

neue, weit entfernte Supernovae gefunden und ausgemessen. Die Entfernungen sind so groß, dass die Mehrheit der beobachteten Supernovae explodierten, bevor unsere Sonne und die Erde entstanden (vor 5 bzw. 4,5 Milliarden Jahren). Bei den entferntesten Supernovae blickt man neun Milliarden Jahre zurück. Die Leuchtkräfte der Typ-Ia-Supernovae lassen sich nun so normieren, dass man die genauen Entfernungen zu ihnen ermitteln kann. Mit diesen Maßstäben gelang es Riess et al., die Expansionsrate als Funktion der Rotverschiebung zu bestimmen. Es zeigt sich, dass das Universum in der Vergangenheit schneller expandierte. Allerdings ist in den letzten circa sechs Milliarden Jahren die Abbremsung von einer Beschleunigung überlagert worden. Die Expansion verlangsamt sich zwar immer noch, nur nicht so schnell, wie in den einfachsten kosmologischen Modellen erwartet. Die Analyse in der

neuen Publikation beschreibt die Beschleunigung in einer modellunabhängigen und überzeugenden Weise.

Es ist extrem wichtig, die Eigenschaften der Dunklen Energie so vielfältig wie möglich zu untersuchen. Die neuen Daten weisen darauf hin, dass die kosmologische Konstante die Messergebnisse immer noch ausgezeichnet beschreibt. Modelle einer zeitabhängigen Dunklen Energie werden mit den neuen Daten einigermäßen eingeschränkt, allerdings müssen dazu auch andere, unabhängige Messungen miteinbezogen werden. Die Bestimmung der mittleren Massedichte, z. B. mittels der baryonischen akustischen Oszillationen in Verbindung mit den Inhomogenitäten des Mikrowellenhintergrundes, wie sie mit der Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) gemessen wurden, hilft da sehr.

Die entfernten Supernovae erlauben Riess und Kollegen auch

eine Untersuchung über die „Stärke“ der Dunklen Energie bei hoher Rotverschiebung. Sie haben dabei festgestellt, dass die Effekte der Dunklen Energie auch schon bei hohen Rotverschiebungen vorhanden sind. Dies ist im Rahmen von Modellen, in denen die Dunkle Energie erst kürzlich bestimmend wurde, schwer zu erklären.

Die Eigenschaften der Dunklen Energie müssen besser vermessen werden, bevor die Modelle weiter eingeschränkt werden können. Die entfernten Supernovae, die von Riess und seinen Kollegen beobachtet wurden, sind ein wichtiger Schritt in dieser Richtung.

**Bruno Leibundgut**

**Dr. Bruno Leibundgut**, European Southern Observatory, Karl-Schwarzschild-Straße 2, 85748 Garching

- [1] A. Riess et al., *The Astrophysical Journal* **656**, 10. Februar 2007, astro-ph/0611572  
 [2] vgl. D. Giulini und N. Straumann, *Physikal. Blätter*, November 2000, S. 41; C. Wetterich, *Physik Journal*, Dezember 2004, S. 43

## ■ Der Dreh mit dem Magnetismus

**Magnetische Wirbel lassen sich mit überraschend schwachen und kurzen magnetischen Pulsen schalten und eröffnen Aussichten auf leistungsfähige Datenspeicher**

**O**bgleich bereits mehrfach totgesagt, sind magnetische Medien seit Ende der 1950er-Jahre als permanente Datenspeicher im Einsatz, wobei sowohl bezüglich der Datendichte als auch bei der Lese- und Schreibgeschwindigkeit faszinierende Fortschritte gemacht wurden. Zwar bestehen diese Medien – wie bereits die magnetischen Bänder in der Frühzeit der magnetischen Datenspeichertechnik – noch immer aus granularen Filmen, dennoch erreichen z. B. moderne Festplatten eine Speicherdichte von 100 Gbit/Inch<sup>2</sup> bei einer Schreibgeschwindigkeit von ca. 100 MHz.

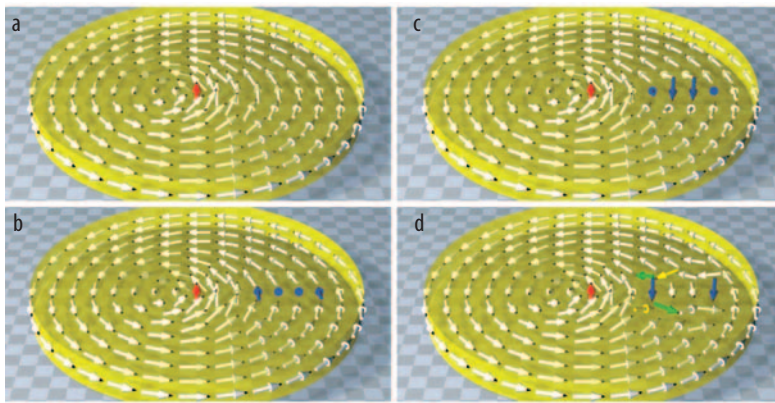
Solch granulare Medien bestehen aus winzigen Körnern, die sich recht gut als eindomänig, d. h. homogen magnetisiert, verstehen lassen. Daraus ergeben sich jedoch einige grundlegende Probleme, die einer weiteren Verbesserung der Performance im Wege stehen:

Einerseits besitzt jedes Korn dort, wo der Vektor der Magnetisierung senkrecht zu seiner Korngrenze steht, ein magnetisches Streufeld, über welches benachbarte Partikel wechselwirken. Dies führt zu unerwünschten Kopplungseffekten. Des Weiteren sinkt mit dem Kornvolumen auch die magnetische Anisotropieenergie, die ihre Ursache in der Spin-Bahn-Kopplung hat, zu einer Vorzugsrichtung der Magnetisierung führt und diese z. B. gegen thermische Fluktuationen stabilisiert. Unterhalb einer kritischen Größe, dem „superparamagnetischen Limit“, ändert die Magnetisierung allein durch thermische Anregungen ihre Richtung, was unweigerlich zum Datenverlust führt. Schließlich ist die Geschwindigkeit, mit der eindomänige Partikel ummagnetisiert werden können, durch die Präzessionsfrequenz limitiert, sodass sich selbst unter Ausnutzung

ausgefeilt getakteter Feldverläufe eine „Schallmauer“ von ca. 150 ps nicht unterschreiten lässt [1].

Deshalb wurde seit langem darüber nachgedacht, die besonderen Eigenschaften sehr flacher Nanopartikel zu nutzen. Hier führt die Minimierung der im Wesentlichen aus Austausch- und Streufeldenergie bestehenden Gesamtenergie zu einer Wirbelbildung [2]. Dabei lassen sich Diskontinuitäten nur durch einen senkrecht magnetisierten Bereich im Zentrum vermeiden (**Abb. a**). Der Durchmesser dieses sog. Wirbelkerns, der schon lange vorhergesagt [3], aber erst kürzlich direkt gemessen werden konnte [4], beträgt nur etwa 10 nm.

Diese außergewöhnliche magnetische Konfiguration bietet gleich mehrere Vorzüge: Drehsinn des Wirbels und Ausrichtung des Wirbelkerns lassen sich unabhängig voneinander einstellen, wodurch



**Abb.** Magnetischer Wirbel in einer dünnen Scheibe. Der hier gezeigte Wirbel dreht gegen den Uhrzeigersinn, der Wirbelkern ist nach oben magnetisiert. Aufgrund der Tatsache, dass die Magnetisierung des Wirbels immer tangential zu seinem Rand ausgerichtet ist, besitzt er kein Streufeld. Die Ergebnisse von

Van Waeyenberge et al. [5] zeigen, dass der Wirbelkern durch kurze Feldpulse erstaunlich niedriger Amplitude ummagnetisiert werden kann. Dabei kommt es zur Erzeugung eines Wirbel-Antiwirbel-Paars, deren Kerne entgegengesetzt zu jenem des ursprünglich vorhandenen magnetisiert sind.

zunehmend in die Senkrechte aus, wobei die Orientierung entgegengesetzt zum ursprünglichen Wirbel ist (Abb. b, c). Schließlich bildet sich ein Wirbel-Antiwirbel-Paar (Abb. d), wobei im Antiwirbel die Magnetisierung aus je zwei Richtungen auf den Kern hin (gelbe Pfeile) bzw. von ihm weg weist (grüne Pfeile). Aufgrund ihrer entgegengesetzten senkrechten Orientierung kommt es zu einer attraktiven Wechselwirkung zwischen dem bereits anfänglich bestehenden Wirbel und dem Antiwirbel, welche sich schließlich unter Aussendung intensiver Spinwellen vernichten [6]. Übrig bleibt der rechte, in diesem Falle abwärts magnetisierte Wirbel, der schließlich in die Mitte der Scheibe wandert.<sup>+)</sup>

+) Auch hier sei auf die in der online-Ausgabe von Ref. [5] und [6] erhältlichen Filme verwiesen.

sich im Prinzip zwei Bits in einem Element speichern lassen. Außerdem gibt es offensichtlich keine Magnetisierungskomponente senkrecht zum Rand, der somit streufeldfrei ist. Zudem sind die magnetische Orientierung sowohl des Wirbels als auch, bedingt durch seine Topologie, des Wirbelkerns selbst sehr robust gegen thermisch induzierte Ummagnetisierungsprozesse. Allerdings führt – wie üblich – auch dieser Vorteil zu einem Nachteil: Um die Magnetisierung des Wirbelkerns zu schalten, werden relativ große Felder von ca. 500 mT benötigt.

### Ein kurzer Impuls

Einen Ausweg aus diesem Dilemma fanden nun Van Waeyenberge et al., die an 50 nm flachen, quadratischen Partikeln mit einer Kantenlänge von 1,5  $\mu\text{m}$  zeigten, dass sich die Magnetisierung des Wirbelkerns durch überraschend schwache magnetische Pulse umkehren lässt, wenn diese nur kurz genug sind [5]. Dazu rasterten sie die Probe unter einem auf 30 nm fokussierten, zirkular polarisierten Röntgenstrahl hindurch und bestimmten die lokale Absorption, die von der lokalen Magnetisierungsrichtung der Probe abhängt. Da die laterale Auflösung dieser Methode nicht ausreicht, um die Orientierung des Wirbelkerns direkt abzubilden, bedienten sie sich eines eleganten Tricks. Van Waeyenberge et al. nutzten die Tatsache, dass der

Wirbelkern eines sich in einem oszillierenden externen Magnetfeld befindlichen Partikels eine kreisförmige Bewegung beschreibt, wobei deren Drehsinn von der Ausrichtung des Wirbelkerns abhängt: Abwärts magnetisierte Wirbelkerne drehen im Uhrzeigersinn, aufwärts magnetisierte entgegengesetzt. Wie sich sehr schön in den online erhältlichen Filmen zu Ref. [5] sehen lässt, führt ein oszillierendes externes Feld mit einer Amplitude von 1,5 mT zu einer periodischen Verzerrung der Domänen um ca. 200 nm, die sich durch die hohe zeitliche Auflösung der an der Advanced Light Source in Berkeley durchgeführten Experimente auch noch nahe der Resonanzfrequenz von 244 MHz verfolgen lassen. Indem die Amplitude des externen Feldes für lediglich eine Periode auf nur 4 mT erhöht wurde, gelang es, die Magnetisierungsrichtung des Wirbelkerns wiederholt umzukehren.

Die Analyse mikromagnetischer Simulationen zeichnete ein überraschend komplexes Bild der beteiligten Prozesse. Offensichtlich kommt es durch den stärkeren Einzelpuls zu einer zusätzlichen Verzerrung des Wirbels, die – wenn die Momente in der Ebene verblieben – zu einer starken Änderung der Magnetisierungsrichtung auf kleiner lateraler Skala und somit zu einer hohen Austauschenergie führen würde. Stattdessen weicht die Magnetisie-

### Datenspeicherung mit THz?

Weitergehende theoretische Simulationen von Hertel et al. [7] zeigen, dass sich die Magnetisierungsumkehr auch durch einzelne Pulse erreichen lässt und extrem schnell vor sich geht. So genügen für ein scheibenförmiges Element mit einem Durchmesser von 100 nm und einer Dicke von 20 nm bereits Pulse mit einer Dauer von nur 5 ps. Bis jeder von uns allerdings eine Festplatte mit solch atemberaubender Schreibgeschwindigkeit nutzen kann, gibt es noch zahlreiche Probleme zu lösen. So wird der Vorteil ultrakurzer Schaltzeiten durch den Nachteil hoher Feldstärken von knapp 200 mT erkauft. Auch muss noch geklärt werden, ob in solchen Partikeln magnetische Wirbel stabil erzeugt werden können. Die Tür in Richtung Terahertz-Anwendungen wurde aber zumindest einen Spalt breit geöffnet.

Matthias Bode

Dr. Matthias Bode,  
Institut für Angewandte Physik und  
Microstructure  
Research Center,  
Universität Hamburg,  
Jungiusstr. 11  
20355 Hamburg

- [1] H. W. Schumacher et al., Phys. Rev. Lett. **90**, 017204 (2003)
- [2] A. Hubert und R. Schäfer, Magnetic Domains: The Analysis of Magnetic Microstructures, Springer (1998)
- [3] E. Feldtkeller und H. Thomas, Phys. Kondens. Mat. **4**, 8 (1965)
- [4] A. Wachowiak et al., Science **298**, 577 (2002)
- [5] B. Van Waeyenberge et al., Nature **444**, 461 (2006)
- [6] R. Hertel und C. M. Schneider, Phys. Rev. Lett. **97**, 177202 (2006)
- [7] R. Hertel et al., cond-mat 0611668