

■ Strom aus wandernden Wänden

Erstmals wurde der Strom gemessen, der durch die Bewegung magnetischer Domänenwände entsteht.

Die Wechselwirkung zwischen Strom und Magnetisierung zählt zu den intensiv erforschten Bereichen der Festkörperphysik und hat großes Anwendungspotenzial für Computer oder Sensoren. Ein Zeichen dafür ist nicht zuletzt der Physik-Nobelpreis, den Albert Fert und Peter Grünberg 2007 für ihre Erforschung des Einflusses der Magnetisierungskonfiguration auf den Stromtransport erhielten (Riesenmagnetowiderstand).

In letzter Zeit ist auch der inverse Effekt, der Einfluss von spin-polarisiertem Strom auf die Magnetisierung, ins Zentrum des Interesses gerückt. Dieser eröffnet einen alternativen Ansatz, um Magnetisierung zu manipulieren und magnetische Strukturen zu schalten (Abb. 1). Ein Vorschlag für einen Speicher, der auf der Manipulation magnetischer Domänenwände durch spin-polarisierte Ströme basiert, ist der „Racetrack-Speicher“ [1]. Bei diesem wird eine Serie von Domänenwänden synchron durch Injektion von Strom innerhalb eines Nanodrahtes in Elektronenflussrichtung verschoben.

Experimentell ist diese strominduzierte Domänenwandbewegung bereits vielfach realisiert und untersucht worden. Bei kleinen

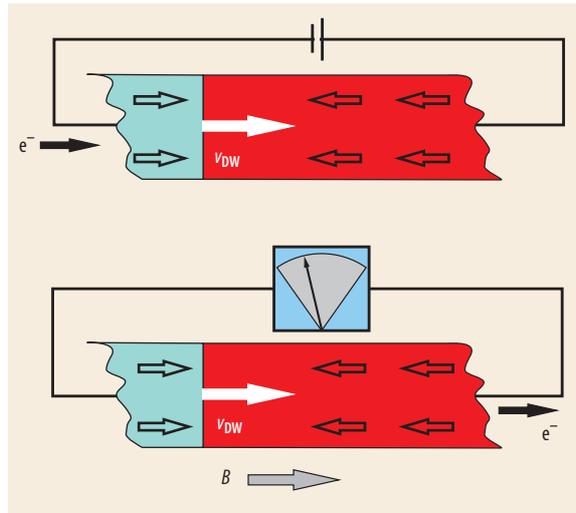


Abb. 1 Ein elektrischer Strom verschiebt die Wand zwischen den beiden magnetischen Domänen im Draht in Richtung des Elektronenflusses (oben). Beim inversen Effekt bewegt ein äußeres Magnetfeld (B) die Domänenwand und erzeugt dadurch einen Strom (unten).

Stromdichten bewegt sich die Wand, ohne ihre Spinstruktur zu ändern. Mit steigender Stromdichte wächst die Wandgeschwindigkeit linear bis zu einem Schwellenwert (Walker-Breakdown-Stromstärke), oberhalb dessen sich die Spinstruktur der Domänenwand periodisch umwandelt – z. B. von vortexförmiger zu transverser Struktur und zurück (Abb. 2). In der Folge verringert sich die Wandgeschwindigkeit und steigt erst mit weitaus größeren Stromdichten wieder an. Solche Umwandlungen ließen sich bereits nachweisen [2].

Daraufhin begann die Suche nach dem inversen Effekt, bei dem eine sich bewegende Domänenwand einen Strom erzeugt. Dieses Phänomen wurde theoretisch vorhergesagt und „spin-motive force“ getauft [3, 4]. Bereits 1984 hatte Luc Berger die sog. Ferro-Josephson-Spannung vorhergesagt, die auftritt, wenn sich eine Domänenwand unter hohen äußeren Magnetfeldern bewegt [5]. Bei Feldstärken über dem Walker-Breakdown-Feld transformiert sich die Domänenwandstruktur ebenfalls periodisch, und das magnetische Moment der Domänenwand präzediert. Dies ruft die Ferro-Josephson-Spannung hervor, die somit nur oberhalb des Walker-Breakdown-Feldes auftritt und ebenfalls einen Strom verursacht. Rechnungen zu den verschiedenen Effekten sagen un-

terschiedlich große Spannungen voraus. Bisher wurde allerdings keiner dieser Effekte experimentell nachgewiesen, obwohl die Idee eines entsprechenden Experimentes vergleichsweise einfach ist: Man erzeuge in einem Draht aus ferromagnetischem Material eine Domänenwand und bewege sie z. B. mithilfe eines äußeren Magnetfeldes B durch den Draht. An den Enden des Drahtes sollte dann die erzeugte Spannung messbar sein (Abb. 1). In der Praxis stehen dieser Messung allerdings viele Hindernisse wie vergleichsweise große Induktionsspannungen im Wege, die das sich ändernde äußere Magnetfeld erzeugt. Shengyuan Yang und seine Kollegen von der University of Texas konnten diese Schwierigkeiten nun überwinden [6].

Als Probe diente ihnen ein durch Nanostrukturierung erzeugter 35 μm langer Draht (500 nm breit, 20 nm dick) aus Permalloy ($\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$), der an einem Ende eine Verbreiterung zur Nukleation (Erzeugung) der Wand besitzt und am anderen Ende spitz zuläuft (Abb. 2). In diesem Draht weist die Magnetisierung wegen der dominierenden Form-Anisotropie der Struktur in Richtung des Drahtes. Domänenwände sind aufgrund der Breite und Dicke der Struktur in der untersuchten Probe vortexförmig, da dies die energetisch günstigste Konfiguration darstellt (Abb. 2, unten links).

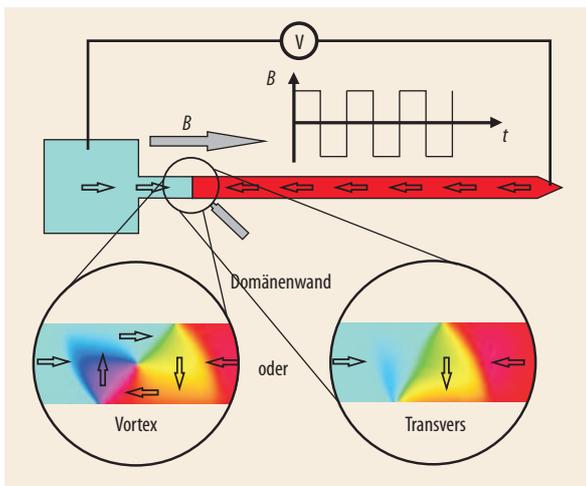


Abb. 2 Die von Shengyuan Yang et al. verwendete Nanostruktur mit der Vergrößerung der zwei Domänenwandstrukturen, zwischen denen sich die Domänenwand oberhalb des Walker-Breakdowns transformiert. Zu sehen ist die Richtung des externen Magnetfelds B (grauer Pfeil) und daneben die periodisch wechselnde zeitliche Feldrichtung.

Diese Struktur befindet sich in einem sich schnell ändernden (320 kHz) Magnetfeld B , das in Richtung des Drahtes gerichtet ist (Abb. 2, oben). Durch die gewählte Geometrie dreht sich bei hinreichend großen Feldamplituden zuerst die Magnetisierungsrichtung im Nukleationsbereich um, und die entstandene Domänenwand wird von diesem Ende aus in den Draht injiziert. Sie durchläuft den Draht in einer Halbperiode des Feldes, bevor in der darauf folgenden Halbperiode die nächste injizierte Wand vom Nukleationsbereich aus den Draht durchläuft. Die zwei Domänenwände erzeugen während ihrer Bewegung eine identische Spannung. Die Periode wurde dabei so gewählt, dass sie der doppelten Durchlaufzeit einer Domänenwand entspricht. Dadurch wird in dem Moment, in dem eine Domänenwand den Draht vollständig durchlaufen hat, eine neue in den Draht injiziert.

Die zu messende Spannung lässt sich an den zwei Enden des Drahtes

abgreifen und mit einem Lock-In-Verstärker detektieren. Dieser ist an ein wesentlich langsamer variierendes Magnetfeld gekoppelt, das dem ersten Feld überlagert ist und wahlweise die Nukleation von Domänenwänden zulässt oder unterbindet. Durch diese geschickt gewählte Anordnung ist es möglich, die verhältnismäßig große Induktionsspannung, die durch das schnell variierende Magnetfeld erzeugt wird, von der deutlich kleineren Spannung zu trennen, die durch die Bewegung der Domänenwand entsteht. Damit waren die Autoren in der Lage, ein Messsignal von wenigen 100 nV zu extrahieren.

Ergänzend haben die Physiker aus Texas mittels magneto-optischem Kerr-Effekt die Domänenwandgeschwindigkeit gemessen. Dabei zeigte sich, dass die Domänenwand bei kleinen Feldern zwar den Draht durchläuft, sich aber keine Spannung detektieren lässt. Erst oberhalb des Walker-Breakdown-Feldes konnten Yang und seine Kollegen eine Spannung nachweisen.

Damit ist es erstmals gelungen, den durch die Ferro-Josephson-Spannung hervorgerufenen Strom zu bestimmen, den die Präzession des Vortexkernes hervorruft. Damit haben die Texaner mit ihrer Messung ein neues Kapitel im vielfältigen Bereich der Spintronik aufgeschlagen.

Die Frage nach der allein durch die Bewegung der Domänenwand in Drahrichtung erzeugten „spinmotive force“ ist allerdings noch offen. Laut Rechnungen müsste diese mindestens einen Faktor 10 kleiner sein [4].

Philipp Möhrke und Mathias Kläui

- [1] S. S. P. Parkin et al., *Science* **320**, 190 (2008)
- [2] L. Heyne et al., *Phys. Rev. Lett.* **100**, 66603 (2008)
- [3] S. E. Barnes und S. Maekawa, *Phys. Rev. Lett.* **98**, 246601 (2007)
- [4] R. A. Duine, *Phys. Rev. B* **77**, 14409 (2008)
- [5] L. Berger, *J. Appl. Phys.* **55**, 1954 (1984)
- [6] S. A. Yang et al., *Phys. Rev. Lett.* **102**, 067201 (2009)

Philipp Möhrke und **Priv.-Doz. Dr. Mathias Kläui**, ERC Research Group Nanomagnetism, Fachbereich Physik, Universität Konstanz, Universitätsstraße 10, 78464 Konstanz