

# Let's twist again

Getwistete magnetische Strukturen lassen sich gezielt erzeugen und für zukünftige Anwendungen in der Spintronik einsetzen.

Karin Everschor-Sitte

Das Feld der Skyrmionics, also Spintronik mit topologisch stabilisierten magnetischen Wirbeln, hat sich in den letzten Jahren rasant entwickelt. Skyrmionen lassen sich auf verschiedene Arten erzeugen, manipulieren, bewegen und vernichten, was sie als Datenspeicher nützlich macht. Zudem sorgen ihre Twists für eine interessante Magnetisierungsdynamik.

Let's Twist Again war Anfang der 60er-Jahre ein großer Hit von Chubby Checker. Das Lied spielt auf den legendären Twist-Tanz an, bei dem man pantomimisch mit den Fußballen Zigarettenkippen ausdrückt und sich gleichzeitig mit einem Handtuch den Rücken abrubbelt. Etwa zur gleichen Zeit befasste sich Tony Skyrme mit einem anderen Twist: Er schlug vor, dass sich die Stabilität z. B. von Protonen dadurch erklären ließe, dass man sie als teilchenartige topologische Wirbel in Quantenvektorfeldern betrachtet [1]. Um 1965 stellte sich heraus, dass Protonen aus Quarks bestehen, weshalb Skyrms Theorie in der Teilchenphysik in den Hintergrund geriet. Sein mathematisches Konzept der topologisch stabilen Wirbel in nichtlinearen Feldtheorien findet jedoch in vielen anderen Bereichen der Physik erfolgreich Anwendung, beispielsweise in Quanten-Hall-Systemen, Flüssigkristall-Phasen, Bose-Einstein-Kondensaten und dem Magnetismus. Entsprechend des Entdeckers sind diese teilchenartigen Wirbel als Skyrmionen bekannt.

Im Magnetismus hat das Feld der „Skyrmionics“ (d. h. der Spintronik mit Skyrmionen) in den letzten Jahren großes Aufsehen erregt und sich zu einem aktiven und hochaktuellen Forschungsthema entwickelt. In vielen Ferromagneten sieht die Magnetisierung oft unspektakulär aus, da im Wesentlichen alle magnetischen Momente in die gleiche Richtung ausgerichtet sind. Gegebenenfalls gibt es ferromagnetische Bereiche (Domänen), die durch Domänenwände getrennt sind. Anders ist dies in magnetischen Systemen mit konkurrierenden Wechselwirkungen, die unterschiedliche Ausrichtungen der Magnetisierung bevorzugen. Dort können beliebig komplizierte magnetische Strukturen auftreten, also verschiedene Anordnungen der magnetischen Momente, auch Skyrmionen (Abb. 1).

Eine solche Konfiguration entsteht ganz anschaulich: So wie sich ein eingerollter Igel öffnet, ergibt sich ein Skyrmion aus einer Projektion eines magnetischen



Abb. 1 Ein Skyrmion (unten) ist ein magnetischer Wirbel. Die Variation seines azimutalen Winkels erinnert an einen fliegenden Tellerrock beim Twist.

Monopols auf die Ebene (Abb. 2). Somit weisen magnetische Skyrmionen einen topologisch nichttrivialen Twist auf. Analog zu einem Knoten in einem Seil, dessen Enden man festhält und der nicht durch stetige Verformung des Seils zu entwirren ist, lässt sich auch ein solcher magnetischer Knoten nicht einfach entwirren, d. h. zur ferromagnetischen Anordnung entwirren. Der zugehörige topologische Index, der die topologischen Eigenschaften der magnetischen Anordnung angibt, ist gegeben durch die Windungszahl

## KOMPAKT

- Magnetische Skyrmionen besitzen Potenzial für verschiedene Anwendungen in der Spintronik.
- Kontrollierte Erzeugung, Manipulation und Löschen von Skyrmionen sind notwendige Operationen für Speicher- und Logik-Anwendungen.
- Diverse magnetische Texturen lassen sich aus einem einfachen Zusammenspiel von magnetischen Inhomogenitäten und elektrischem Strom erzeugen.
- Die Twists der Skyrmionen sorgen für eine nicht-triviale Magnetisierungsdynamik.

Dr. Karin Everschor-Sitte, JGU Mainz, Institute of Physics, TWIST Group, Staudingerweg 7, 55128 Mainz – Preisträgerartikel anlässlich der Verleihung des Hertha-Sponer-Preises 2018 auf der DPG-Jahrestagung in Erlangen



**Abb. 2** Ein Skymion (unten) lässt sich erzeugen, indem man einen magnetischen Monopol auf die Ebene projiziert, ähnlich einem eingerollten Igel,

der sich öffnet (rechts). Die Pfeile geben die lokale Magnetisierungsrichtung an, die Farbskala kodiert die aus der Ebene zeigende Komponente.

$$W = \frac{1}{4\pi} \int dx dy \mathbf{m} \cdot (\partial_x \mathbf{m} \times \partial_y \mathbf{m}). \quad (1)$$

Hierbei ist  $\mathbf{m}$  die lokale Magnetisierungsrichtung, und der Integrand berechnet das infinitesimale Raumwinkelement.

Neben der Orientierung des Zentrums eines Skymions (Polarität) ist auch der Twist in der Ebene eine charakterisierende Größe. Dieser ist beschrieben durch den azimutalen Winkel, der gleichzeitig die Händigkeit (Chiralität) des Skymions bestimmt. Der Twist in der Ebene erinnert an die Verdrehung der Tellerröcke beim Twist-Tanz (Abb. 1). Welcher Twist bei gegebener Polarität vorliegt, ist durch die Symmetrie des Systems und die sich ergebenden Wechselwirkungen bestimmt. Zum Beispiel kann die langreichweitige magnetostatische Wechselwirkung zu getwisteten Konfigurationen führen. Wenn die Inversionssymmetrie erhalten ist, können durch spontane Symmetriebrechung topologisch nicht-triviale magnetische Texturen entstehen. Diese „bubble“-Skymionen besitzen einen recht großen Kern<sup>1)</sup>, aber keine eindeutige Chiralität.

In Systemen mit gebrochener Inversionssymmetrie, z. B. in der Kristallstruktur oder bei dünnen Schichten durch die Oberfläche, tritt neben der Austausch- und der dipolaren Wechselwirkung die Dzyaloshinskii-Moriya-Wechselwirkung (DMI) auf. Diese basiert auf Spin-Bahn-Wechselwirkungen und beschreibt den antisymmetrischen Austausch zwischen benachbarten Spins. Im Kontinuumsmodell lässt sich diese Wechselwirkung schreiben als beliebige Kombination einer Ableitung (Inversionssymmetrie gebrochen) und zwei Magnetisierungsrichtungsvektoren (Zeitumkehrinvarianz):  $\int dx dy D_{ijk} m_i \partial_j m_k$ . Die Form des DMI-Tensors  $D_{ijk}$  ist durch die Symmetrie des Systems bestimmt und legt den Twist in der Ebene fest [2, 3]. Sie dominiert meist die dipolare Wechselwirkung, ist aber viel schwächer als die symmetrische Austauschwechselwirkung.

<sup>1)</sup> Mit dem Kern ist das Innere des Skymions gemeint, also in Abb. 2 der blaue Bereich.

Skymionen in Systemen mit DMI sind verglichen mit „bubble“-Skymionen weitaus interessanter, da sie deutlich kleiner sein können und eine definierte Chiralität haben. Nach ihrer theoretischen Vorhersage [4] vergingen 20 Jahre bis zur experimentellen Entdeckung [5]. Seitdem hat die Zahl der Ergebnisse über Skymionen schlagartig zugenommen. So fanden sich Skymionen in verschiedenen Materialien, darunter Metalle, Halbleiter und Isolatoren, sowie in dünnen Filmen. Ihre Größe und physikalischen Eigenschaften lassen sich mittlerweile nach Bedarf einstellen. Anwendungsrelevant sind ihre Beobachtung in Systemen bei Raumtemperatur und darüber hinaus sowie die Erkenntnis, dass Skymionen effizient mit elektrischen Strömen wechselwirken. Inzwischen gibt es zahlreiche Reviewartikel [6–9].

Bei der technologischen Anwendbarkeit von Skymionen geht es darum, Herausforderungen wie ihre effiziente, kontrollierte und reproduzierbare Erzeugung, Vernichtung und Manipulation in einem Bauteil zu meistern. Die Erforschung neuer funktionaler Skymion-Materialien bei Temperaturen oberhalb der Raumtemperatur ist hierbei zentral.

## Wege der Erzeugung

Skymionen lassen sich in ferromagnetischen Filmen oder mit Hilfe des Randes erzeugen. Innerhalb des Films besteht eine Möglichkeit darin, lokal einen Bereich in entgegengesetzte Richtung zu magnetisieren – z. B. mit Hilfe eines Magnetfeldes oder eines lokalen Spin-Stroms – und anschließend das System relaxieren zu lassen, damit sich Skymionen bilden. Am Rand lassen sich Randinstabilitäten ausnutzen oder ein kleiner Zacken einbauen, an dem sich Skymionen bilden können. Alternativ kann man Domänenwandpaare durch eine Verengung bewegen, an deren Ende sich die Domänenwände verformen und als Skymionen ablösen.

In einfachen Setups können sich magnetische Texturen und Skymionen allein durch das Wechselspiel einer inhomogenen Magnetisierung und eines homogenen elektrischen spinpolarisierten Stroms periodisch ausbilden. Dieser Mechanismus funktioniert unabhängig von mikroskopischen Details und ohne chirale Wechselwirkungen. Um den Mechanismus dahinter zu beschreiben, betrachten wir zunächst die Physik in 1D, die sich vollständig analytisch betrachten lässt und bei der man periodisch Domänenwände produziert [10, 11]. Anschließend gehen wir auf die Physik in 2D ein, wo Skymion-Antiskyrmion-Paare entstehen [12–14].

Betrachten wir zunächst einen eindimensionalen Nanodraht, dessen magnetische Eigenschaften sich auf das Wechselspiel aus Austauschwechselwirkung und uniaxialer Anisotropie beschränken lassen. Letztere beschreibt eine Wechselwirkung, welche die Ausrichtung der Magnetisierung entlang einer speziellen Achse bevorzugt, die z. B. durch die Anordnung der Atome entsteht. Das entsprechende Energiefunktional des

Nanodrahts ist gegeben durch

$$E[\mathbf{m}] = \int_0^\infty \left[ \frac{J}{2} (\partial_x \mathbf{m})^2 + \lambda (1 - m_x^2) \right] dx. \quad (2)$$

$J$  ist die Stärke der Austauschwechselwirkung. Der zweite Term beschreibt die Anisotropie mit Stärke  $\lambda$ , die als uniaxiale Anisotropie entlang der Richtung des Drahtes ( $x$ -Richtung) zeigt (Abb. 3). Der konstante Term ist so gewählt, dass die Energiedichte des Nanodrahtes im unendlichen Null ist. Im Grundzustand dieses Systems sind alle Spins entlang des Drahtes ausgerichtet.

Nun fixieren wir den ersten Spin des Drahtes entlang einer anderen Richtung (Abb. 3). Der neue Grundzustand ist am rechten Ende des Drahtes nicht anders als zuvor. Nur die Spins am Anfang orientieren sich langsam in die bevorzugte Richtung. Legt man einen elektrischen Strom an, so wechselwirkt dieser mit der magnetischen Textur. Vereinfacht ist dies wie folgt zu verstehen: Das ankommende Elektron sieht lokal eine Magnetisierung und erfährt damit eine Lorentz-Kraft senkrecht zur Magnetisierung und zur Stromrichtung. Umgekehrt entsteht eine Kraft auf die Magnetisierung, welche diese aus der  $xz$ -Ebene twistet. Bei höherem Strom verstärkt sich dieser Twist. Verdreht man z. B. ein Gummibärchen immer mehr, teilt es sich irgendwann in zwei Hälften. In das magnetische System übersetzt heißt dies, dass die Lösung oberhalb einer kritischen Stromdichte  $j_c \sim \sqrt{J\lambda}$  dynamisch wird. Für  $j > j_c$  lösen sich Domänenwände vom fixierten Start periodisch mit einer Frequenz  $f \sim \sqrt{j - j_c}$  ab und wandern entlang des Drahtes. Die Periode ist über die Stromstärke einstellbar.

In 2D ist das Wechselspiel zwischen einer inhomogenen Magnetisierung und einem spinpolarisierten Gleichstrom ähnlich. Für Stromstärken unterhalb eines kritischen Stroms wird die magnetische Textur um die Inhomogenität deformiert, oberhalb von  $j_c$  erhält man eine Dynamik. Da zuvor das System topologisch trivial war, können sich nur magnetische Konfigurationen mit Gesamtwindungszahl Null ablösen. So entstehen periodisch Skyrmion-Antiskyrmion-Paare mit einer Frequenz, die dem gleichen universellen Exponent wie bei den Domänenwänden  $f \sim \sqrt{j - j_c}$  folgt (Abb. 4a).

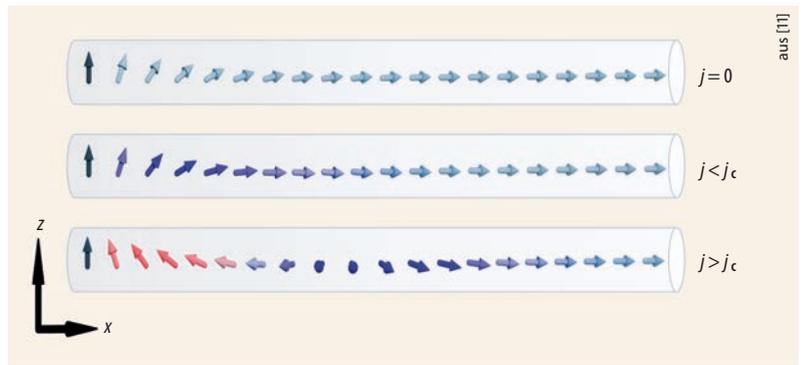


Abb. 3 Der schwarze Pfeil am Anfang des Nanodrahtes wird als Randbedingung festgehalten. Alle grauen Pfeile liegen in der  $xz$ -Ebene, rot und blau zeigen die  $\pm y$ -Komponente an. Ohne Strom ( $j=0$ ) erhält man die Hälfte einer ebenen Domänenwand bei  $x=0$ ; Für  $j < j_c$  dreht sich die Domänenwand aus der  $xz$ -Ebene heraus. Für höhere Ströme ( $> j_c$ ) ergibt sich eine dynamische Lösung, bei der Domänenwände entlang des Drahtes wandern.

Für die Erzeugung der Skyrmion-Antiskyrmion-Paare ist keine Dzyaloshinskii-Moriya- oder eine andere Form von Twist-Wechselwirkung notwendig. Somit haben Skyrmionen mit verschiedenen azimuthalen Winkeln die gleiche Energie und transformieren sich in der dynamischen Lösung ineinander (Abb. 4b). Die Dynamik des azimuthalen Winkels ähnelt einer Eiskunstläuferin, die sich immer in die gleiche Richtung dreht. In Systemen mit DMI ist der Kernmechanismus im Wesentlichen der gleiche. Diese Wechselwirkung sorgt für eine kleinere kritische Stromdichte, da die Strukturen schon vorgetwistet sind. Anschließend stabilisiert sie die erzeugten symmetrieverträglichen Strukturen. Dieser Mechanismus zur Skyrmion-Erzeugung wurde bereits in einigen Experimenten verschiedener Gruppen ausgenutzt.

### Skyrmionen in Bewegung

Skyrmionen lassen sich mittels elektrischen Strömen nicht nur erzeugen, sondern auch effizient bewegen. Hierbei stellt sich heraus, dass die Twists zu einer besonderen Dynamik führen. Skyrmionen erfahren eine Kraft entlang des Stroms und senkrecht dazu. Der

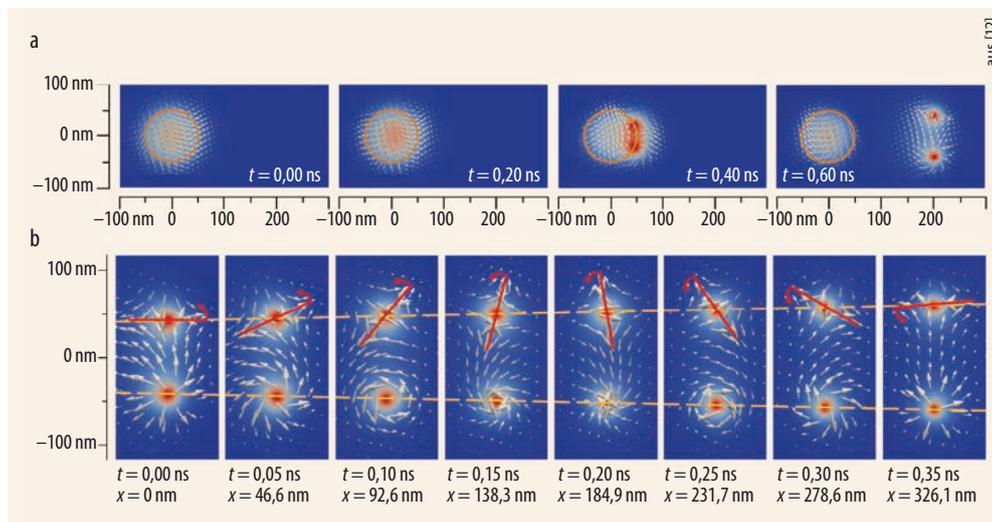
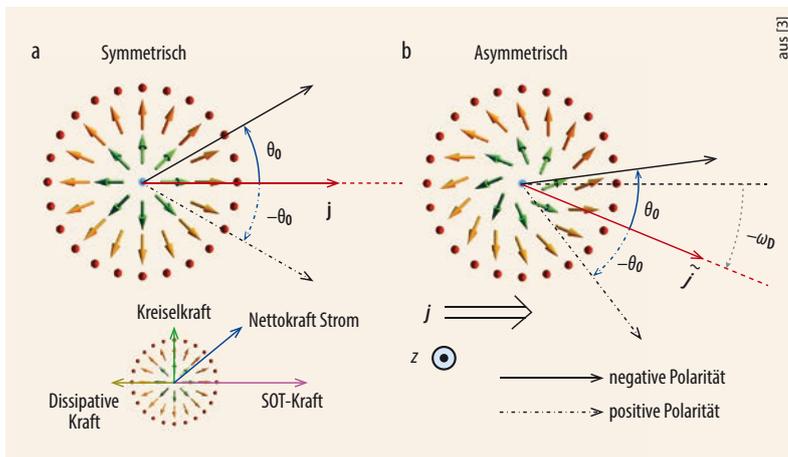


Abb. 4 Aufgrund des Wechselspiels einer magnetischen Inhomogenität (orangener Kreis) und einem angelegten elektrischen Strom entstehen Skyrmion-Antiskyrmion-Paare (a). Ein Skyrmion-Antiskyrmion-Paar entwickelt sich mit der Zeit (b).



**Abb. 5** Draufsicht auf ein Skymion, das mit dem angelegten Strom über Spin-Orbit-Torques (SOT) wechselwirkt. Dabei ergibt sich der Skymion-Hall-Effekt. Beim Néel-Skymion (a) ist der Skymion-Hall-Effekt für die beiden Polaritäten symmetrisch um die Stromrichtung verteilt. Ein

zusätzlich getwistetes Skymion (b) fühlt einen effektiven Strom, der um einen Winkel gedreht ist. Daher ergibt sich ein asymmetrischer Skymion-Hall-Effekt für die beiden Polaritäten. Unten sind die Kräfte zu sehen, die auf das Néel-Skymion im Anfangszustand wirken.

Grund hierfür ist die Magnus-Kraft. Der Skymion-Hall-Effekt [15–17] wurde bereits mehrfach nachgewiesen und auch der Skymion-Hall-Winkel gemessen.

Wenn die Hauptwechselwirkung von Strom und magnetischer Textur dadurch entsteht, dass sich der Spin des Elektrons immer entlang der lokalen Magnetisierung orientiert und so Drehmoment auf die Magnetisierung überträgt (Spin-Transfer-Torque), bestimmt nur die Windungszahl die Magnus-Kraft. Der zusätzliche Twist in der Ebene der Skymionen spielt keine Rolle. Der Skymion-Hall-Winkel für die beiden verschiedenen Skymion-Polaritäten ist daher symmetrisch um die Stromrichtung (Abb. 5).

Anders ist dies bei den neu entdeckten Spin-Bahn-Drehmomenten (Spin-Orbit-Torques). Die Spin-Bahn-Kopplung erlaubt es, die Magnetisierung mittels Ladungsströmen effizient zu manipulieren. Allerdings ist sie als relativistischer Effekt in den meisten Materialien eher klein. Dies ist anders in Schwermetallen, zum Beispiel Platin, welches jedoch nicht ferromagnetisch ist. Besonders populär ist es daher derzeit, die Spin-Bahn-Wechselwirkungen in Schichtsystemen aus Ferromagneten und Schwermetallen mittels Spin-Hall-Effekt auszunutzen. Spin-Orbit-Torques erlauben es, durch eine zusätzliche Symmetriebrechung den Skymion-Hall-Winkel gezielt zu verändern.

Dies eröffnet völlig neue Möglichkeiten. Insbesondere lässt sich auf diese Weise der Skymion-Hall-Winkel vollständig eliminieren, sodass sich Skymionen kontrolliert entlang des Stroms bewegen können. Das ist für einige Anwendungen wie einen Skymion-basierten Racetrack-Speicher relevant. Solche Speicher existieren bislang nur als Prototypen und haben das Potenzial, die Vorteile von Random Access Memory und hochkapazitiven nichtflüchtigen Festplatten zu kombinieren. Sie kodieren die Daten über magnetische Anordnungen seriell in einem Nanodraht. Die Daten werden nur an einer Stelle magnetoelektrisch gelesen

bzw. geschrieben. Um Daten über Skymionen zu kodieren (z. B. Existenz eines Skymions = 1, Abwesenheit = 0) ist es erforderlich, Skymionen nicht nur schreiben bzw. löschen und lesen zu können, sondern auch mehrfach im Nanodraht kontrolliert hin und herzuschieben. Eine Elimination des Skymion-Hall-Winkels ist daher nötig. Auch für weitere Anwendungen, z. B. Skymion-basierte Logik-Operationen oder Skymion-basiertes Computing, ist die Dynamik, die durch die Twists bestimmt wird, relevant.

Wie die Skymionen mit ihren Twists in der Spintronik für Aufmerksamkeit sorgen, so verursachte der Twist-Tanz in den 60er-Jahren viel Aufregung und setzte nebenbei die typische Führungshierarchie (zumindest auf der Tanzfläche) außer Kraft. Nicht immer braucht es also eine Revolution, um etwas positiv zu verändern, manchmal genügt ein kleiner Twist.

### Danksagung

An dieser Stelle bedanke ich mich herzlich bei allen, die zum Erfolg unserer Arbeiten über Skymionen beigetragen haben. Neben meinem Emmy-Noether-Team TWIST gilt mein besonderer Dank Jairo Sinova, Achim Rosch, Christian Pfleiderer und Artem Abanov. Valerie Rung danke ich für die hilfreichen Diskussionen zur Erstellung dieses Artikels. Nicht zuletzt gilt mein Dank meiner Familie.

Diese Projekte werden gefördert durch die DFG unter der Projektnummer EV 196/2-1 und dem SFB/TRR 173 SPIN+X.

### Literatur

- [1] T. Skyrme, Proc. R. Soc. A Math. Phys. Eng. Sci. **260** (1961)
- [2] J. Rowland, S. Banerjee und M. Randeria, Phys. Rev. B **93**, 020404 (2016)
- [3] K.-W. Kim, K.-W. Moon, N. Kerber, J. Nothhelfer und K. Everschor-Sitte, Phys. Rev. B **97**, 224427 (2018)
- [4] A. N. Bogdanov und D. A. Yablonskii, JETP **68**, 101 (1989)
- [5] S. Mühlbauer et al., Science **323**, 915 (2009)
- [6] N. Nagaosa und Y. Tokura, Nat. Nanotechnol. **8**, 899 (2013)
- [7] G. Finocchio et al., J. Phys. D. Appl. Phys. **49**, 423001 (2016)
- [8] A. Fert, N. Reyren und V. Cros, Nat. Rev. Mater. **2**, 17031 (2017)
- [9] W. Jiang et al., Phys. Rep. **704**, 1 (2017)
- [10] J. Shibata, G. Tatara und H. Kohno, Phys. Rev. Lett. **94**, 076601 (2005)
- [11] M. Sitte et al., Phys. Rev. B **94**, 064422 (2016)
- [12] K. Everschor-Sitte et al., New J. Phys. **19**, 092001 (2017)
- [13] A. Leonov und M. Mostovoy, Nat. Commun. **8**, 14394 (2017)
- [14] M. Stier et al., Phys. Rev. Lett. **118**, 267203 (2017)
- [15] T. Schulz et al., Nat. Phys. **8**, 301 (2012)
- [16] W. Jiang et al., Nat. Phys. **13**, 162 (2017)
- [17] K. Litzius et al., Nat. Phys. **13**, 170 (2017)

### DIE AUTORIN

**Karin Everschor-Sitte** studierte Physik und Mathematik in Köln und promovierte dort 2012 mit Auszeichnung. Nach einer kurzen Anstellung in München arbeitete sie als Postdoc in Austin (Texas). Seit 2015 ist sie als Postdoc in Mainz und leitet dort seit Ende 2016 eine Emmy-Noether-Gruppe. Neben der Erzeugung und Manipulation magnetischer Texturen erforscht sie, wie man mit Skymionen Reservoir-Computer implementieren kann.



Kurt Fuchs Fotodesign