

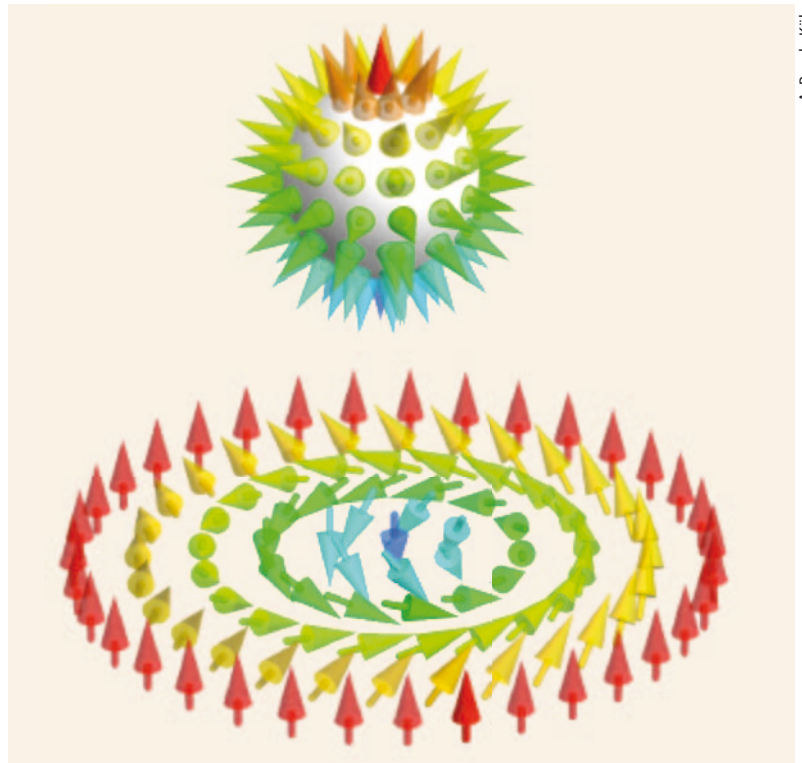
## ■ Wirbel um Spinwirbel

In einer Palladium-Eisen-Schicht lassen sich Skyrmionen gezielt erzeugen und vernichten

**E**in Doughnut und eine Henkeltasse sind topologisch äquivalent: Ihre geometrischen Formen lassen sich stetig ineinander verformen. Möchte man hingegen topologisch nicht äquivalente Gebilde ineinander überführen, so geht das nicht, ohne deren Struktur lokal zu zerstören. In den letzten Jahren entwickelt sich die Erforschung topologisch nicht trivialer Zustände zum vielleicht größten Teilbereich der Festkörperphysik. Besonders aktuell sind Quanten-Hall-Systeme, topologische Isolatoren, Materialien mit geometrischer Frustration und nicht zuletzt chirale Magnete. Ungeklärt blieb bislang jedoch die sowohl für das grundlegende Verständnis als auch für mögliche Anwendungen wichtige Frage, wie sich solche Objekte mit nicht trivialer Topologie auf einer mikroskopischen Skala gezielt erzeugen und vernichten lassen. An der Universität Hamburg ist es nun kürzlich Niklas Romming und Kollegen gelungen, so genannte Skyrmionen mit Hilfe eines spinempfindlichen Raster-Tunnel-Mikroskops (STM) in einer Palladium-Eisen-Schicht (PdFe) zu erzeugen und zu vernichten [1].

Die Autoren beobachteten dabei in den PdFe-Schichten, die auf ein Iridium-Substrat aufgebracht sind, bei einigen Kelvin und einem Magnetfeld  $B$  über 4 T einen ferromagnetischen Zustand. Mit abnehmendem Magnetfeld bilden die Spins in diesem Ferromagneten Skyrmionen (Abb. 1). Bei festem Ort der STM-Spitze fluktuiert die PdFe-Schicht zwischen dem ferromagnetischen Zustand und den Skyrmionenzuständen mit einer extrem niedrigen Rate von einigen Hz. Diese zufälligen Fluktuationen nutzen die Autoren für die Erzeugung und Vernichtung der Skyrmionen, wobei leider ungeklärt bleibt, wie das mikroskopisch abläuft.

Zur Betrachtung dieser Frage ist ein historischer Rückblick hilfreich. So geht die Bezeichnung Skyrmion auf die bahnbrechenden theore-



**Abb. 1** Skyrmion in drei und zwei Dimensionen. In drei Dimensionen kann man einen behaarten Ball nicht perfekt kämmen – es bleibt immer ein Wirbel.

Durch eine stereographische Projektion erhält man ein Skyrmion in zwei Dimensionen. Die Pfeile symbolisieren hier die einzelnen Spins.

tischen Arbeiten des britischen Kernphysikers Tony Hilton Royle Skyrme zurück, der sich Mitte des letzten Jahrhunderts mit teilchenartigen Zuständen in nicht linearen Feldtheorien beschäftigte [2]. Ein Skyrmion kann man sich dabei wie einen behaarten Ball vorstellen: Egal, wie man diesen kämmt – immer bleibt ein Wirbel auf der Oberfläche zurück, der charakteristisch ist für die nicht triviale Topologie. Das topologisch äquivalente Objekt in einer dünnen Schicht ergibt sich aus dem behaarten Ball durch eine stereografische Projektion, d. h. die Skyrmionen in den PdFe-Schichten sind eine Art Spinwirbel.

Anfang der 1990er-Jahre lieferten theoretische und experimentelle Untersuchungen der Spinpolarisierung von Quanten-Hall-Systemen die ersten Hinweise auf Skyrmionen in der kondensierten Materie. 2009 wurden schließlich experimentell ein Skyrmionengitter und später individuelle Skyrmionen als neue Form der magnetischen Ord-

nung in chiralen Massivkristallen entdeckt [3, 4], gefolgt von der Beobachtung eines Skyrmionengitters in einatomaren Fe-Schichten auf einem Ir-Substrat [5]. Topologisch sind die Spinwirbel in all diesen Systemen äquivalent, während die mikroskopischen Ursachen völlig unterschiedlich sind.

Für die PdFe-Schichten würde man zunächst erwarten, dass die mikroskopischen Verhältnisse den einatomaren Fe-Monolagen ähneln. Allerdings sind in der einatomaren Fe-Schicht nur jeweils acht Atome an den Skyrmionen beteiligt, und die Skyrmionen existieren bei  $B = 0$ . Dagegen sind diese in den PdFe-Schichten mit einem Durchmesser von rund 5 nm und 270 beteiligten Atomen deutlich größer und zerfallen für Felder unter 1 T. Zusammen mit ihrer Magnetfeldabhängigkeit legt ihre Ausdehnung nahe, dass sich die Skyrmionen in den PdFe-Schichten und in chiralen Massivkristallen ähneln. Für letztere gibt es bereits

beeindruckend umfangreiche experimentelle Daten. So gelang es erst im vergangenen Mai, den Zerfall von Skyrmionen in chiralen Massivkristallen mittels magnetischer Kraftmikroskopie zu untersuchen [6]. Demnach gibt es einen generischen Mechanismus, durch den einzelne Skyrmionen zerfallen, weil die Magnetisierung auf einer lokalen Längenskala verschwindet. Während in [6] solche Zerfälle zufällig aufgrund thermischer Fluktuationen auftraten, zeigen die Hamburger Physiker durch eine sorgfältige Analyse ihrer Daten, dass die Spinströme aus der Tunnelspitze ihres Mikroskops die Fluktuationen zwischen Ferromagnet und Skyrmionen treiben. Könnte man nun also zeigen, dass Spinströme die Magnetisierung in den PdFe-Schichten lokal unterdrücken, hätte man einen generischen mikroskopischen Mechanismus zur Erzeugung und Vernichtung topologisch unterschiedlicher Zustände in magnetischen Materialien identifiziert.

„Spiegel online“ und „Le Monde“ haben die Arbeiten von Romming et al. bereits als Durchbruch auf dem Weg zum kleinsten magnetischen Speicher gefeiert. Mal ehrlich – mit 270 Atomen pro Bit wären diese im Vergleich zu anderen Meldungen der vergangenen Jahre ziemlich groß. Das wirkliche Potenzial verbirgt sich vielmehr in den nicht trivialen topologischen Eigenschaften. Diese bedeuten nicht nur Stabilität – und damit einen Fortschritt bei einem der großen Probleme konventioneller magnetischer Speichermedien. Vielmehr lässt sich die Topologie eines Objekts durch eine so genannte geometrische Phase messen, die auch als Berry-Phase bekannt ist. Das Integral über diese Phase verschwindet für topologisch triviale Objekte, während es für Objekte mit nicht trivialer Topologie einen ganzzahligen Wert annimmt, die topologische Windungszahl. Dies hat weitreichende experimentelle Konsequenzen: Bewegt sich nämlich ein Leitungselektron durch ein Skyrmion und bleibt der Spin des Elektrons dabei immer parallel zur lokalen Spin-Polarisierung des

Skyrmions, so sammelt das Elektron eine endliche Berry-Phase auf. Die korrespondierende Änderung des quantenmechanischen Zustands des Elektrons lässt sich dabei als fiktives magnetisches Feld beschreiben, wobei dessen Wert exakt einem Flussquant multipliziert mit der Windungszahl entspricht. Ist die Windungszahl endlich, wird das Elektron abgelenkt und es kommt zu einem Hall-Signal, dem „topologischen Hall-Effekt“ [7]. Da das Skyrmion dabei den Impuls für die Richtungsänderung des Elektrons zur Verfügung stellt, bewegt es sich selbst bei extrem kleinen Stromdichten [8]. Für Anwendungen wie magnetische Speicher verbinden sich somit mit der Topologie völlig neue Wege der Manipulation.

Objekte mit nicht trivialer Topologie in magnetischen Schichten eröffnen aber nicht nur neue Wege für Anwendungen, sie sind genauso für die Grundlagenforschung faszinierend. Da sich mit der Windungszahl ein ganzzahliges fiktives Flussquantum verbindet, bedeuten Erzeugen und Vernichten eines Skyrmions, dass sich das fiktive Feld um ein Flussquantum ändert. Mikroskopisch geschieht dies an jenem Ort, an dem die Magnetisierung lokal verschwindet. Da dieser Ort quasi die Information eines entstehenden bzw. verschwindenden fiktiven Flussquants trägt, lässt er sich als magnetischer Monopol interpretieren. Das heißt, die Spitze des Tunnelmikroskops emittiert bzw. absorbiert in diesem Sinn „fiktive“ magnetische Monopole, um Skyrmionen zu erzeugen bzw. vernichten.

Christian Pfeleiderer

- [1] N. Romming et al., *Science* **341**, 636 (2013)
- [2] Selected Papers, with Commentary, of Tony Hilton Royle Skyrme, hrsg. von G. E. Brown, World Scientific Series in 20th Century Physics Vol. 3, World Scientific, Singapore (1994)
- [3] S. Mühlbauer et al., *Science* **323**, 915 (2009)
- [4] X. Z. Yu et al., *Nature* **465**, 901 (2010)
- [5] S. Heinze et al., *Nat. Phys.* **7**, 713 (2011)
- [6] P. Milde et al., *Science* **340**, 1076 (2013)
- [7] A. Neubauer et al., *Phys. Rev. Lett.* **102**, 186602 (2009)
- [8] F. Jonietz et al., *Science* **330**, 1648 (2010), T. Schulz et al., *Nat. Phys.* **8**, 301 (2012)

## Neugierig?



Jetzt auch als E-Books unter:  
[www.wiley-vch.de/ebooks](http://www.wiley-vch.de/ebooks)

HANS-JÜRGEN QUADBECK-SEEGER

### Aphorismen und Zitate über Natur und Wissenschaft

ISBN: 978-3-527-33613-5

2013 340 S. mit 200 farbigen Abbildungen.

Gebunden € 24,90



Gewohnt inspirierend, witzig und zum Nachdenken anregend beschreibt Hans-Jürgen Quadbeck-Seeger nichts weniger als das Leben in all seinen (naturwissenschaftlichen) Facetten. Die Sammlung an Aphorismen von Literaten, Wissenschaftlern und berühmten Staatsmännern reicht dabei von A wie Konrad Adenauer bis Z wie Konrad Zuse. Die Untergliederung in verschiedenste Themenbereiche ermöglicht es, stets den gerade passenden Sinnspruch – für den Tag oder für den Vortrag – zu finden. Mit hochwertigem Leineneinband!

„... Ein Vergnügen für jeden, der Dinge gerne mit wenigen Worten auf den Punkt bringt.“

Aus einer Buchbesprechung in DIE WELT

[www.wiley-vch.de/sachbuch](http://www.wiley-vch.de/sachbuch)

Wiley-VCH • Tel. +49 (0) 62 01-606-400

Fax +49 (0) 62 01-606-184

E-Mail: [service@wiley-vch.de](mailto:service@wiley-vch.de)

WILEY-VCH

Irrtum und Preisänderungen vorbehalten. Stand der Daten: August 2013