

# Magnetismus mit Drehsinn

Antisymmetrische magnetische Wechselwirkungen in Festkörpern führen zu einer Fülle neuer Phänomene und Anwendungen.

Christian Pfleiderer

Die Spin-Bahn-Kopplung ist ein relativistischer Effekt, der in Festkörpern ohne Inversionszentrum zu antisymmetrischen magnetischen Wechselwirkungen führt. Diese geben Anlass zu komplexen räumlichen Strukturen der Magnetisierung, deren Untersuchung ein neues Teilgebiet der Festkörperphysik definiert.

In der Natur besitzen viele Objekte oder Vorgänge, beispielsweise Schneckenhäuser, Wasserwirbel oder Haarwuchs eine besondere Symmetrie, die als Händigkeit oder Chiralität bekannt ist (Abb. 1). Gemäß der Definition von Lord Kelvin ist etwas chiral, wenn sich das Spiegelbild nicht durch einfache Drehungen und Verschiebungen auf das Original abbilden lässt. Ein bekanntes Beispiel auf der molekularen Ebene ist die Wendeltreppenstruktur der Desoxyribonukleinsäure (DNS). Die Spiralarme der Milchstraße zeigen, dass dieses Phänomen auch bei gigantischen Strukturen in der Natur auftritt. Im Mikrokosmos hingegen hängt die Paritätsverletzung der schwachen Wechselwirkung mit der Chiralität der Neutrinos zusammen.

Daneben zeichnet sich immer mehr auch der Einfluss fehlender Inversionssymmetrie und Chiralität auf die magnetischen Eigenschaften von Festkörpern ab. Diese sind seit knapp zweihundert Jahren von großem technologischen Interesse, angefangen bei den ersten Generatoren und Elektromotoren zu Zeiten der industriellen Revolution über Sensoren und Relais bis zu modernen Speichermedien in der Datenverarbeitung. Parallel dazu sind sie eine Spielwiese für die Entwicklung theoretischer Modelle, angefangen von den Zusammenhängen zwischen E- und B-Feldern über magnetische Wechselwirkungen bis zu Konzepten in der Quantenfeldtheorie. Dieses Interesse setzt sich bei den antisymmetrischen, im Besonderen chiralen, magnetischen Wechselwirkungen fort.

Die wichtigsten Ursachen für Magnetismus in Festkörpern sind der Spin und die Bahnbewegung der Elektronen. Seit langem weiß man, dass die Orientierung der magnetischen Momente im Festkörper, d. h. die magnetische Anisotropie, das Ergebnis der Kopplung zwischen Elektronenspin und Bahnbewegung im Rahmen der Speziellen Relativitätstheorie ist. Die Spin-Bahn-Kopplung kann zudem zu antisymmetrischen Komponenten der Wechselwirkungen und elektronischen Eigenschaften führen, wenn die Anordnung der Atome im Festkörper lokal kein Inversionszentrum



Abb. 1 Haarwirbel sind nur eins von vielen in der Natur vorkommenden „chiralen“ Objekten und Vorgängen, deren Spiegelbild nicht dem Original entspricht.

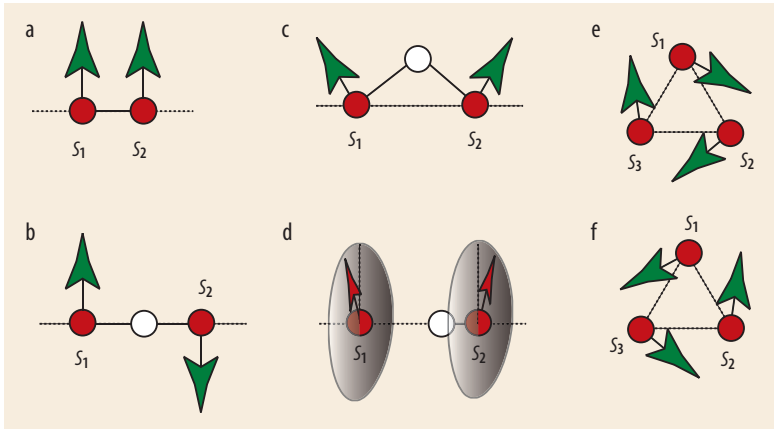
besitzt. Die Bedeutung dieser Effekte wurde lange unterschätzt, da sie in der Regel viel schwächer sind als die normale Austauschwechselwirkung. Da aber alle Oberflächen und viele Grenzflächen kein Inversionszentrum aufweisen und 65 der 230 kristallographischen Raumgruppen sogar Chiralität besitzen, sind sie weit verbreitet. In den letzten Jahren hat man eine Fülle neuartiger Phänomene beobachtet, die eine Vielzahl innovativer Anwendungen versprechen.

So gehört zu den jüngsten Entdeckungen eine neue Form magnetischer Ordnung, deren erstes Beispiel Gitter von Spinwirbeln sind [1–3]. In multiferroischen Materialien sind antisymmetrische magnetische Wechselwirkungen ein wichtiger Kopplungsmechanismus. Dieser erlaubt es beispielsweise, mit einem äußeren elektrischen Feld das Vorzeichen antisymmetrischer

## KOMPAKT

- Die Spin-Bahn-Kopplung führt in Systemen ohne Inversionssymmetrie zu antisymmetrischen magnetischen Wechselwirkungen.
- Da fast ein Drittel der kristallographischen Raumgruppen chiral ist und Ober- und Grenzflächen keine Inversionssymmetrie besitzen, gibt es sehr viele Systeme, in denen antisymmetrische magnetische Wechselwirkungen auftreten.
- Skyrmionengitter, multiferroische Effekte und modulierte Spintexturen in dünnen Schichten sind prominente Beispiele, die durch antisymmetrische Spin-Wechselwirkungen zu Stande kommen und große Potenziale für Anwendungen besitzen.

Prof. Dr. Christian Pfleiderer, Physik Department E 21, TU München, James-Frank-Straße, 85748 Garching



**Abb. 2** Zu den magnetischen Wechselwirkungen gehören der direkte Austausch (a) und der symmetrische Superaustausch (b). Rote Kreise symbolisieren magnetische Atome oder Orbitalgruppen. In der antisymmetrischen Dzyaloshinsky-Moriya-Wechselwirkung sind die Momente in Richtung der Verbindungsline verkippt bzw. senkrecht dazu (c, d). Wenn die Anordnung der Atome zu Chiralität führt, ist das System homochiral. Bei Verkantung aufgrund geometrischer Frustration in zentrosymmetrischen Systemen sind positive und negative Chiralität entartet, das System ist heterochiral (e, f).

Wechselwirkungen umzuschalten oder mit einem magnetischen Feld die optischen Eigenschaften zu ändern [4–6]. Schließlich beeinflussen sie an Ober- und Grenzflächen die dort auftretenden Spinstrukturen [7, 8]. Letzteres ist insbesondere für magnetische Dünnschichtsysteme und im Nanomagnetismus von Bedeutung.

### Antisymmetrische Wechselwirkungen

Praktisch alle Formen magnetischer Ordnung in Festkörpern entstehen aus einer Kombination von Coulomb-Abstoßung und quantenmechanischem Platztausch der Elektronen. Diese Austauschwechselwirkungen hängen empfindlich von der Lage der beteiligten Atomorbitale und der Spin-Bahn-Wechselwirkung ab. Man unterscheidet insbesondere, ob die Orbitale bzw. Atompositionen bezüglich der Verbindungslinie zwischen den beteiligten Atomen symmetrisch oder asymmetrisch angeordnet sind.

Für eine symmetrische Anordnung direkt überlappender Orbitale haben Dirac und Heisenberg bereits in den 1920er-Jahren gezeigt, dass sich die elektrostatische Wechselwirkung als Skalarprodukt  $J \mathbf{S}_1 \cdot \mathbf{S}_2$  der magnetischen Momente  $\mathbf{S}_1$  und  $\mathbf{S}_2$  schreiben lässt,  $J$  ist eine materialspezifische Konstante. Diese Wechselwirkung führt zu einer kollinearen, d. h. parallelen bzw. antiparallelen Ausrichtung der magnetischen Momente sofern, wie nachfolgend erörtert, keine konkurrierenden Wechselwirkungen auftreten (Abb. 2a). In der Mitte des letzten Jahrhunderts führten Kramers und Anderson den Nachweis, dass die einfache Form der Wechselwirkung  $J \mathbf{S}_1 \cdot \mathbf{S}_2$  auch dann gilt, wenn sich zwischen den magnetischen Atomen „nichtmagnetische“ befinden. Da die Austauschwechselwirkung dann über große Distanzen vermittelt wird, spricht man vom „Superaustausch“ (Abb. 2b). In realen Materialien ist er die weitaus häufigste Ursache für magnetische Ordnung.

Ein Jahrzehnt später erkannten Dzyaloshinsky und Moriya, dass außerdem eine Form der Superaustausch-Wechselwirkung existiert, bei der asymmetrisch angeordnete Orbitale zwischen den Atomen die gleiche Rolle spielen wie die nichtmagnetischen Atome im normalen Superaustausch [9]. Aufgrund der Spin-Bahn-Kopplung wird dies durch das Kreuzprodukt  $\mathbf{D} \cdot (\mathbf{S}_1 \times \mathbf{S}_2)$  mit dem materialspezifischen Vektor  $\mathbf{D}$  beschrieben. Die asymmetrischen Beiträge zum Austausch favorisieren also eine Senkrechtstellung der Momente. Da eine antisymmetrische Anordnung nur für höherliegende Atomorbitale möglich ist, tritt diese Dzyaloshinsky-Moriya-Wechselwirkung (DM) immer zusätzlich zum normalen (symmetrischen) Austausch auf und ist zudem schwächer (Abb. 2c, d).

Betrachtet man die Austauschwechselwirkung unter einer Spiegelung ( $\mathbf{r} \rightarrow -\mathbf{r}$ ), so ergibt sich für die symmetrischen Komponenten kein Vorzeichenwechsel – sie sind nicht chiral –, für die antisymmetrischen Komponenten dagegen schon. Je nach Anordnung der Atomorbitale sind solche Systeme homochiral. Im Vergleich dazu kann auch das Verkanten von magnetischen Momenten in geometrisch frustrierten Systemen mit Zentrosymmetrie Chiralität besitzen

### CHIRALITÄT UND FELDTHEORIEN

Die Festkörperphysik mit antisymmetrischen magnetischen Wechselwirkungen besitzt modellhaften Charakter für Feldtheorien allgemeiner Art. Kurz nach der Geburtsstunde der Ginzburg-Landau-Theorien von Ordnungsphänomenen hatte Lifshitz antisymmetrische lineare Gradiententerme im Ordnungsparameterfeld ausgeschlossen, da sie energetisch inhomogene Zustände erzeugen. In der Magnetisierung lassen sich diese Terme wie folgt ausdrücken:

$$L_{ij}^{(k)} = m_i \partial_k m_j - m_j \partial_k m_i,$$

wobei  $i, j$  und  $k$  die Indizes der kartesischen Koordinaten sind. Dzyaloshinsky

erkannte, dass diese sog. Lifshitz-Invarianten inhomogene Ordnungszustände der kondensierten Materie allgemeiner Art beschreiben [11]. Beispiele sind inkommensurable Formen struktureller und magnetischer Ordnung und flüssigkristalline Zustände. Chirale magnetische Wechselwirkungen sind nur ein Beispiel für solche Lifshitz-Invarianten.

In den 1950er-Jahren hatte Heisenberg vorgeschlagen, eine einheitliche Quantenfeldtheorie der Elementarteilchen anhand teilchenartiger Lösungen effektiver klassischer Feldgleichungen zu konstruieren. Diese sollten dann

durch entsprechende Regeln quantisiert werden [12]. Der englische Physiker Tony Skyrme zeigte 1961, dass man im Rahmen bestimmter nichtlinearer Feldtheorien Protonen und Neutronen als teilchenartige Knoten von Pionfeldern deuten kann [13]. Teilchenartige Zustände in Feldtheorien, wie sie z. B. bei der Beschreibung von Quanten-Hall-Systemen und Flüssigkristallen vorkommen, erhielten daraufhin seinen Namen.

Im Vergleich zum Skyrme-Modell ermöglichen Feldtheorien mit antisymmetrischen Wechselwirkungstermen eine elegante Darstellung stabiler teilchenartiger Feldkonfigurationen [10].

(Abb. 2e, f). Allerdings ist diese dann entartet, sodass die Systeme im Gegensatz zu den hier diskutierten Phänomenen heterochiral sind.

Während die symmetrischen Anteile der Austauschwechselwirkung in Abwesenheit von Frustration zu einer strikt kollinearen ferro- oder antiferromagnetischen Ordnung führen, resultiert die antisymmetrische Wechselwirkung je nach Anordnung der Atome bzw. Orbitalgruppen in einem Verkanten oder Verdrehen der magnetischen Momente. Dies tritt beispielsweise in Hämatit, MnSi oder TbMnO<sub>3</sub> auf (Abb. 3). Da die antisymmetrische Wechselwirkung schwächer ist als die symmetrische, treten die Verkippungen und Rotationen auf einer größeren Längenskala auf als eine rein ferro- oder antiferromagnetische Ordnung durch die symmetrischen Wechselwirkungen.

### Gitter aus Spinwirbeln

Seit langem sind neben Ferro- und Antiferromagnetismus verschiedene Formen der magnetischen Ordnung bekannt, in denen die magnetischen Momente verkippert oder verdreht sind. Bereits 1989 hatte der ukrainische Theoretiker Alexey Bogdanov jedoch für anisotrope chirale Magnete eine neue Form der Ordnung vorhergesagt, die aus einem Gitter von Spinwirbeln besteht [10] (Abb. 4a). Diese werden nach dem englischen Teilchenphysiker Tony Skyrme als Skyrmionen bezeichnet. Skyrme hatte nämlich gezeigt, dass sich lokalisierte Lösungen nichtlinearer Quantenfeldtheorien als Elementarteilchen interpretieren lassen (Infokasten).

Der experimentelle Nachweis von Skyrmionengittern in chiralen Magneten gelang uns kürzlich in Zusammenarbeit mit der Gruppe von Achim Rosch an der Universität zu Köln. Dazu untersuchten wir die metallische Verbindung MnSi und den dotierten Halbleiter Fe<sub>1-x</sub>Co<sub>x</sub>Si mittels Neutronenstreuung am Diffraktometer MIRA an der Forschungsneutronenquelle Heinz-Maier-Leibnitz (FRM II) der TU München [1, 2]. Von beiden Verbindungen hatte Bogdanov angenommen, dass sie aufgrund ihrer kubischen Struktur keine Skyrmionengitter ausbilden können. Beide Substanzen zeigen ohne äußeres Magnetfeld einen Phasenübergang von einem Para- zu einem Helimagneten, d. h.

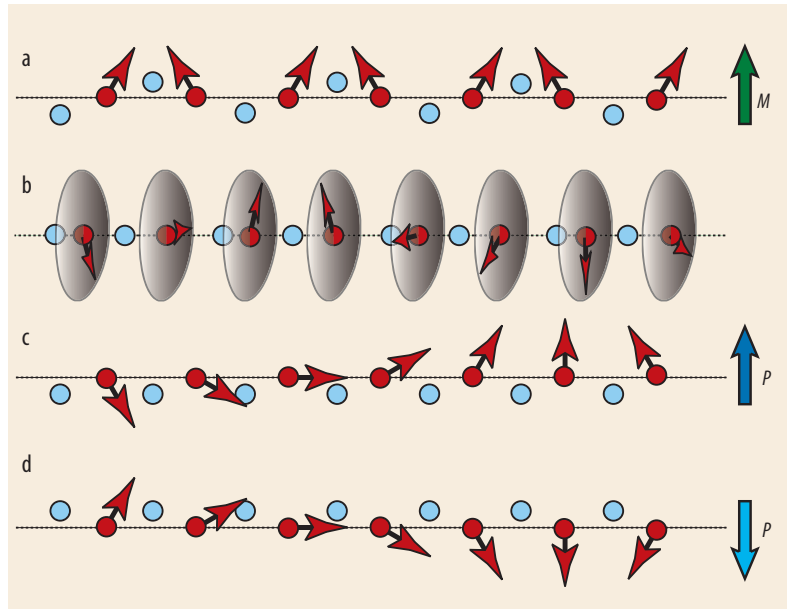


Abb. 3 Die Dzyaloshinsky-Moriya-Wechselwirkung kann unterschiedliche Folgen für Spinstrukturen haben (rote Kreise symbolisieren magnetische, die hellblauen nicht-magnetische Atome bzw. Orbitalgruppen): Die magnetischen Momente können verkanten, sodass es zu schwachem Ferromagnetismus

kommt (a) oder einer helikalen Modulation einer ferromagnetischen Ordnung (b). Eine zykloide Spinstruktur bewirkt zusätzlich eine ferroelektrische Polarisation *P* (c). Die Richtung der Zykloide dreht sich bei Umkehr der elektrischen Polarisation um (d). Eine Helix ist übrigens chiral, eine Zykloide dagegen nicht.

einer wendeltreppenartigen Anordnung der magnetischen Momente wie bei der DNS (Abb. 3b). In einem kleinen äußeren Magnetfeld unterhalb der helimagnetischen Ordnungstemperatur bilden sich die Skyrmionengitter als neue Phase, die durch thermische Fluktuationen stabilisiert wird.

Wie bei den Flussfäden in einem Typ-2-Supraleiter durchdringen die Skyrmionen dabei den ganzen Kristall. Diese Analogie führt sogar noch etwas weiter: Genau wie bei einem Flussliniengitter in einem Supraleiter bilden sich die Spinwirbel nämlich in einem äußeren Magnetfeld immer parallel zu diesem – unabhängig von der Orientierung des Kristalls. Das Neutronendiffraktogramm des Skyrmionengitters zeichnet sich dementsprechend senkrecht zum Magnetfeld immer durch eine sechszählige Symmetrie aus (Abb. 4b).

Um zu erklären, inwiefern die Skyrmionengitter ein erstes Beispiel für eine neue Form magnetischer

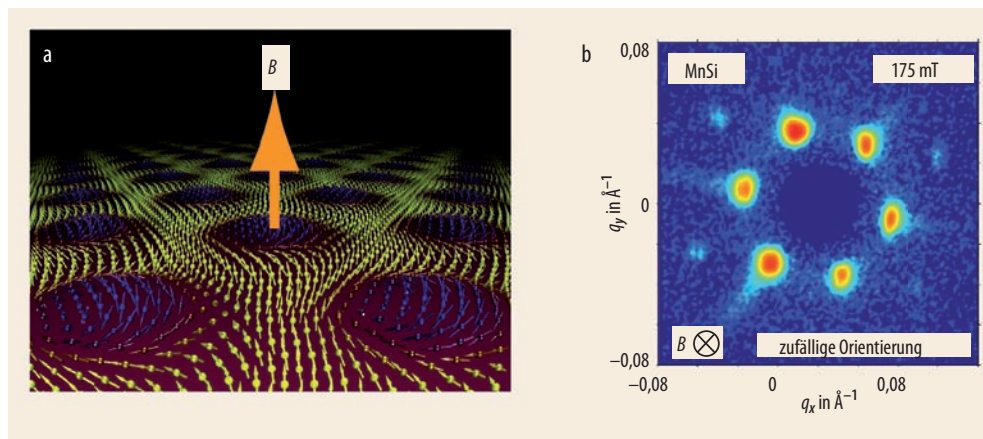


Abb. 4 Wenn das Magnetfeld senkrecht auf der Probenoberfläche steht, bilden die Spins ein Skyrmionengitter (a). Das Neutronendiffraktogramm des Skyrmionengitters in MnSi (b) zeigt, dass man parallel zum Magnetfeld immer ein sechszähliges Streubild unabhängig von der kristallographischen Orientierung der Probe beobachtet [1]. (Die Neutronenzählrate steigt von blau über gelb nach rot.)

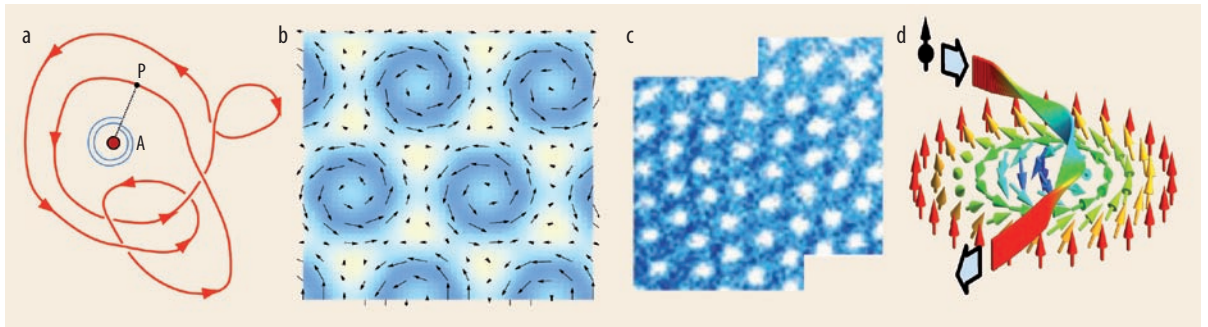


Abb. 5 Bei dem gezeigten geschlossenen Pfad (rot) ergibt sich eine topologische Windungszahl (blau) von  $\Phi=+2$  (a). Betrachtet man ein Skyrmionengitter in Richtung des Magnetfelds, dann

ergibt sich über eine magnetische Einheitszelle (blau bis gelb:  $-2 \leq \varphi \leq 0,5$ ) integriert eine verallgemeinerte Windungszahl  $\Phi=-1$  [1] (b). Im Transmissions-

Skyrmionen in  $\text{Fe}_{0,5}\text{Co}_{0,5}\text{Si}$  [3] (bei 50 mT) als weiße Punkte (c). Ein Elektron wird abgelenkt (d, farbiges Band), wenn sein Spin der Magnetisierungsrichtung in einem Skyrmion folgt [14].

Ordnung sind, betrachtet man die Windungszahl  $\Phi$ . Diese ist ein Begriff aus der Topologie, der sich am einfachsten anhand eines Betrachters A und eines Pfads illustrieren lässt (Abb. 5a): Folgt die Sichtlinie des Betrachters einem solchen Pfad ab einem Anfangspunkt P in eine gegebene Richtung, bis der Betrachter wieder in die Ausgangsrichtung blickt, so entspricht die Anzahl der Umdrehungen, die der Betrachter dabei um die eigene Achse machen musste, der Windungszahl  $\Phi$ . Sie ist positiv für Umdrehungen entgegen dem Uhrzeigersinn. Für den Betrachter ist somit  $\Phi = +2$ .

In einer Spinstruktur kann man für Richtungsänderungen der Magnetisierung ebenfalls eine (verallgemeinerte) Windungszahl definieren, die sich aus der Windungszahldichte  $\varphi^n$ , also der Verkipfung pro Raumbereich, durch Integration über die magnetische Einheitszelle ergibt. Für alle bisher bekannten Formen der magnetischen Ordnung verschwindet die Windungszahl, d. h.  $\Phi = 0$ . Dies trifft insbesondere auf frustrierte Magnete zu, in denen beide Chiralitäten, wie oben erwähnt, entartet vorkommen. Dagegen ist die Windungszahl pro magnetischer Einheitszelle im Skyrmionengitter quantisiert und immer gleich.

Für die Spinstruktur aus Abb. 4a, b ist  $\Phi = -1$ , obwohl die Skyrmionendichte in der magnetischen Einheitszelle positive und negative Anteile besitzt, wie Abb. 5b zeigt. Die magnetische Ordnung besteht also darin, dass topologisch stabile Wirbel – die Skyrmionen – in einem zweidimensionalen Gitter angeordnet sind. Man sagt auch, die Skyrmionen besitzen „teilchenartigen Charakter“. Kürzlich gelang in  $\text{Fe}_{0,5}\text{Co}_{0,5}\text{Si}$  sogar ein besonders eindrucksvoller Nachweis mithilfe der Trans-

missionselektronenmikroskopie, wobei sogar individuelle Skyrmionen beobachtet wurden [3] (Abb. 5c).

Experimentell lässt sich die verallgemeinerte Windungszahl des Skyrmionengitters elegant durch die elektrischen Transporteigenschaften nachweisen [2]. Bewegt sich nämlich ein Elektron durch eine magnetische Struktur, so präzediert sein Spin um die sich langsam ändernde Richtung des lokalen Magnetfelds. Dies führt zu einer Änderung des quantenmechanischen Zustands des Elektrons, der sich in der Berry-Phase ausdrückt. Klassisch entspricht diese dem Raumwinkel der Orientierungsänderung eines kartesischen Koordinatensystems, wenn es entlang eines geschlossenen Pfads auf einer gekrümmten Fläche bewegt wird und zwei Achsen des Koordinatensystems stets tangential zur Fläche stehen.

In konventionellen Magneten ist die topologische Windungszahl pro magnetischer Einheitszelle null, sodass sich die Berry-Phase zu null mittelt. Im Skyrmionengitter ist die Berry-Phase pro magnetischer Einheitszelle hingegen endlich und quantisiert. Nun kann man die Berry-Phase formal als eine Aharonov-Bohm-Phase in einem uniformen Magnetfeld ausdrücken. Je nach Skyrmionengitter betragen diese Feldwerte viele Tesla. Diese Überlegung zeigt, dass die endliche Berry-Phase eine Ablenkung des Elektrons erzeugt (Abb. 5d) [14]. Sichtbar wird die Ablenkung, da das Elektron eine elektrische Ladung trägt und somit senkrecht zur Stromrichtung eine Spannung auftritt – der „topologische Hall-Effekt“.

Skyrmionengitter in chiralen Magneten haben das Potenzial für verschiedene neue Anwendungen sowie Lösungen aktueller technischer Probleme. So erlaubt der topologische Hall-Effekt für die Feldstärken, in denen das Skyrmionengitter stabilisiert wird, also im Bereich von einigen 10 bis einigen 100 mT, die Konstruktion eines eleganten Feldsensors. Weiter führt die Impulsänderung der Elektronen bei der Ablenkung (Abb. 5d) zu einer Verschiebung der Skyrmionen, die wir kürzlich direkt gemessen haben. Solche strominduzierten Änderungen der magnetischen Eigenschaften sind unter dem Begriff „spin-torque“ bekannt. Allerdings treten diese Effekte in Skyrmionengittern bereits bei Stromdichten auf, die über fünf Größenordnungen

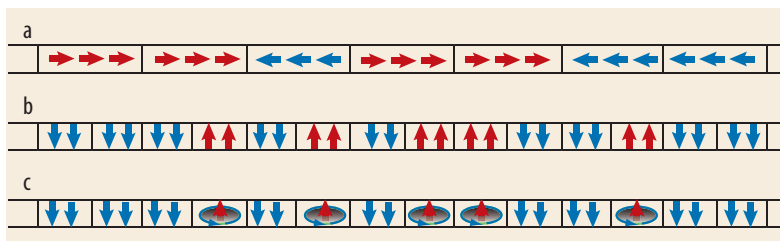


Abb. 6 Im Gegensatz zum üblichen Längsaufzeichnen bei magnetischen Datenträgern (a) erlaubt das Senkrechtauf-

zeichnen eine wesentlich höhere Datendichte (b). Skyrmionen könnten dabei die Stabilität der Bits erhöhen (c).

kleiner sind als alle bisher in der Literatur berichteten Spin-Torque-Effekte [15].

Schließlich implizieren die topologischen Eigenschaften der Skyrmionen eine hohe Stabilität gegen äußere Störeinflüsse. Dies lässt sich im Prinzip zur Erhöhung der Packungsdichte bei Speichermedien nutzen. Einerseits könnten Skyrmionen zu einer Renaissance der Magnetblasenspeicher führen, da sie qualitativ kleine, sehr stabile Blasendomänen darstellen. Andererseits bieten sie eine Alternative bei Speichermedien, die momentan auf dem Längsmagnetisieren beruhen (Abb. 6a). Zur Erhöhung der Packungsdichte gibt es gegenwärtig große Bemühungen, das so genannte Senkrechtaufzeichnen zu nutzen (Abb. 6b). Dabei richtet man die magnetischen Bits nicht parallel zur Rotationsrichtung eines Datenträgers, sondern senkrecht dazu aus. Allerdings führt der superparamagnetische Effekt zu Datenverlusten durch die Streufelder benachbarter Bits, was man gegenwärtig mit komplizierten Vielschichtsystemen vermeiden muss. Hier könnten Skyrmionen prinzipiell große Vorteile bieten, da die Magnetisierung in ihren Zentren immer senkrecht zur Oberfläche steht und die topologischen Eigenschaften sie gegen Störeinflüsse schützen (Abb. 6c).

### Ferroische Eigenschaften

Neben den gerade beschriebenen neuen Formen magnetischer Ordnung können antisymmetrische magnetische Wechselwirkungen auch ferroische Materialeigenschaften wie Ferromagnetismus, Ferroelektrizität oder Ferroelastizität effizient koppeln. Beispielsweise wurde vor kurzem die Abhängigkeit der magnetischen Ordnung vom ferroelektrischen Zustand in  $\text{TbMnO}_3$  mittels polarisierter Neutronenstreuung nachgewiesen [4]. Die Gitterstruktur dieser Substanz hat die volle Inversionssymmetrie. Unterhalb von  $T_{N1} = 42 \text{ K}$  tritt eine inkommensurable antiferromagnetische Ordnung aufgrund frustrierter Wechselwirkungen auf, gefolgt von einem Übergang zu einer zykloidalen Spinordnung unterhalb  $T_{N2} = 27 \text{ K}$ . Diese zykloidale Ordnung

induziert wiederum eine ferroelektrische Ordnung. Das damit verbundene spontane, intrinsische E-Feld bricht die Inversionssymmetrie, weshalb man als Ursache der Zykloide von einer *inversen* Dzyaloshinsky-Moriya-Wechselwirkung spricht. Kühlt man  $\text{TbMnO}_3$  nun in einem äußeren elektrischen Feld, lässt sich ein eindomäniger ferroelektrischer Zustand erzeugen (Abb. 3c, d), der das Vorzeichen der antisymmetrischen magnetischen Wechselwirkung eindeutig festlegt.

Ein analoges Beispiel sind die optischen Eigenschaften polarer magnetischer Multiferroika. Bei der natürlichen optischen Aktivität dreht ein chirales Medium die Polarisationsrichtung des Lichts, während bei der „magnetischen Aktivität“ B-Felder oder eine magnetische Ordnung dafür verantwortlich sind. Vor einigen Jahren wurden magneto chirale Effekte zunächst theoretisch beschrieben und dann experimentell nachgewiesen [5]. Die Ausbreitung von Licht hängt dabei von der Richtung ab, d. h. bei der Umkehrung des Wellenvektors ändern sich die optischen Eigenschaften. Man sagt, die Lichtausbreitung ist „nicht reziprok“. Kehrt man aber sowohl Wellenvektor als auch Orientierung der magnetischen Flussdichte um, bleibt die dielektrische Konstante invariant. In einem ferroelektrischen Medium lässt sich die Chiralität demnach durch Wechseln der Polarität schalten. Dabei kehrt sich das Vorzeichen des magneto chiralen Effekts um. Andererseits hängt er nicht von der Polarisation des Lichts ab. Analoge magneto elektrische optische Effekte wurden kürzlich an multiferroischen polaren Magneten nachgewiesen [6].

In Festkörpern sind diese Effekte gerade in solchen Frequenzbereichen besonders groß und interessant, in denen optische Übergänge mit elektronischen Zuständen verbunden sind, die auch für die ferroelektrische und magnetische Ordnung verantwortlich sind. Die bisher bekannten magneto elektrischen Effekte von Volumenkristallen sind dabei jedoch für praktische Anwendungen, wie magnetfeldgesteuerte optische Polarisatoren, zu klein. Daher versucht man, durch Vielfachstreuung und Vielfachinterferenz in periodisch strukturierten Medien den magneto chiralen optischen Effekt zu verstärken.

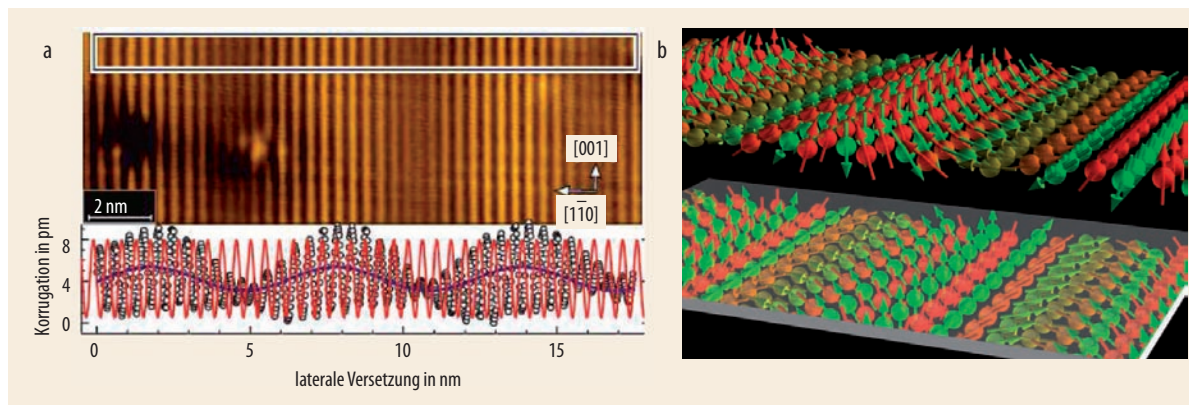


Abb. 7 Bei der spinempfindlichen Rastertunnelmikroskopie einer einatomaren Mn-Schicht auf einem W-Substrat treten

langsame und schnelle Intensitätsschwankungen auf (a) [8]. Durch die fehlende Inversionssymmetrie der

Grenzfläche zum Wolfram entsteht eine zykloidale Spinstruktur des Mangans (b).

## Vom Volumen zu Flächen

Wie lassen sich in Volumenkristallen beobachtete Skymionengitter oder multiferroische Kopplungen in Anwendungen mit dünnen Schichten und nano-strukturierten Systemen nutzen? Tatsächlich sind antisymmetrische Kopplungen prinzipiell an Oberflächen (und den meisten Grenzflächen) weit verbreitet, da diese keine Inversionssymmetrie besitzen. Da sich Oberflächen durch eine Änderung des elektrischen Potentials auszeichnen, findet die Bewegung von Elektronen entlang einer Oberfläche immer senkrecht zu einem elektrischen Feld statt. In dünnen magnetischen Schichten kann die resultierende Spin-Bahn-Kopplung, die neben den üblichen symmetrischen Austauschkopplungen auftritt, zu einem antisymmetrischen Superaustausch führen. Formal und phänomenologisch handelt es sich dabei um die DM-Wechselwirkung.

Erst kürzlich gelang es mittels spinempfindlicher Tunnelspektroskopie an einer einatomaren Mangan-schicht auf einem 110-orientierten Wolframsubstrat, eine entsprechende magnetische Struktur nachzuweisen [8]. Dabei führt der symmetrische Austausch in der Mn-Schicht zu einer antiferromagnetischen Grundordnung des Mangan. Zudem identifiziert das Wolframsubstrat einen antisymmetrischen Austausch aufgrund der starken Spin-Bahn-Kopplung. In der spin-empfindlichen Rastertunnelmikroskopie zeigt sich eine Korrugation des Tunnelstroms, die aus einer schnellen und einer langsamen Variation besteht (Abb. 7a). Während die schnelle Variation von der antiferromagnetischen Grundordnung stammt, ist die Ursache der langsamen Variation eine magnetische Überstruktur. Bedeutende Fortschritte in Ab-initio-Dichtefunktionalrechnungen zeigten schließlich quantitativ, dass es sich bei der magnetischen Überstruktur um eine Zyklode handelt, die aufgrund der fehlenden Inversionssymmetrie der Oberfläche auftritt (Abb. 7b).

Die Entdeckung von antisymmetrischen Spinwechselwirkungen in dünnen magnetischen Schichten stellt viele der weitverbreiteten Annahmen über die magnetische Ordnung an Ober- und Grenzflächen in Frage. Dies gilt besonders für oberflächendominierte Systeme wie magnetische Nanostrukturen. Die aktuelle Forschung beschäftigt sich dabei unter anderem mit der gezielten Suche nach multiferroischen Effekten sowie komplexen topologischen Strukturen wie den Skymionengittern.

## Diversität durch Drehsinn

Festkörpersysteme ohne Inversionssymmetrie wurden lange als kompliziert und randständig betrachtet. Beim Magnetismus erschließen sich seit einigen Jahren ihre enormen Potenziale durch neue experimentelle Untersuchungstechniken wie spinempfindliche Rastertunnelmikroskopie, Lorentz-Transmissionselektronenmikroskopie, spinpolarisierte Neutronenstreuung und nicht zuletzt neue Verfahren der Materialsynthese.

Die enorme Fülle an neuen Phänomenen unterstreicht die große Spannweite des Magnetismus mit Drehsinn. Zu nennen wären noch die Konsequenzen der Spin-Bahn-Kopplung für die elektronische Bandstruktur, wie die Rashba-Aufspaltung in zweidimensionalen Elektronengasen, Supraleitung in nicht-zentrosymmetrischen Schwer-Fermionen-Verbindungen [16], Nicht-Fermi-Flüssigkeitsverhalten [17] und topologische Isolatoren [18, 19]. Für künftige Arbeiten verspricht gerade der interdisziplinäre Gedankenaustausch weitere wegweisende Entdeckungen.

### Literatur

- [1] S. Mühlbauer et al., *Science* **323**, 915 (2009); W. Münzer et al., *Phys. Rev. B* (R) **81**, 041203 (2010)
- [2] A. Neubauer et al., *Phys. Rev. Lett.* **102**, 186602 (2009)
- [3] X. Z. Yu et al., *Nature* **465**, 901 (2010)
- [4] Y. Yamasaki et al., *Phys. Rev. Lett.* **98**, 147204 (2007)
- [5] G. L. J. A. Rikken und E. Raupach, *Nature* **390**, 493 (1997); L. D. Barron, *Nature* **405**, 895 (2000); C. Koerdt et al., *Phys. Rev. Lett.* **91**, 073902 (2003)
- [6] J. H. Jung et al., *Phys. Rev. Lett.* **93**, 037403 (2004)
- [7] M. Heide et al., *Spin-Orbit Driven Physics at Surfaces*; (2006) ([http://psik.dl.ac.uk/newsletters/News\\_78/Highlight\\_78.pdf](http://psik.dl.ac.uk/newsletters/News_78/Highlight_78.pdf))
- [8] M. Bode et al., *Nature* **447**, 190 (2007)
- [9] I. E. Dzyaloshinskii, *Sov. Phys. JETP* **19**, 960 (1964); T. Moriya, *Phys. Rev.* **120**, 91 (1960); T. Moriya, *Weak Ferromagnetism*, in: G. T. Rado und H. Suhl (Hrsg.), *Magnetism*, Bd. 1, Academic Press, New York and London (1963)
- [10] A. N. Bogdanov und D. A. Yablonskii, *Sov. Phys. JETP* **68**, 101 (1989)
- [11] L. D. Landau und E. M. Lifshitz, *Course of Theoretical Physics*, Bd. 5, *Statistical Physics*, Pergamon Press (1980)
- [12] W. Heisenberg, *Rev. Mod. Phys.* **29**, 269 (1957)
- [13] T. H. Skyrme, *Proc. R. Soc. Lond. Ser. A* **260**, 127 (1961)
- [14] C. Pfleiderer und A. Rosch, *Nature* **465**, 880 (2010)
- [15] F. Jonietz, S. Mühlbauer, C. Pfleiderer, A. Neubauer, W. Münzer, A. Bauer, T. Adams, R. Georgii, P. Böni, R. Duine, K. Everschorr, M. Garst und A. Rosch, unveröffentlicht (2010)
- [16] E. Bauer et al., *Phys. Rev. Lett.* **92**, 027003 (2004)
- [17] C. Pfleiderer et al., *Nature* **414**, 427 (2001); C. Pfleiderer et al., *Nature* **427**, 227 (2004); C. Pfleiderer et al., *Science* **316**, 1871 (2007)
- [18] D. Hsieh et al., *Science* **323**, 919 (2009)
- [19] M. König et al., *Science* **318** 766 (2007)

### DER AUTOR

**Christian Pfleiderer** (FV Tiefe Temperaturen) studierte Physik in Tübingen und Denver. Stipendien der EU, der Studienstiftung des deutschen Volkes und des britischen Research Councils ermöglichten ihm die Promotion an der University of Cambridge. Dieser folgten Tätigkeiten am CEA Grenoble und am heutigen Karlsruher Institut für Technologie. 2004 erhielt er einen Ruf an die TU München, im selben Jahr zeichnete ihn die Heidelberger Akademie der Wissenschaften für seine experimentellen Untersuchungen von Quantenphasenübergängen aus. Der Festkörperphysiker engagiert sich unter anderem als Vorsitzender der integrierten Graduiertenschule des SFBs Transregio 80 und als stellvertretender Vorsitzender des Komitees für Forschung mit Neutronen (KFN).

