spinstrukturen. Sie wurde 2019 an der Universität Hamburg habilitiert und ist Mitglied des Steering Committees des DFG-Schwerpunktprogramms „Skyrmionics“ SPP2137.



Dr. Kirsten von Bergmann, Fachbereich Physik, Universität Hamburg, Jungiusstr. 11, 20355 Hamburg