

Sein oder Nichtsein?

In dünnen Schichten wurden Antiskyrmionen sowie Skyrmion-Antiskyrmion-Paare nachgewiesen.

Davi R. Rodrigues und Karin Everschor-Sitte

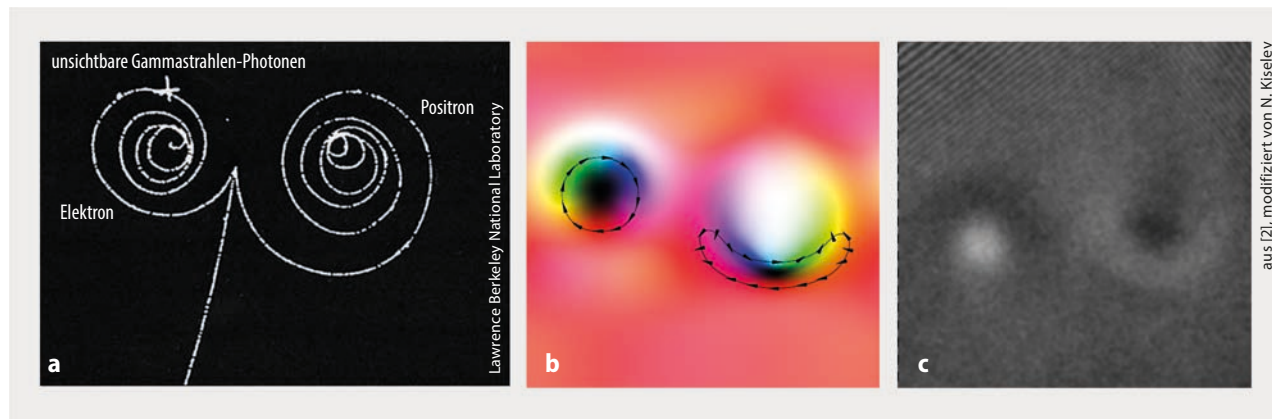


Abb. 1 Teilchen-Antiteilchen-Paarvernichtung eines Elektron-Positron-Paares (a) und eines simulierten (b) bzw. experimentell beobachteten Skyrmion-Antiskyrmion-Paares (c). Die Aufnahme in c) stammt von einem hochauflösenden Transmissions-Elektronenmikroskop.

Shakespeares Hamlet widmet sich in seinem Monolog „Sein oder Nichtsein“ der Frage, ob es sinnvoller ist, das Leben in dieser ungerechten Welt zu ertragen oder es zu beenden. Diese Dichotomie zwischen dem, was „ist“, und dem, was „nicht ist“, durchdringt die gesamte Struktur des Universums. Seit über hundert Jahren wissen wir, dass die gesamte Kausalität und Energieerhaltung des Universums nicht nur von der Existenz von Teilchen abhängen, sondern auch von deren Gegenstücken – den Antiteilchen. So sagte etwa Paul Dirac das Positron als Antiteilchen des Elektrons voraus. Antimaterie kann als das Gegenteil von Materie gelten: Treffen Teilchen und Antiteilchen aufeinander, vernichten sie sich, als hätten sie nie existiert. Zurück bleibt nur Energie in Form von Strahlung. Zudem verhält sich das Antiteilchen gemäß den gleichen physikalischen Gesetzen wie das zugehörige gewöhnliche Teilchen und hat zum Beispiel die gleiche Masse, aber die entgegengesetzte physikalische Ladung. Während sich Masse und Energie unter dieser Paarvernichtung ineinander umwandeln, bleiben physikalische Gesamtladungen erhalten.

Während es bei Shakespeare nach dem Tod keinen Weg zurück ins „Sein“ gibt, befindet sich das Univer-

sum in einem konstanten Wechselspiel aus „Sein“ und „Nichtsein“. Ist genügend Energie vorhanden, können Teilchen-Antiteilchenpaare quasi aus dem Nichts entstehen. Ein solches Wechselspiel ist auch an einem sonnigen Tag zu beobachten: Etwa zehn Prozent des sichtbaren Lichts, das derzeit von der Sonne auf die Erde trifft, entsteht bei der Annihilation von Elektronen und Positronen (**Abb. 1a**) [1]. Das Konzept der Antiteilchen geht weit über die Physik der Elementarteilchen hinaus. Am Forschungszentrum Jülich und der RWTH Aachen ist es nun in Zusammenarbeit mit Teams aus China und Schweden gelungen, erstmals magnetische Skyrmion-Antiskyrmion-Paare in dünnen Schichten einer Eisen-Germanium-Legierung experimentell nachzuweisen (**Abb. 1b, c**) [2].

Magnetische Skyrmionen sind teilchenartige magnetische Wirbel, bei denen die magnetischen Feldlinien so angeordnet sind, dass sie eine nicht-triviale topologische Windungszahl von 1 aufweisen. Antiskyrmionen tragen die entgegengesetzte topologische „Ladung“, während ein homogener ferromagnetischer Zustand topologisch trivial ist, d. h. eine Windungszahl von 0 hat. Allgemein sind beliebige magnetische Struk-

turen entsprechend ihrer Windungszahl zu charakterisieren. Ähnlich wie bei den Elementarteilchen sind Antiskyrmionen die „Antiteilchen“ der Skyrmionen, somit lassen sich Skyrmion-Antiskyrmion-Paare durch Umwandlung von Energie in Form von Spinwellen dynamisch erzeugen und vernichten. Das Konzept der Skyrmionen stammt aus der Hochenergiephysik [3]; das magnetische Gegenstück in kondensierter Materie verhält sich aber etwas anders. Während etwa für die Elementarteilchen (zumindest mit sehr hoher Genauigkeit) die Naturgesetze symmetrisch bezüglich Teilchen und Antiteilchen sind, gilt es bei den magnetischen Wirbeln, genauer hinzuschauen. Entscheidend ist hier, was diese magnetischen Strukturen energetisch stabil macht. In chiralen Magneten, in denen die Spiegelsymmetrie der Kristallstruktur des Materials explizit gebrochen ist, spielt eine von Dzyaloshinskii und Moriya vorhergesagte Wechselwirkung [4] eine wichtige Rolle. Die Symmetrien des Materials bestimmen die genaue Gestalt dieser Wechselwirkung. Typischerweise sind Skyrmionen energetisch bevorzugt, so auch in der aktuell betrachteten Eisen-Germanium-Legierung. Der erste experimentelle Nachweis von Skyrmi-

onen erfolgte 2009 in MnSi [5], das zur gleichen Materialklasse gehört. Im Jahr 2017 gelang in einer Materialklasse mit einer anderen Symmetrie der erste experimentelle Nachweis von magnetischen Strukturen, welche die Community weitläufig als Antiskyrmionen bezeichnet [6]. In dieser Materialklasse sind diese Antiskyrmion-Strukturen energetisch bevorzugt.

Interessant ist nun, dass das internationale Forscherteam beide Strukturen in einem Material entdeckte, das Skyrmionen favorisiert und in dem zuvor niemand Antiskyrmionen gefunden hatte. Hierzu nutzten die Forschenden einen genialen Trick. Sie präparierten ihre hochqualitative Probe ohne äußeres Magnetfeld in einem Zustand, in dem magnetische Helizes den energetischen Grundzustand bilden. Helizes zeigen sich im Experiment als dunkle und helle Streifen, entlang der die Magnetisierung des Materials aus der Ebene heraus bzw. in die Ebene hinein zeigt (**Abb. 2a**). Senkrecht zu diesen Streifen rotiert die Magnetisierung schraubenartig wie eine Helix. Doch nicht alle Helizes sind perfekt gleich ausgerichtet. Stattdessen sorgen die endliche Probengröße, mögliche Unreinheiten des Materials sowie Hysterese-Effekte für eine interessante Anordnung. Nach Anlegen eines Magnetfelds senkrecht zur Probe versucht sich die Magnetisierung des Materials, entlang des äußeren Magnetfeldes auszurichten. Die dunklen Bereiche vergrößern sich mit steigendem Magnetfeld (**Abb. 2b**);

die anfänglichen Streifen verändern nach und nach ihre Form, bis sie zum Teil auf kreisförmige Strukturen geschrumpft sind.

Durch das langsame Einschalten des Magnetfeldes bleiben die topologischen Indizes der ursprünglichen Strukturen erhalten. Da ein Feld von $B = 0$ weder $+1$ noch -1 bevorzugt, bleiben nicht nur Skyrmionen übrig, sondern auch Antiskyrmionen. Ein genügend starkes Magnetfeld löscht schließlich alle magnetischen Strukturen aus. Übrig bleibt ein ferromagnetischer Zustand. Dies ist ein wesentlicher Unterschied zur Teilchenphysik, wo die Ladung eine echte Erhaltungsgröße ist. Die Topologie der Skyrmionen und Antiskyrmionen bietet nur einen Schutz bis zu einer gewissen Energiebarriere.

Darüber hinaus hat das internationale Forscherteam Skyrmion-Antiskyrmion-Paare untersucht und herausgefunden, dass sich die beiden magnetischen Teilchen mit entgegengesetzter topologischer Windungszahl gegenseitig anziehen und sich durch stetige Deformation auslöschen.

Zusammengefasst haben die Forschenden in dieser Arbeit theoretisch simuliert und experimentell nachgewiesen, dass sich Helizes in Skyrmionen und Antiskyrmionen, die in einem ferromagnetischen Zustand eingebettet sind, transformieren lassen. Spannend ist auch, dass es bereits theoretische Vorhersagen gibt, wie Skyrmionen und Antiskyrmionen in den helikalen Phasen selbst

zu erzeugen sind [7]. Während die magnetischen Wirbel in den Eisen-Germanium-Filmen bei etwa -178°C auftraten, wurden Skyrmionen vor ein paar Jahren in Materialien bei Raumtemperatur entdeckt [8]. Daher stellt sich die Frage, ob es auch in letzteren gelingt, Antiskyrmionen zu realisieren. Ein grundlegendes Verständnis über diese topologischen magnetischen Strukturen, wie sie die aktuelle Arbeit liefert, ist notwendig, um topologische magnetische Strukturen im IT-Bereich nutzbar zu machen, wie die Community es diskutiert. Derzeit können wir nur spekulieren, ob Geräte, mit denen wir Hamlet in Zukunft lesen können, auf dem Arbeitsprinzip „Sein oder Nichtsein“ basieren.

- [1] B. Gato-Rivera, Antimatter, Springer Nature Switzerland (2021)
- [2] F. Zheng et al., Nat. Phys. **18**, 863 (2022)
- [3] T. H. R. Skyrme, Proc. R. Soc. Lond. A **260**, 127 (1961)
- [4] T. Moriya, Phys. Rev. **120**, 91 (1960); I. Dzyaloshinskii, J. Phys. Chem. Solids **4**, 241 (1958)
- [5] S. Mühlbauer et al., Science **323**, 915 (2009)
- [6] A. K. Nayak et al., Nature **548**, 561 (2017)
- [7] R. Knapman et al., J. Phys. D: Appl. Phys. **54**, 404003 (2021)
- [8] S. Woo et al., Nat. Mat. **15**, 501 (2016)

Die Autor:innen

Assist. Prof. Davi R. Rodrigues, Politecnico di Bari, Via E. Orabona 4, 70125 Bari, Italien, und **Prof. Dr. Karin Everschor-Sitte**, TWIST – Topological Whirls In SpinTronics, Universität Duisburg-Essen, Fakultät für Physik, Lotharstr. 1, 47057 Duisburg

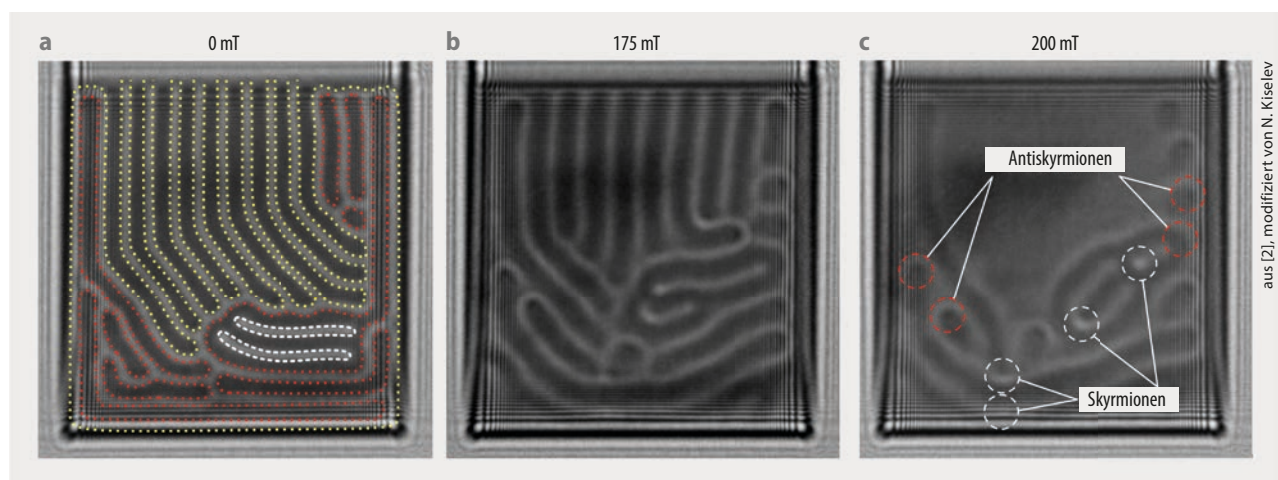


Abb. 2 Die Transmissions-Elektronenmikroskopie zeigt magnetische Helizes als dunkle und helle Streifen (a). Erhöht sich die angelegte Magnetfeldstärke, gehen die magnetischen Helizes (a) über eine teilweise unstrukturierte Phase (b) zu einzelnen Skyrmionen und Antiskyrmionen über (c).