

Magnetische Wirbel im Festkörper

Die emergenten Eigenschaften chiraler Magnete reflektieren Konzepte der Kern- und Elementarteilchenphysik.

Christian Pfleiderer

Skyrmionen sind eine Art stabile Wirbel in physikalischen Feldern. Als topologisch nicht-triviale Spinkonfigurationen wurden sie erst kürzlich in der Magnetisierung von Festkörpern entdeckt. Sie verbinden dabei die Grundlagenforschung über topologische Phasen mit aktuellen Fragen der angewandten Forschung wie der Kopplung von Spinströmen und magnetischer Ordnung in der Spintronik.

Der Vorschlag des britischen Kernphysikers Tony H. R. Skyrme, Neutronen und Protonen (Fermionen) als nicht-lineare Anregungen von Pionenfeldern (Bosonen) zu deuten [1], blieb zunächst über 20 Jahre unbeachtet. Erst 1983 erkannten Adkins, Nappi und Witten das visionäre Potenzial dieses Modells für quantitative phänomenologische Betrachtungen in der Kernphysik und als Bindeglied zur Quantenchromodynamik [2]. Aus heutiger Sicht stellt Skyrmes Arbeit einen Meilenstein der theoretischen Physik dar, dessen Bedeutung weit über die Kernphysik hinausreicht und sich von der Elementarteilchenphysik bis zur harten und weichen kondensierten Materie erstreckt [3].

Zur Illustration, was ein Skyrmion auszeichnet, ist es hilfreich, einen behaarten Ball zu betrachten (Abb. 1): Unabhängig davon, wie man diesen kämmt, bleibt immer ein Wirbel zurück. Dieser ist eine besondere Charakteristik der Geometrie der behaarten Oberfläche des Balls und reflektiert deren nicht-triviale Topologie. Zudem sind Skyrmionen Solitonen, d. h. stark nicht-lineare, räumlich lokalisierte, stationäre Anregungen mit teilchenartigem Charakter [4].

Die Erforschung der topologischen Eigenschaften der kondensierten Materie ist von großer Aktualität. So ziehen, angefangen von Quanten-Hall-Systemen über topologische Isolatoren und Weyl-Metalle, geometrisch frustrierte Spinsysteme großes Interesse auf sich. Die Entdeckung von Skyrmionen in der Magnetisierung von Festkörpern [5, 6] ist eine neue Entwicklung, welche die Erforschung topologischer Phasen mit Anwendungen, z. B. in der Spintronik, verbindet.

Die Bedeutung von Skyrmes Arbeit erschließt sich im Kontext von ebenso wegweisenden mathematischen Arbeiten von Hobert und Derrick [7]. Motiviert durch die Frage, inwiefern sich stationäre, lokalisierte Lösungen nicht-linearer Feldtheorien (Solitonen) eignen, um Elementarteilchen zu beschreiben, zeigten sie, dass allgemeine Lösungen für Dimensionen $d \geq 3$

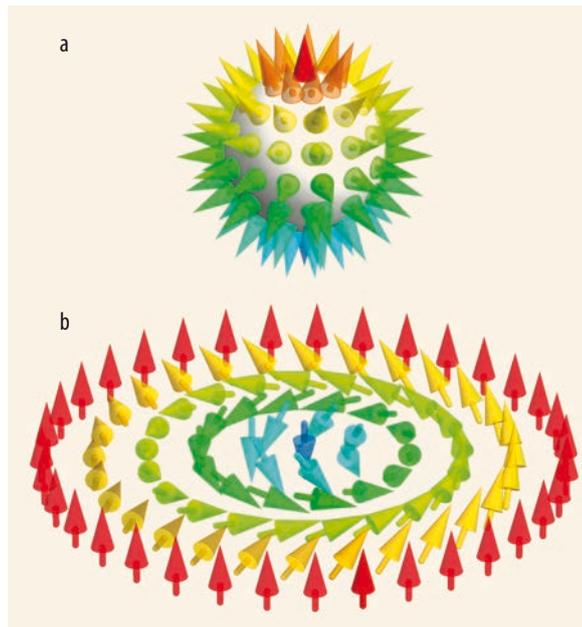


Abb. 1 Kämmt man Spins auf der Oberfläche einer Kugel (a), verbleibt stets ein Wirbel als nicht-triviale topologische Charakteristik. Eine stereographische Projektion der Kugeloberfläche in die Ebene erhält diese topologische Eigenschaft (b). Solche Wirbel werden als magnetische Skyrmionen bezeichnet.

nicht existieren. Eine Ausnahme ist hier das Skyrme-Modell, wobei die Wechselwirkungen mathematisch kompliziert und physikalisch intransparent sind. Eine physikalisch intuitive Ausnahme, welche die Bildung von Skyrmionen zulässt, schlugen Bogdanov und Jablonskii schließlich 1989 im Zusammenhang mit den mikromagnetischen Eigenschaften chiraler Magnete vor [8]. Die magnetischen Momente entsprechen dabei als Teil eines kontinuierlichen Magnetisierungsfeldes

KOMPAKT

- Die Spin-Bahn-Wechselwirkung führt in Systemen ohne Inversionssymmetrie zu chiralen magnetischen Wechselwirkungen, die topologisch nicht-triviale Feldkonfigurationen stabilisieren können.
- Solche Feldkonfigurationen sind topologische Solitonen, die als Skyrmionen bekannt sind.
- Mit den topologischen Eigenschaften magnetischer Skyrmionen ist eine äußerst effiziente Kopplung an Spinströme verbunden.
- Für die Beschreibung von Skyrmionen in magnetischen Materialien eröffnet das Bild einer emergenten Elektrodynamik einen eleganten und intuitiven Zugang.

Prof. Dr. Christian Pfleiderer, TU München, James-Franck-Str. 1, 85748 Garching – Preisträgerartikel anlässlich der Verleihung des Max-Born-Preises 2016

den Haaren auf der Oberfläche des Balls. Projiziert man die Oberfläche stereographisch auf eine Ebene, ergeben sich Skyrmionen, wie sie experimentell beobachtet wurden (Abb. 1).

Chirale Magnete

Der direkte und indirekte Austausch sowie dipolare Wechselwirkungen begünstigen eine kollineare Ausrichtung der magnetischen Momente. Dies ist nicht der Fall, wenn die Momente so angeordnet sind, dass es zu konkurrierenden Kopplungen kommt, wie beispielsweise für antiferromagnetisch wechselwirkende Momente auf einem Dreiecksgitter, für die der Drehsinn der Verkippen entartet ist.

Ohne Inversionszentrum in der Anordnung der magnetischen Momente kann eine weitere Wechselwirkung auftreten, die Dzyaloshinskii und Moriya zuerst identifizierten und die auf der Spin-Bahn-Kopplung beruht. Im Gegensatz zu den Austauschkopplungen begünstigt diese DM-Wechselwirkung ein Verkippen der Richtungen der Momente mit einem bevorzugten Drehsinn. Diese Händigkeit (Chiralität) ist eine besondere Symmetrie, die sich dadurch auszeichnet, dass sich das Spiegelbild nicht durch Drehungen oder Verschiebungen in sein Original überführen lässt.

Ausgangspunkt für magnetische Skyrmionen ist nun eine Hierarchie von Energieskalen: Konventionelle Austauschwechselwirkungen als stärkste Kopplung stabilisieren eine kollineare Ordnung, die durch schwache (chirale) DM-Wechselwirkungen auf großen Längenskalen moduliert ist. Noch schwächere magnetische Anisotropien richten diese Modulation bezüglich des Kristallgitters aus.

Wichtiges Beispiel einer Materialklasse, in der solche hierarchischen Wechselwirkungen auftreten, sind die B20-Übergangsmetallsilizide und -germanide, von denen MnSi bisher am intensivsten untersucht wurde. In diesen Systemen wurde 2009 mittels Neutronenstreuung ein erstes Beispiel für magnetische Skyrmionen

im Festkörper entdeckt [5]. Die Skyrmionen entsprechen den oben erwähnten Wirbeln dergestalt, dass sich hexagonal dichtest gepackte Wirbellinien parallel zum äußeren Magnetfeld bilden (Abb. 2a). Die Skyrmionen in MnSi sind dabei mit etwa 200 \AA groß im Vergleich zu atomaren Längenskalen. Im magnetischen Phasendiagramm befindet sich eine kleine thermodynamische Phase zwischen einem paramagnetischen Regime und einem helimagnetischen modulierten Zustand (Abb. 2b).

Wie sich zeigt, reichen die hierarchischen Wechselwirkungen auf dem Niveau einer Molekularfeldtheorie hier nicht ganz, um die Skyrmionengitter zu stabilisieren. So wurde theoretisch erwartet, dass Skyrmionen in den B20-Systemen bestenfalls unter uniaxialen Verspannungen auftreten [8]. Als wesentlich erweist sich dagegen, dass starke Fluktuationen das Einsetzen der helimagnetischen Ordnung begleiten. Durch die sehr schwachen magnetischen Anisotropien können diese Fluktuationen wechselwirken und die helimagnetische Ordnung unterdrücken, bis es zu einem Phasenübergang erster Ordnung entsprechend einer Vorhersage von Brazovskii kommt [9]. Für die Skyrmionengitter führen schließlich diese starken Fluktuationen des helimagnetisch-paramagnetischen Übergangs zu einer Absenkung der Gesamtenergie, welche die Skyrmionenphase thermodynamisch stabilisiert.

Das hier gezeigte Phasendiagramm erweist sich als generisch für Übergangsmetallverbindungen mit der P2₃-Raumgruppe der B20-Verbindungen [10]. In verwandten Verbindungen wurden jüngst analoge Phasendiagramme mit Skyrmionenordnung weit oberhalb Raumtemperatur beobachtet. Die genaue Ausdehnung der Skyrmionenphase als Funktion von Temperatur und Feld reflektiert dabei die Balance mit der konkurrierenden konischen Phase. Mit abnehmender Probenlänge in Richtung des Magnetfelds dehnt sich die Skyrmionenphase aus, da die konische Phase instabil wird, bis sie das Phasendiagramm völlig dominiert. Reduzierte Probenabmessungen können demnach die Skyrmionenphase favorisieren. Die spezielle Spinstruk-

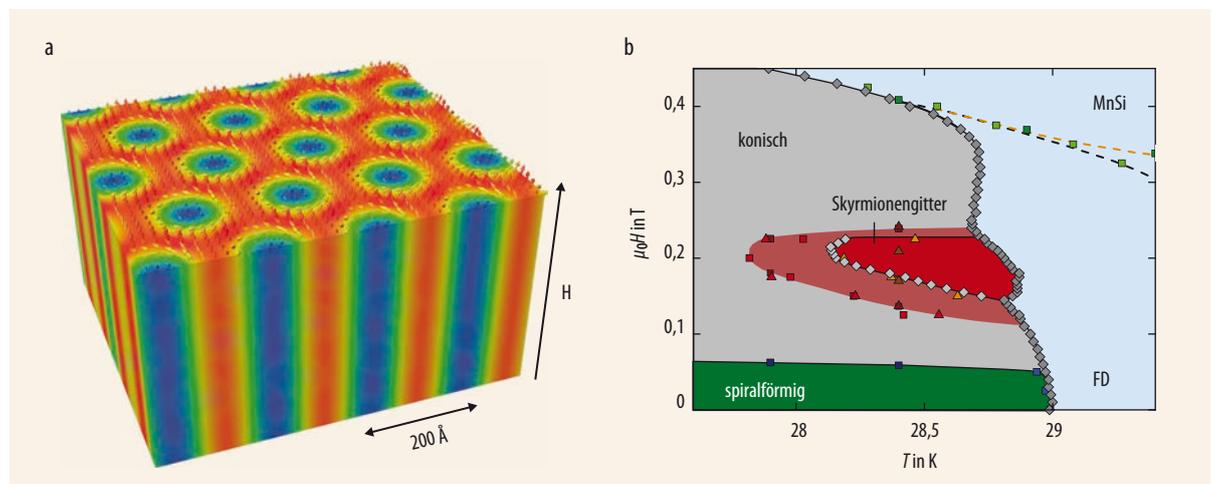


Abb. 2 Ein Skyrmionengitter besteht aus einer Art Wirbelschläuche, die sich stets parallel zum äußeren Magnetfeld aus-

richten (a). Im Phasendiagramm von MnSi liegt die Skyrmionenphase eingebettet zwischen topologisch trivialen

Formen der Ordnung (b), wobei die Skyrmionen eine Ausdehnung von etwa 200 \AA besitzen.

tur der Skymionen und einzelne Skymionen wurden in solch dünnen Proben mittels Transmissions-Elektronen-Mikroskopie beobachtet [6].

In dünnen Schichten führt die fehlende Inversions-symmetrie der Grenzfläche mit dem Substrat schließlich zu signifikanten DM-Wechselwirkungen. Diese reichen für sich genommen aus, um Skymionen zu stabilisieren, wie von Heinze, Blügel, Wiesendanger und Mitarbeitern mittels spin-polarisierter Tunnelmikroskopie gezeigt wurde [11]. Solche grenzflächengetriebenen Skymionen entwickeln sich zu einem wichtigen Teilgebiet, das sich sowohl mit dem Design der Wechselwirkungen als auch der Reaktivierung alter Fragestellungen wie den Eigenschaften von Blasen-domänen (engl. bubbles) beschäftigt.

Emergente Elektrodynamik

Das große Interesse an magnetischen Skymionen beruhte zunächst auf ihren ungewöhnlichen Transporteigenschaften. Diese hängen mit der nicht-trivialen Topologie zusammen, die sich durch eine bemerkenswert einfache Beschreibung erfassen lässt und als emergente Elektrodynamik bezeichnet wird.

Formal lässt sich die Topologie mit Hilfe einer mathematischen Abbildung der Feldkonfiguration auf den Ordnungsparameterraum charakterisieren. Betrachtet man ein System, bei dem die magnetischen Momente in alle Raumrichtungen zeigen können, erfordert dies zwei Winkel, und der Ordnungsparameterraum entspricht einer Kugeloberfläche. Die Integration über die Änderungen der Werte im Ordnungsparameterraum liefert eine sog. Windungszahl W . Für magnetische Momente, die in alle Raumrichtungen zeigen, gilt

$$W = \frac{1}{4\pi} \int dx dy \vec{n} \cdot (\partial_x \vec{n} \times \partial_y \vec{n}),$$

wobei \vec{n} als Einheitsvektor die Richtung der Magnetisierung angibt. Feldkonfigurationen mit der gleichen Windungszahl sind topologisch äquivalent, d. h. sie lassen sich durch elastische Deformationen ineinander überführen, während $W = 0$ topologisch trivial ist.^{#)}

Die Bewegung eines Leitungselektrons durch ein Skymion erlaubt es, die Wechselwirkung von Spinströmen mit den komplizierten Richtungsänderungen der Magnetisierung zu illustrieren. Angenommen, der Elektronenspin folgt der Richtung der Magnetisierung adiabatisch, so ergibt sich eine Änderung der Berry-Phase seines quantenmechanischen Zustands. Beachtet man weiterhin, dass sich die Berry-Phase eines Elektrons auch aufgrund eines magnetischen Flusses Φ ändern kann (Aharonov-Bohm-Effekt), lässt sich die Änderung der Berry-Phase aufgrund des Skymions durch einen fiktiven magnetischen Fluss deuten. Dieser entspricht aufgrund der nicht-trivialen Topologie der behaarten Kugeloberfläche (dem Wirbel) dem Produkt aus der Windungszahl mit einem Flussquant: $\Phi_0 = e/h$. Das Elektron verhält sich also wie in einem fiktiven Magnetfeld $B_{\text{eff}} = W \Phi_0 / A$, wobei A die Quer-

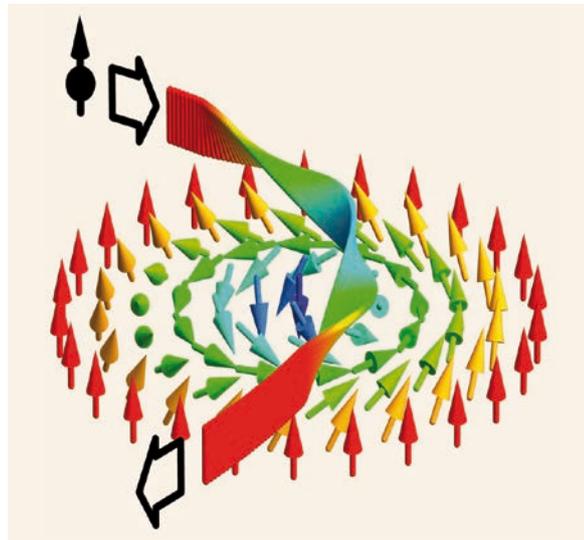


Abb. 3 Der Spin eines Elektrons folgt der Magnetisierung in einem Skymion adiabatisch. Aufgrund der nicht-trivialen Topologie sammelt er eine Berry-Phase auf und wird, analog zum Aharonov-Bohm-Effekt, abgelenkt.

schnittsfläche des Skymions ist. B_{eff} wird auch als emergentes Magnetfeld bezeichnet. Für MnSi beträgt B_{eff} rund 13,6 T. Es erreicht für kleinere Skymionendurchmesser in anderen Materialien schnell extrem hohe Werte von hunderten von Tesla.

Da ein effektives Magnetfeld die Wechselwirkung des Elektrons mit dem Skymion beschreibt, muss das Elektron eine Ablenkung erfahren, die bei endlicher Spin-Polarisierung des Stroms als zusätzlicher Beitrag zum Hall-Effekt auftritt (Abb. 3). Bei Transportmessungen weist dieser sog. topologische Hall-Effekt die nicht-triviale Topologie direkt nach [12]. Zudem impliziert die Ablenkung des Elektrons einen Impulsübertrag auf die Spinstruktur. Diese Effekte sind überraschend effizient und können bereits ab extrem kleinen Stromdichten die Skymionen verschieben [13]. Ähnliche Bewegungen ferromagnetischer Domänenwände durch einen spin-polarisierten Strom untersucht man in Nanodrähten, um Informationen in Speichermedien zu schreiben. Die nötigen Stromdichten sind allerdings um über fünf Größenordnungen höher.

Deutet man den Einfluss von Skymionen als emergentes Flussquant, dann sollten bewegte Skymionen gemäß dem Faradayschen Induktionsgesetz ein fiktives elektrisches Feld induzieren. In der Tat wurde dies experimentell beobachtet [14]. Es liefert einen direkten Hinweis auf die Driftgeschwindigkeit und Bewegungsrichtung des Skymionengitters.

Skymionics

Skymionen in magnetischen Materialien kombinieren Eigenschaften, die man technologisch nutzen möchte, um beispielsweise die Lebensdauer von Datenspeichern zu verbessern und ihre Packungsdichte zu erhöhen [6]. Aktuelle Untersuchungen beschäftigen sich deshalb nicht zuletzt mit der Erzeu-

^{#)} Weil eine schwer zu visualisierende Abbildung auf einen dreidimensionalen Ordnungsparameterraum die Topologie von Skymionen in der Kernphysik erfasst, werden die Skymionen magnetischer Systeme aufgrund ihrer reduzierten Dimension auch als Baby-Skymionen bezeichnet.

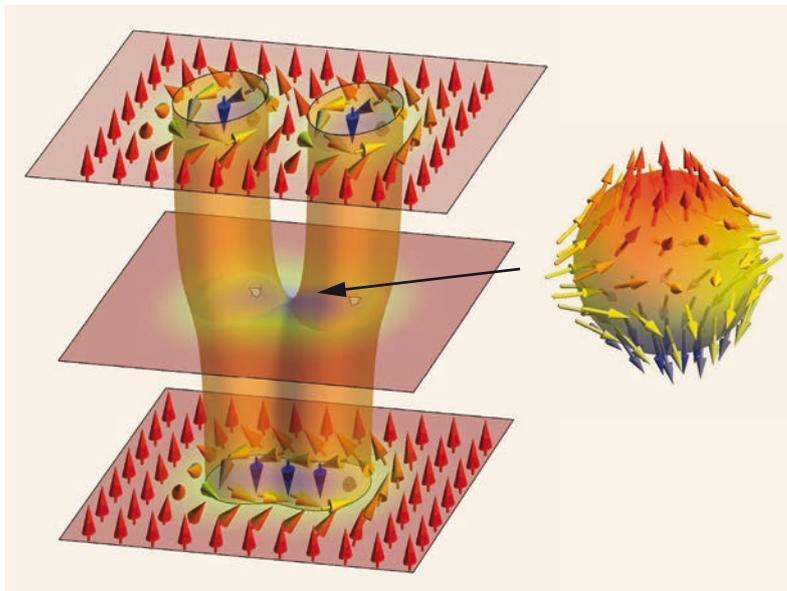


Abb. 4 Ein Punkt verschwindender Magnetisierung erzeugt oder vernichtet die Topologie eines Skyrmions. In der Sprache der emergenten Elektrodynamik chi-

raler Magnete trägt dieser Punkt einen fiktiven quantisierten magnetischen Fluss von einem Flussquant analog zu einem Dirac-Monopol.

gung und dem Zerfall von Skyrmionen. So zeigt eine Kombination von magnetischer Kraftmikroskopie und Monte-Carlo-Simulationen, dass der Zerfall von Skyrmionen in kubischen B20-Verbindungen mit einem Punkt einhergeht, an dem die Magnetisierung verschwindet [15]. Dieser Punkt fügt – wie ein Reißverschluss – die Skyrmionenschläuche zusammen oder trennt sie (Abb. 4). In der emergenten Elektrodynamik ändert sich dabei der magnetische Fluss um ein Flussquant. Die Nullstelle, die zur Erzeugung oder zum Zerfall eines Skyrmions führt, trägt also eine quantisierte emergente Ladung von einem Flussquant. Sie lässt sich deshalb als emergenter magnetischer Dirac-Monopol deuten.

Als weitere Entwicklungen konnten Romming und Kollegen mit spin-polarisierter Tunnelmikroskopie Skyrmionen in dünnen PdFe-Schichten erzeugen und vernichten [16]. Weiterhin ergibt die extrem effiziente Kopplung von Spinströmen an Skyrmionen neue Ansätze für eine energieeffiziente Datenverarbeitung. So gelang es jüngst, konkrete Vorrichtungen zu realisieren, mit denen Skyrmionen in dünnen Schichten durch Strompulse erzeugt, vernichtet und verschoben werden [17]. Dies verspricht die Realisierung logischer Operationen in elektronischen Bauteilen.

Analog zur effizienten Kopplung von Elektronen an Skyrmionen koppeln Magnonenströme in Isolatoren ebenfalls effizient an die Skyrmionengitter und versetzen diese in Bewegung [6]. Die topologischen und solitonischen Eigenschaften von Skyrmionen versprechen deshalb große Fortschritte, z. B. in der Spin-Kaloritronik oder Magnonik, die sich beide auf die dynamischen Eigenschaften konzentrieren. Die Anregungsspektren der Skyrmionen und deren Wechselspiel mit konventionellen Magnonen sind dabei bereits relativ gut untersucht und theoretisch verstanden [18]. Die breite Materialbasis eröffnet in diesem Zu-

sammenhang eine exzellente Modularität und elegante technische Lösungen.

Mit dieser Perspektive schließt sich der Kreis von den Anwendungen zur reinen Grundlagenforschung in magnetischen Materialien, die Konzepte der Kern- und Elementarteilchenphysik reflektiert und völlig neue Ansätze für konkrete Anwendungen anbietet.

Danksagung

Unsere Beiträge zur Entdeckung und Erforschung von Skyrmionen in chiralen Magneten sind das Ergebnis einer Vielzahl von Kooperationen mit Studenten, Doktoranden, Postdoktoranden und Kollegen, die den Erfolg der verschiedenen Projekte erst möglich gemacht haben. Ich danke allen diesen Mitarbeitern und Kollegen herzlich für die Zusammenarbeit. Mein ganz besonderer Dank gilt Peter Böni, Achim Rosch und Markus Garst. Andreas Bauer, Karin Everschor-Sitte und Achim Rosch danke ich für die Abbildungen.

Literatur

- [1] T. H. Skyrme, Proc. R. Soc. Lond. Ser. A **260**, 127 (1961)
- [2] G. S. Adkins, C. R. Nappi und E. Witten, Nucl. Phys. B **228**, 552 (1983)
- [3] G. E. Brown (Hrsg.), Selected Papers, with Commentary, of T. H. R. Skyrme, World Scientific (1994); G. E. Brown und M. Rho (Hrsg.), The multifaceted skyrmion, World Scientific (2010)
- [4] N. Manton und P. Sutcliffe, Topological Solitons, Cambridge University Press, Cambridge (2004)
- [5] S. Mühlbauer et al., Science **323**, 915 (2009); W. Münzer et al., Phys. Rev. B **81**, 041203 (R) (2010)
- [6] N. Nagaosa und Y. Tokura, Nat. Nano. **8**, 899 (2013); A. Fert, V. Cros und J. Sampaio, Nat. Nano. **8**, 152 (2013)
- [7] R. H. Hobert, Proc. Phys. Soc. London **82**, 201 (1963); G. H. Derrick, J. Math. Phys. **5**, 1252 (1964)
- [8] A. N. Bogdanov und D. A. Yablonskii, Sov. Phys. JETP **68**, 101 (1989); A. N. Bogdanov und A. Hubert, J. Mag. Mag. Mat. **138**, 255 (1994)
- [9] M. Janoschek et al., Phys. Rev. B **87**, 134407 (2013); S. A. Brazovskii, Sov. Phys. JETP **41**, 85 (1975)
- [10] A. Bauer und C. Pfleiderer, in: Topological Structures in Ferroic Materials, (Hrsg.) J. Seidel, Springer Series in Materials Science, vol. 228 (2016)
- [11] S. Heinze et al., Nat. Phys. **7**, 713 (2011)
- [12] A. Neubauer et al., Phys. Rev. Lett. **102**, 186602 (2009); C. Franz et al., Phys. Rev. Lett. **112**, 186601 (2014)
- [13] F. Jonietz et al., Science **330**, 1648 (2010)
- [14] T. Schulz et al., Nat. Phys. **8**, 301 (2012)
- [15] P. Milde et al., Science **340**, 1076 (2013)
- [16] N. Romming et al., Science **341**, 636 (2013)
- [17] A. Jiang et al., Science **349**, 283 (2015)
- [18] T. Schwarze et al., Nat. Mat. **14**, 478 (2015); D. Grundler, Nat. Phys. **11**, 438 (2015)

DER AUTOR

Christian Pfleiderer studierte Physik in Tübingen und an der University of Denver. Nach der Promotion an der University of Cambridge arbeitete er am CEA Grenoble und leitete am KIT eine Helmholtz-Nachwuchsgruppe. 2004 nahm er einen Ruf auf ein Extraordinariat an die TU München an. Seine Arbeiten über Skyrmionen werden seit 2012 durch einen Advanced Grant des ERC gefördert. Seit 2014 leitet er den Lehrstuhl für Experimentalphysik zur Topologie korrelierter Systeme an der TU München. In diesem Jahr erhielt er bereits den Europhysics Preis der Condensed Matter Division der European Physical Society.

