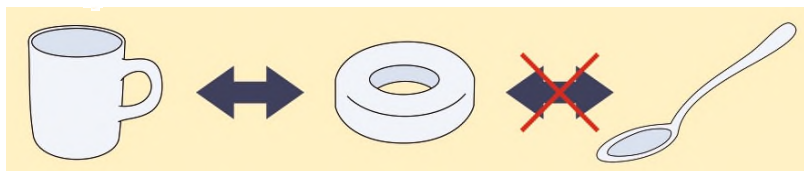


## MAGNETISMUS

### Ultraschnelle Erzeugung von Skyrmionen

Die elementaren magnetischen Momente benachbarter Atome ordnen sich in ferromagnetischen Materialien bevorzugt parallel zueinander an. Die gemeinsame Richtung der Magnetisierung wird dabei entweder durch das Material selbst oder von einem äußeren magnetischen Feld vorgegeben. In speziellen dünnen Schichten richten sich die magnetischen Momente bevorzugt senkrecht zur Oberfläche aus. In diesen Schichten können sich aber auch etwa 100 nm große Gebiete bilden, in denen sich die Magnetisierung wirbelartig eindreht und in der Mitte umgekehrt zur äußeren Richtung orientiert ist. Unserer Forschungsgruppe unter Leitung von Wissenschaftlern des Max-Born-Instituts (MBI) und Massachusetts Institute of Technology (MIT), USA, ist es gelungen, solche Skyrmionen mit Laserpulsen zu erzeugen und deren Dynamik zu vermessen.

ABB. 1 TOPOLOGIE

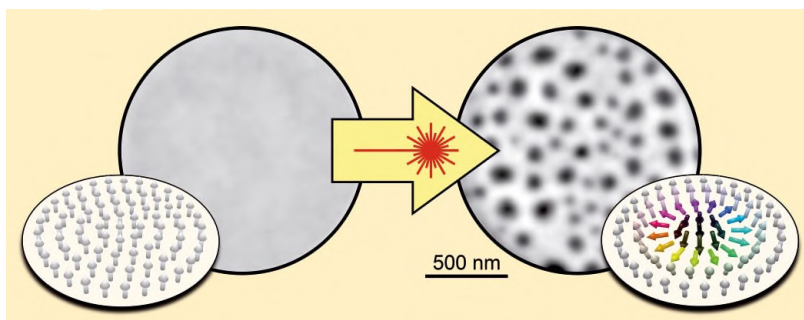


**Tasse und Donut haben gleiche, Löffel und Donut unterschiedliche Topologie. Vorstellen kann man sich das mit Körpern aus Modelliermasse: Durch geschicktes Bearbeiten ist es möglich, aus der Tasse einen Donut zu formen, ohne schneiden oder kleben zu müssen. Um aber einen Löffel in einen Donut zu modellieren, muss man an irgendeinem Punkt entweder das Donut-Loch in die Masse schneiden oder zwei Enden einer Rolle verkleben.**

Um die Struktur von Skyrmionen (Physik in unserer Zeit **2017**, 48(3), 118) zu beschreiben, wird auf das mathematische Konzept der Topologie zurückgegriffen, welche die Form

oder Geometrie beispielsweise von Körpern beschreibt (Physik in unserer Zeit **2014**, 45(6), 299; **2016**, 47(6), 272). Zwei Körper besitzen die gleiche Topologie, wenn sie nur

ABB. 2 SKYRMIONEN



**Röntgenmikroskopische Aufnahmen der Anordnung der magnetischen Momente in einer dünnen magnetischen Schicht. In den hellen Gebieten zeigt die Magnetisierung aus der Ebene heraus, in den dunklen hinein. Ein einzelner Laserpuls erzeugt in einer homogen magnetisierten Schicht (links) eine Vielzahl von Skyrmionen (dunkle Bereiche, rechts). Die Schemata zeigen die Orientierung der magnetischen Momente, dargestellt als Pfeile. Rechts ist ein einzelnes Skyrmion gezeigt.**

durch kontinuierliche Transformationen ineinander überführt werden können. Dazu zählen Dehnen, Stauchen, Verbiegen und Verdrehen, nicht aber Schneiden und Kleben. Das führt zu dem Ergebnis, dass eine Tasse und ein Donut die gleiche Topologie teilen, während Donut und Löffel sich anhand ihrer Topologie unterscheiden (Abbildung 1).

Ein Skyrmion unterscheidet sich von einer räumlich homogenen Magnetisierung (alle magnetischen Momente zeigen in die gleiche Richtung) eben durch seine Topologie. In einem physikalischen System muss für die Änderung der Topologie eine gewisse Energiebarriere überwunden werden. Diese topologische Energiebarriere erschwert die Erzeugung oder Vernichtung von Skyrmionen.

Wir haben nun demonstriert, dass Skyrmionen durch Beschuss der magnetischen Schicht mit einem wenige Femtosekunden kurzen, intensiven Laserpuls erzeugt werden können [1]. Abgebildet haben wir die Skyrmionen mit hochauflösender Elektronen- und Röntgenmikroskopie (Abbildung 2). Einen Einblick in den zeitlichen Ablauf des Erzeugungsprozesses lieferten Messungen am Röntgenlaser European XFEL in Hamburg. Im Vordergrund stand die Frage, wie die Skyrmionen entstehen und wann es dabei zur topologischen Umwandlung kommt, also im übertragenen Sinn geschnitten oder geklebt wird.

Dazu haben wir die Streuung der Röntgenstrahlen durch die Skyrmionen gemessen, noch während sich diese nach dem Laserbeschuss bilden. Überraschenderweise war die Änderung der Topologie schon nach 300 ps beendet. Damit lief die Erzeugung der Skyrmionen sogar schneller ab als die meisten, bisher beobachteten nicht-topologischen Änderungen von magnetischen Strukturen.

Der Vergleich der Daten mit theoretischen Simulationen zeigt, dass der Laser die magnetische Schicht soweit aufheizt, dass die ferromagnetische Ordnung in kleine, unabhängig voneinander fluktuierende Bereiche aufricht, in denen sich die Magneti-

sierungsrichtung rasant ändert. Im Gegensatz zum paramagnetischen Zustand ohne jegliche magnetische Ordnung wechselwirken die magnetischen Momente aber weiterhin lokal miteinander. In diesem heißen Zustand senkt sich die topologische Energiebarriere stark ab, sodass zusätzlich topologische Fluktuationen einsetzen, wobei kleine Skyrmionen ständig entstehen und wieder verschwinden. Wenn sich die magnetische Schicht in der Folge wieder abkühlt, frieren einige dieser Skyrmionen aus und wachsen weiter zu der Größe, wie in den mikroskopischen Aufnahmen beobachtet.

Technologisch sind Skyrmionen interessant, weil sich aus ihrer geringen Größe und ihrer Stabilität Perspektiven zur magnetischen Datenspeicherung ergeben. Die Möglichkeit, Skyrmionen mit elektrischen Strömen zu verschieben, hat zum Konzept des Skyrmionen-Racetrack-Memory geführt [2] (Physik in unserer Zeit **2016**, 47(3), 110). Dieser magnetische Speicher kommt ohne einen beweglichen Lese-Schreibkopf aus. Stattdessen werden die Skyrmionen-Bits entlang einer Leiterbahn zum Schreib- oder Lesekopf elektrisch verschoben. Die ultraschnelle optische Erzeugung von

Skyrmionen könnte das Schreiben der Bits schneller und energieeffizienter machen.

### Literatur

- [1] F. Büttner, B. Pfau et al., Nature Materials, Online-Publ., 5.10.20; <https://doi.org/10.1038/s41563-020-00807-1>.
- [2] A. Fert, V. Cros, J. Sampaio, Nature Nanotech. **2013**, 8, 152.

*Bastian Pfau, Max-Born-Institut Berlin; Felix Büttner, Helmholtz-Zentrum Berlin für Materialien und Energie, Berlin*