

Skyrmionen – magnetische Wirbel als Datenspeicher

In bestimmten Festkörpern lassen sich magnetische Wirbelstrukturen, sogenannte Skyrmionen, erzeugen. Gemeinsam mit Physikern des Massachusetts Institute of Technology ist es unserer Gruppe von der Universität Mainz kürzlich gelungen, gezielt einzelne Skyrmionen bei Raumtemperatur in einem Festkörper durch Strominjektion zu verschieben. Das ist ein wichtiger Schritt auf dem Weg, Skyrmionen als zukünftige Datenspeicher einzusetzen.

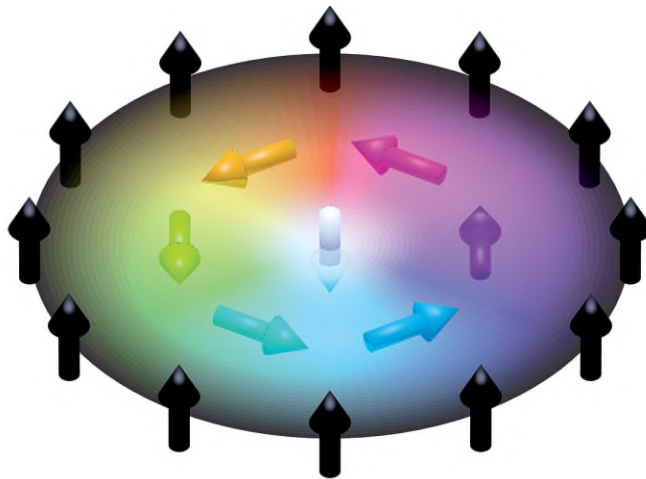


Abb. 1 Die magnetischen Momente im äußeren Bereich (schwarz) sind antiparallel zu den magnetischen Momenten im inneren Bereich (weiß). In der Domänenwand dazwischen sind alle denkbaren Orientierungen vertreten. Die Momente in der Domänenwand sind parallel zur Tangente der Domänenwand.

In Skyrmionen zeigt die Magnetisierung im Inneren in eine vom Material bevorzugte Richtung. Im äußeren Bereich weist sie in die entgegengesetzte Richtung. Im Übergangsbereich, der so genannten Domänenwand, rotiert die Magnetisierung stetig zwischen diesen beiden Zuständen. Aufgrund der Kompaktheit der Struktur windet sich die Domänenwand in eine geschlossene ringförmige Schleife (Abbildung 1) (Physik in unserer Zeit **2012**, 43(1), 6).

Charakteristisch für Skyrmionen ist, dass die magnetischen Momente innerhalb der Domänenwand immer den gleichen Winkel zur Tangente der Schleife aufweisen. Welchen Wert dieser Winkel annimmt, ist zunächst beliebig. In Abbildung 1 liegen die magnetischen Momente gerade entlang der Tangente, der

Winkel ist also 0° . Läuft man entlang der Schleife, so beobachtet man eine Drehung der magnetischen Momente um 360° . Diese Drehung verhindert, dass die Schleife durch kontinuierliche Transformationen annulliert werden kann. Man nennt diese stabilisierende Erhaltung unter kontinuierlichen Transformationen Topologie.

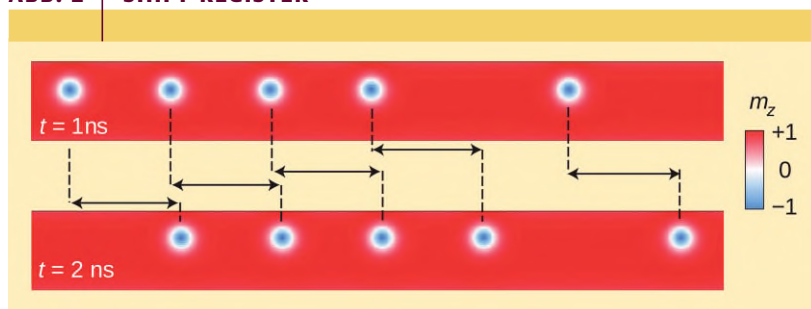
In der Praxis können Skyrmionen aufgrund der Topologie nur durch diskontinuierliche und daher hochenergetische Anregungen erzeugt oder vernichtet werden. Dieses Phänomen, genannt topologische Stabilität, ist unter anderem interessant für mögliche Anwendungen in magnetischen Datenspeichern, weil dadurch Skyrmionen bei gleicher thermischer Stabilität kleiner sein könnten als konventionelle magnetische Bits.

Ein weiterer Vorteil von Skyrmionen ist die Möglichkeit, sie innerhalb des magnetischen Materials effizient zu bewegen. Im Gegensatz zu bisher verwendeten Speichertechnologien, bei denen das magnetische Material in kleine Körner unterteilt ist und stets die Gesamtheit der magnetischen Momente eines Kornes in die gleiche Richtung zeigt, sind Skyrmionen nicht direkt an das Kristallgitter gekoppelt. Daher lassen sich Shift-Register realisieren, bei denen 0 oder 1 durch An- oder Abwesenheit eines Skyrmions realisiert wird und die Bit-Sequenz innerhalb des Materials zum Schreib-Lese-Kopf bewegt wird [1] (Abbildung 2) (Physik in unserer Zeit **2009**, 40(3), 138). Bei dieser Technologie muss kein Material bewegt werden, was den Einsatz des Datenspeichers potenziell robust, schnell und energieeffizient macht.

Magnetische Skyrmionen wurden bereits nach genau diesem Prinzip des Shift-Registers in den 1980er Jahren erfolgreich in kommerziellen Datenspeichern eingesetzt. Der wesentliche Nachteil der damaligen Technologie war, dass die Skyrmionen durch Gradienten in einem externen Magnetfeld bewegt wurden. Dieser Ansatz skaliert schlecht, wenn die Speicherdichte immer größer wird. Heutzutage kennen wir mehrere Möglichkeiten, durch spinpolarisierte Ströme Skyrmionen effizient in Nano-drähten zu bewegen. Neben dieser Entdeckung wurde die Renaissance der Skyrmionen getrieben durch die Erforschung einer Wechselwirkung, die den Winkel der magnetischen Momente in der Domänenwand stabilisiert. Diese so genannte Dzyaloshinskii-Moriya-Wechselwirkung (Physik in unserer Zeit **2008**, 39(2), 93) stabilisiert somit die Spinstruktur und damit die Topologie.

Um Skyrmionen in modernen Computersystemen einzusetzen, muss man diese auf der Nanometer- und Sub-Nanosekunderskala manipulieren können. Die Dynamik der Skyrmionen auf dieser Längen- und Zeitskala war bis vor kurzem technisch nicht möglich. Da Skyrmionen

ABB. 2 | SHIFT-REGISTER



Eine Bit-Sequenz, realisiert durch An- oder Abwesenheit von Skyrmionen (blau), wird synchron durch einen 1 ns langen Strompuls um genau eine Bitlänge verschoben. So kann die gewünschte Information zu einem Schreib-Lese-Kopf gebracht werden (nach [1] mit Erlaubnis von Macmillan Publishers Ltd., Nature, copyright 2013).

sich prinzipiell in alle Richtungen innerhalb der Ebene senkrecht zur Magnetisierung im Zentrum bewegen können, sind Abbildungen bisher die einzige Möglichkeit, die Bewegung eindeutig nachzuvollziehen. Technisch möglich sind solche dynamischen Abbildungen am Synchrotron mit hochintensiver, zeitlich gepulster, kohärenter Röntgenstrahlung. Die Röntgenstrahlung ist monochromatisch und zirkular polarisiert, weshalb sich mit ihr magnetische Strukturen abbilden lassen.

Zwei besonders geeignete Abbildungstechniken sind die Röntgen-

Rastertransmissionsmikroskopie und die Röntgenholographie. Mit beiden Techniken haben wir vor kurzem die ersten Videos von Skyrmionendynamik gedreht. Dabei konnte gezeigt werden, dass Skyrmionen aufgrund ihrer Topologie intrinsisch eine Kraft senkrecht zu ihrer Bewegung erfahren, die so genannte Gyrokraft. Sie bewirkt, dass sich Skyrmionen nach Abschalten einer Anregung auf komplexen Bahnen bewegen, aus denen sich wiederum ihre Topologie bestimmen lässt [2].

Bei der Translation von Skyrmionen in einem Prototypen eines Shift-

Registers beobachteten wir eine effiziente Bewegung von mehreren Skyrmionen synchron in einem Draht mit hoher Geschwindigkeit [3]. Wegen der Gyrokraft bewegen sich die Skyrmionen nicht komplett parallel zum Stromfluss, sondern unter einem Winkel. Das führt dazu, dass ein Skyrmion sich nicht nur entlang des Drahtes, sondern auch Richtung Rand des Drahtes bewegt. Dort hilft ihm auch seine topologische Stabilität nur begrenzt, da das Skyrmion aus dem Draht herausgedrückt werden kann, was einem Datenverlust entspricht. Dies zu verstehen und möglichst zu kontrollieren ist eine der Herausforderungen für zukünftige Anwendungen. Erste Ideen, um die Skyrmionen in der Drahtmitte zu halten, sind bereits vorgeschlagen worden und werden im nächsten Schritt experimentell realisiert.

Literatur

- [1] J. Sampaio et al. Nature Nanotech. **2013**, 8, 839.
- [2] F. Büttner et al. Nature Phys. **2015**, 11, 225.
- [3] S. Woo et al. Nature Mat., advance online pub. 29.2.2016, doi:10.1038/nmat4593.

*Felix Büttner, Mathias Kläui,
Uni Mainz*