

Magnetische Wirbel unter der Lupe

Erstmals ist es gelungen, magnetische Wirbelstrukturen mit hoher Auflösung direkt zu untersuchen.

Wirbel- oder Vortex-Strukturen sind aus vielen Bereichen der Natur bekannt. Sie entstehen beim Leeren der Badewanne, als Stromwirbel in Supraleitern, durch die ein Magnetfeld in den Supraleiter eindringen kann, oder auch als quantisierte Wirbel in Bose-Einstein-Kondensaten. Dass auch die Magnetisierung in Ferromagneten Vortexstrukturen bilden kann, ist seit langem bekannt – Feldtkeller und Thomas haben bereits 1961 über magnetische Wirbel berichtet, die in Domänenwänden von dünnen ferromagnetischen Schichten eingebettet sind [1]. Vierzig Jahre hat allerdings gedauert, bis es jetzt möglich geworden ist, magnetische Vortices mit hoher Auflösung direkt zu untersuchen [2].

Ferromagnetische Domänen, in denen alle Spins parallel ausgerichtet sind, bilden sich in makroskopischen magnetischen Körpern, weil deren Streufeldenergie dadurch reduziert wird. Wenn die Abmessungen der Magnete nicht mehr groß gegen die Dicke der Domänenwände sind, lassen sich neue Phänomene beobachten. So findet man z. B. in Kreisscheibchen aus Permalloy ($\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$), die Durchmesser von ca. 100 μm bis unter 1 μm und

eine Dicke von einigen zehn Nanometern haben, einen magnetischen Wirbel als Grundzustand. In diesem liegen die Spins in der Ebene und folgen dem Rand auf Kreisen (Abb. 1). Diese Spinstruktur lässt sich z. B. mittels Lorentz-Mikroskopie, bei der in einem Transmissionselektronenmikroskop die Ablenkung des Elektronenstrahls aufgrund der Lorentz-Kraft detektiert wird, direkt im Experiment beobachten [3, 4]. Nähert man sich jedoch dem Vortekern, so kann diese Konfiguration nicht mehr aufrecht erhalten werden, da die Austauschwechselwirkung eine parallele Ausrichtung benachbarter Spins verlangt. Im Falle des magnetischen Wirbels bedeutet dies, dass bei einer planaren Konfiguration die Dichte der Austauschenergie im Vortekern unendlich groß sein würde oder dass dem singulären Punkt keine definierte Magnetisierung zugeschrieben werden könnte. Um dieses Problem zu lösen, wurde angenommen, dass die Magnetisierung im Kern des Wirbels, wie in Abbildung 1 skizziert, senkrecht zur Schichtebene steht [1]. Erst vor kurzem gelang es in Regensburg [3], und unabhängig davon einer japanischen Gruppe [5], diese senkrechte Komponente mit Magnetkraftmikroskopie (MFM) nachzuweisen. Bei dieser Methode wird ein Rasterkraftmikroskop mit einer ferromagnetischen Spitze benutzt. Mit dem MFM war zwar der erste experimentelle Nachweis der Sin-

gularität im Vortekern gelungen, zur Untersuchung der detaillierten Struktur der senkrechten Komponente und damit zur Überprüfung der theoretischen Vorhersagen zur Form und Ausdehnung des Vortekerns [1] reicht diese Methode jedoch nicht aus. Dies liegt zum einen an der beschränkten lateralen

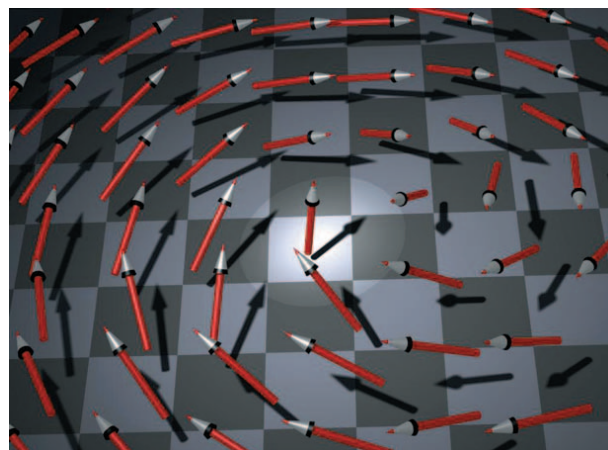


Abb. 1: Bei magnetischen Wirbelstrukturen zeigt die Magnetisierung in Richtung Zentrum immer stärker an der Ebene herauf; im Zentrum steht sie senkrecht auf der Oberfläche. (aus [2])

Auflösung eines MFM, die zwischen 20 nm und 100 nm liegt, und zum anderen an der unvermeidlichen Beeinflussung der zu untersuchenden Vortexstruktur durch die magnetische Spitze.

Der Arbeitsgruppe um R. Wiesendanger und M. Bode an der Universität Hamburg gelang es nun, die innere Struktur eines magnetischen Vortekerns zu bestimmen [2]. Sie benutzten die neu entwickelte Methode der Spin-polarisierten Rastertunnelmikroskopie (SP-RTM), die es erlaubt, Spinstrukturen auf ato-

KURZGEFASST...

Schwarzes Loch im Zentrum der Milchstraße

Bereits seit einigen Jahren verdichten sich die Hinweise darauf, dass sich im Zentrum der Milchstraße ein supermassives Schwarzes Loch befindet (vgl. Phys. Blätter, Januar 1998, S. 25). Ein internationales Astronomen-Team um Reinhard Genzel vom MPI für extraterrestrische Physik in Garching hat nun einen überzeugenden Beweis für diese Annahme veröffentlicht: Sie beobachteten einen Stern, der das Milchstraßenzentrum auf einer stark elliptischen Bahn innerhalb von nur ca. 15 Jahren umkreist [Schödel et al., Nature **429**, 694 (2002)]. Der Stern läuft damit fast 200mal schneller um das Zentrum als die Erde um die Sonne. In dem mit SgrA* bezeichneten Zentrum, aus dem starke Radio- und Röntgenstrahlung entspringt, müssen demnach ca. drei Millionen Sonnenmassen in einem Gebiet von nur zehn Lichttagen Durchmesser konzentriert sein.

Antiwasserstoff, zum zweiten

Nur wenige Wochen, nachdem die ATHENA-Kollaboration am CERN ein Etappenziel auf dem Weg zu kalten, gespeicherten Antiwasserstoff-Atomen erreicht hat (vgl. Physik Journal, November 2002, S. 21), meldet die konkurrierende ATRAP-Kollaboration einen weiteren Durchbruch [G. Gabrielse et al., Phys. Rev. Lett. **89**, 213401 (2002)]. Indem die ATRAP-Kollaboration, an der Physiker des MPI für Quantenoptik, des FZ Jülich sowie der LMU München beteiligt sind, die entstandenen Antiwasserstoff-Atome durch Feldionisierung nachweist, erhält sie im Gegensatz zu ATHENA ein reines Signal ohne Untergrund. Zudem erlaubt die elektrische Feldstärke, die nötig ist, um das Atom zu ionisieren, eine erste Aussage über den Quantenzustand, in dem die Atome erzeugt werden. Sie entstehen demnach in hochangeregten Rydberg-Zuständen mit Quantenzahlen n um 50.

Attosekunden-Spektroskopie in Krypton

Physikern aus Bielefeld und Wien ist es erstmals gelungen, die Dynamik eines Elektrons in einem Atom mit einer Auflösung im Attosekundenbereich zu verfolgen [M. Drescher et al., Nature **419**, 803 (2002)]. In einem sog. Pump-Probe-Experiment strahlten sie zunächst einen Laserpuls im weichen Röntgenbereich und mit einer Dauer unter 1 fs auf Krypton-Atome, die dadurch ein tiefgebundenes Elektron aus der M-Schale als Photoelektron emittieren. Das entstehende Loch wird innerhalb weniger Femtosekunden durch ein äußeres Elektron aufgefüllt, dessen Energie ein weiteres emittiertes Elektron, ein sog. Auger-Elektron, davon trägt. Mit einem zweiten, wenige fs langen Laserpuls, dem Probe-Puls, haben Drescher et al. die Energie des Auger-Elektrons in Abhängigkeit von der Zeitverzögerung zwischen beiden Laserpulsen gemessen. Daraus ergibt sich eine Lebensdauer des Lochs von $7,9^{+1,0}_{-0,9}$ fs.

marer Skala aufzulösen [6]. Im Experiment wurde eine antiferromagnetische Spitze verwendet, deren Spinpolarisation durch das „unterste“ Atom gegeben ist. Auf diese Weise lässt sich die magnetische Wechselwirkung zwischen Spitze und Probe praktisch völlig unterdrücken. Die im Experiment an jedem Punkt der Probe gemessene differentielle Leitfähigkeit enthält einen Term, der nur von der Spinpolarisation der Spitze (der des untersten Spitzenatoms), derjenigen

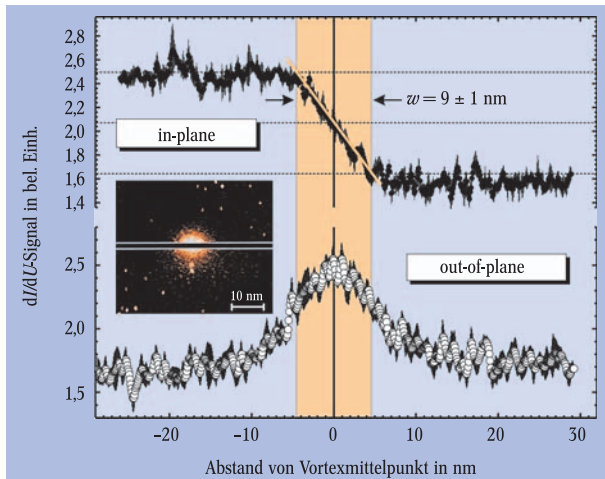


Abb. 2: Die differentielle Leitfähigkeit ist ein Maß für Magnetisierung. Bewegt man die Spitze des Rastertunnelmikroskops längs der im Insert gezeigten Linien durch den magnetischen Wirbel, so wechselt die Magnetisierung in der Ebene („in-plane“) das Vorzeichen, während die Magnetisierung senkrecht dazu („out-of-plane“) im Wirbelkern maximal wird. Die Breite w des Wirbelkerns beträgt rund 10 nm. Der Insert zeigt die „out-of-plane“-Komponente der Magnetisierung. (aus [2])

der Probe und dem Winkel zwischen der Magnetisierung von Probe und Spitze abhängt. Damit ist es möglich, bei festgehaltenem magnetischem Moment der Spitze direkt die lokale Magnetisierung der Probe mit atomarer Auflösung zu vermessen.

Die SP-RTM setzt Ultrahochvakuum (UHV) und adsorbatfreie Oberflächen voraus, sodass sich die üblichen nanostrukturierten Proben nicht eignen. Statt dessen nutzte die Hamburger Gruppe das selbstorganisierte Wachstum von Eisen auf (110)-Einkristalloberflächen von Wolfram. Dort bilden sich nach dem Aufdampfen von etwa zehn Monolagen Eisen unter geeigneten Bedingungen ovale Inseln mit Abmessungen von 200–500 nm in der langen und 150–250 nm in der kurzen Richtung, deren typische Dicke etwa 8–9 nm beträgt. Wie die lithographisch hergestellten Kreisscheiben weisen auch diese Proben ei-

nen Vortextkern auf, der mittels der Spin-polarisierten Tunnelmikroskopie untersucht werden kann. Verwendet man Spitzen mit magnetischem Moment parallel bzw. senkrecht zur Oberfläche, so lässt sich die Magnetisierung sowohl in der Ebene als auch senkrecht dazu bestimmen (Abb. 2). Die gemessene Breite des Vortextkerns liegt bei 9 ± 1 nm, in guter Übereinstimmung mit der theoretisch abgeschätzten Breite von 6,4 nm. Die experimentellen Ergebnisse bestätigen damit nach langer Zeit die theoretischen Vorhersagen zur Ausdehnung und Form des Vortextkerns, die im Limes verschwindend dünner Scheiben nur von der material-spezifischen Austauschkonstante und der Sättigungsmagnetisierung abhängen sollten.

Mit der Entwicklung der Spin-aufgelösten Rastertunnelmikroskopie sind die Hamburger Physiker einem lange gehegten Traum der Magnetiker, nämlich der Abbildung magnetischer Strukturen mit atomarer Auflösung und Einzelspin-Empfindlichkeit, einen großen Schritt nähergekommen. Die Auflösung der inneren Spinstruktur des Vortextkerns ist dafür ein weiteres eindrucksvolles Beispiel, welches sicher auch zur zukünftigen Weiterentwicklung magnetischer Speicher mit höchster Datendichte beitragen wird.

GÜNTER BAYREUTHER UND
DIETER WEISS

- [1] E. Feldtkeller und H. Thomas, Phys. Kondens. Mater. **4**, 8 (1965).
- [2] A. Wachowiak, J. Wiebe, M. Bode, O. Pietsch, M. Morgenstern, R. Wiesendanger, Science **298**, 577 (2002).
- [3] J. Raabe, R. Pulwey, R. Sattler, T. Schweinböck, J. Zweck, D. Weiss, J. Appl. Phys. **88**, 4437 (2000).
- [4] M. Schneider, H. Hoffmann, J. Zweck, Appl. Phys. Lett. **79**, 3113 (2001).
- [5] T. Shinjo, T. Okuno, R. Hassdorf, K. Shigeto, T. Ono, Science **289**, 930 (2000).
- [6] M. Bode, M. Getzlaff, R. Wiesendanger, Phys. Rev. Lett. **81**, 4256 (1998); S. Heinze, M. Rode, A. Kubetzka, O. Pietzsch, X. Nie, S. Blügel, R. Wiesendanger, Science **288**, 1805 (2000); Eine alternative Methode wurde vorgestellt von W. Wulfhekel, J. Kirschner, Appl. Phys. Lett. **75**, 1944 (1999).

Hintergründige Polarisation

Die kosmische Mikrowellen-Hintergrundstrahlung ist linear polarisiert – im Einklang mit kosmologischen Modellen des Urknalls

In den letzten Jahren vollzog sich eine Revolution in der Kosmologie: Präzise Messungen der Temperaturschwankungen im Mikrowellenhintergrund bestätigten eindrucksvoll das Urknallmodell, untermauerten die Idee der kosmologischen Inflation und erlaubten es erstmalig, kosmologische Parameter genau zu bestimmen. Der zugrundeliegende physikalische Mechanismus ist anschaulich zu verstehen: Hochsymmetrische, allgemein-relativistische Weltmodelle fordern, dass das Universum aus einem heißen, dichten Anfangszustand entstand. Zunächst war es undurchsichtig, weil Photonen an den vorhandenen Ladungen gestreut wurden. Als es nach 400000 Jahren genügend abgekühlt war, dass Atome entstehen konnten, wurde es durchsichtig. Die Photonen konnten sich von da an ungehindert ausbreiten. Sie verloren Energie durch die kosmische Expansion, umgeben uns aber heute noch als kosmischer Mikrowellenhintergrund (Cosmic Microwave Background, CMB) [1].

Der weitaus überwiegende Teil der Materie im Universum wechselwirkt nicht elektromagnetisch und wird daher Dunkle Materie genannt. Kosmische Strukturen wie Galaxien und Galaxienhaufen entstanden durch Gravitationskollaps aus winzigen Schwankungen in der Dichte der Dunklen Materie, die schon sehr früh im Universum angelegt worden waren. Diese „Saatfluktuationen“ prägten dem CMB Temperaturschwankungen auf, die wiederum das beigemischte kosmische Plasma aus geladenen Teilchen komprimierten. Dessen Druck stieg, bis er der Gravitation die Waage halten konnte, dann expandierte das Plasma wieder, wodurch der Druck sank und die Gravitation wieder zu komprimieren begann. Wenn diese akustischen Schwingungen phasenkorreliert einsetzten, was etwa im Modell der kosmologischen Inflation möglich ist, sollten die Temperaturschwankungen im CMB charakteristische Muster zeigen, deren Größe durch die Wellenlänge der Grundschwingung und ihrer Obertöne bestimmt ist (vgl. [2]).

Prof. Dr. Günter Bayreuther und Prof. Dr. Dieter Weiss, Institut für Angewandte und experimentelle Physik, Universität Regensburg, 93040 Regensburg