

Superhirn gesucht!

Magnetische Gedächtnisse im Rampenlicht

Physiker erforschen die quantenmechanischen Gesetze neuartiger Datenspeicher. Dazu blicken sie ins Innerste magnetischer Materie – mit Strahlung heller als das Sonnenlicht

von Martina Müller



Das Elektronensynchrotron BESSY in Berlin-Adlershof. Mit hochintensivem UV-Licht untersuchen Jülicher Physiker hier Materialsysteme für neue magnetische Datenspeicher.

Eine Großforschungsanlage am Rande von Berlin. Das monotone Surren unzähliger Vakuumpumpen durchzieht die weitläufige Experimentierhalle. Alle paar Meter türmen sich Monitore und Elektronikgeräte zu kleinen Steuerzentralen. An einer haben zwei Physiker aus Jülich Posten bezogen. Aufmerksam überwachen sie den Pulsschlag ihrer Apparatur, ein Zackenmuster auf den Monitoren. Was auf den ersten Blick an futuristische Metallkunst erinnert,

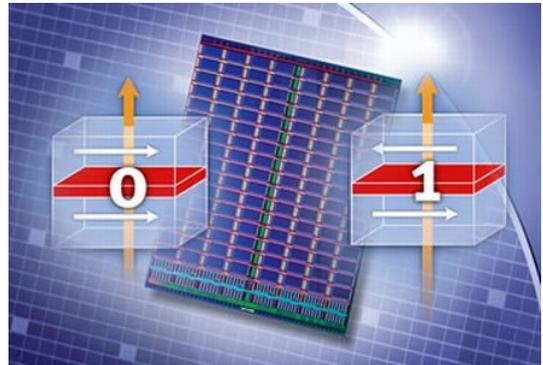
ist keine Spielerei, sondern Experimente an Prototypen einer ganz neuen Speichergeneration: ein magnetischer Festkörperspeicher. “Nur noch ein letzter Kontrolldurchgang, dann kann es losgehen. Alle Systeme laufen stabil.” Beide Physiker sind zufrieden.

Computer brauchen Strom, und davon nicht gerade wenig. Ist der Strom nämlich plötzlich weg, sind zumindest die Daten im Arbeitsspeicher unwiderbringlich verloren – der Alptraum jedes Laptop-Besitzers. Die neuartige Speichertechnologie könnte dieses Szenario bald beenden. Magnetische Datenspeicher, sogenannte MRAM-Chips (Kurzform für Magnetic Random Access Memory), benötigen keine permanente Stromzufuhr mehr, um Daten zu sichern. Die bisher verwendeten DRAM-Zellen (Dynamic Random Access Memory) haben dagegen einen großen Nachteil: Sie müssen ständig durch Strom aufgefrischt werden. Millionen kleiner Kondensatoren brauchen alle 60 Millisekunden einen Impuls.

MRAM-Chips halten Daten dauerhaft, nur beim Schreiben und Lesen wird Energie benötigt. Das macht die Magnetspeicher zu wahren Stromsparern. Ein Grund mehr, warum Forscher seit geraumer Zeit an der Entwicklung solcher nichtflüchtiger Festkörperspeicher arbeiten. Flash-Speicher, der in Handys und Digitalkameras eingesetzt wird, ist vielleicht die bekann-

teste Form des nichtflüchtigen RAMs. Langsame Schreibzeiten und eine geringe Wiederbeschreibbarkeit verhindern jedoch seinen Einsatz als Arbeitsspeicher.

In magnetischen “Gedächtnissen” werden Daten durch die Ausrichtung von Magnetpaaren gespeichert. Wie in der gewöhnlichen Sprache der Computer stellen sich Bits als Folge von Nullen und Einsen dar. Anders als bei Silizium-Chips heißt die physikalische Umsetzung von “0” und “1” aber nicht “Strom an” oder “Strom aus” sondern “Magnetisierung=Nordpol” oder “Magnetisierung=Südpol”.



Elektronik neu: In der Spinelektronik wird neben der Ladung auch der Spin eines Elektrons genutzt, um völlig neuartige Speicherelemente zu entwickeln. Quelle: Infineon

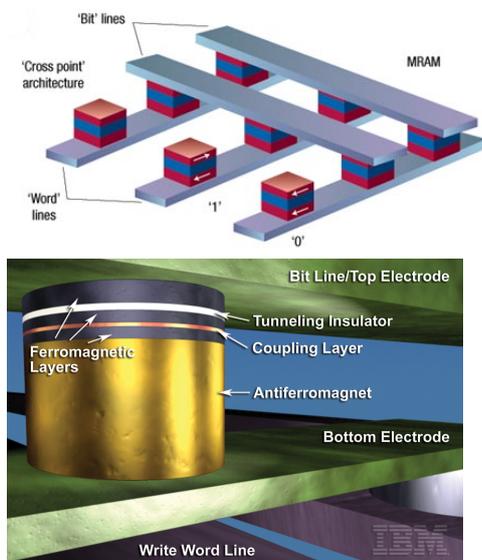
“Magnetismus ist ein mikroskopischer Effekt, der tief im Inneren magnetischer Materialien auftritt”, erklärt Frank Matthes, Wissenschaftler am Forschungszentrum Jülich. Jedes deren Atome ist nämlich bereits ein einzelner Miniaturmagnet. Im Atom tragen Elektronen die kleinste Einheit der Magnetisierung - vergleichbar mit winzigen Kompassnadeln. Diese Eigenschaft bezeichnen Physiker als Elektronenspin. In einem Magneten zeigen die meisten Elektronenspins - anders als in einem nichtmagnetischen Metall - in dieselbe Richtung, so wie Streichhölzer in der Schachtel. Und er ergänzt: “Wir wollen diese Eigenschaft sichtbar machen.”

Kombiniert man Elektronik und Magnetismus, lassen sich Bauelemente mit ganz neuen, bisher unbekanntem Eigenschaften entwickeln. “Wir untersuchen Materialsysteme, die das Herzstück der neuartigen magnetischen Datenspeicher bilden”, berichtet Martina Müller, Doktorandin am Institut für Festkörperforschung. Eine Zelle besteht aus mindestens drei gestapelten Material-Schichten: Zwei magnetische “Stockwerke” schließen eine isolierende, nichtmagnetische Etage ein. Die magnetischen Schichten dieses “Sandwiches” lassen sich als eine Ansammlung unzähliger Elementarmagnete vorstellen, die einzeln ihre Orientierung ändern können. Innerhalb einer Schicht sind sie gleich ausgerichtet.

Zehntausend Mal kleiner als ein Millimeter ist eine einzelne Speicherzelle. In diesen Dimensionen gelten die Gesetze der Nanowelt: Ist die Isolatorschicht extrem dünn, dann fließt ein Strom durch den Magnet-Sandwich. – Genau, ein isolierendes Material sollte eigentlich überhaupt keinen Strom leiten. Hier kommen die merkwürdigen Spielregeln der Quanten-

mechanik ins Spiel: Die Elektronen schaffen es auf die andere Seite der Barriere, indem sie diese "durchtunneln"... Der Tunnelstrom ist abhängig von der Orientierung der Elementarmagnete. Am größten ist er, wenn diese in beiden Magnetschichten in die gleiche Richtung zeigen – dann ist der elektrische Widerstand klein. Stehen sich die beiden Magnetisierungen hingegen gegenüber, dann misst man einen großen Widerstand und es fließt nur ein kleiner Tunnelstrom.

Der Tunnel-Magneto-Widerstand (TMR) ist die Grundlage für das neuartige Speicherkonzept: Dirigiert man gezielt die Ausrichtung der Magnetisierung in beiden Schichten, so läßt sich die Kodierung der Bits magnetisch steuern, antiparallel für "0" und parallel für "1". Noch eleganter funktioniert das Auslesen der Information: Dazu wird die Änderung des Tunnelwiderstands gemessen. Übrigens, der TMR ist ein ganz naher Verwandter des Riesen-Magneto-Widerstands (GMR), aber noch um einiges jünger.



Das MRAM-Prinzip: Die Datenbits "0" und "1" werden durch die Ausrichtung von Magnetpaaren dargestellt. Zum Auslesen der Information wird der Tunnel-Magneto-Widerstands Effekt (TMR) genutzt. Quelle: IBM

In der Praxis übernehmen dünne Oxidschichten die Rolle der isolierenden Zwischenschicht. Damit die magnetischen Schichten miteinander kommunizieren können, muss diese extrem dünn sein. Genaugenommen weniger als ein milliardstel Meter, das sind nur wenige Lagen von Atomen. Gestapelt im TMR-Sandwich berühren sich die Oberflächen des Oxids und die angrenzenden Magnetschichten. Auf den ersten Blick eine Banalität. Wenn man genauer hinsieht, dann kann dieser Kontakt mit den Magnetschichten "Folgen" haben. Denn: Jede Änderung deren Magnetisierung beeinflusst auch die Stärke des TMR-Effekts.

Die Forscher grübeln, denn das Problem ist verzwickelt: Was genau passiert mit der Magnetisierung an der Kontaktfläche zum Oxid? Wird sie vom Oxid beeinflusst - und wenn ja, wie? Wird sie kleiner, größer oder bleibt einfach gleich? Dies ist eine aktuelle Frage der TMR-Forschung. Wer sie beantworten kann, hält sozusagen einen Schlüssel zur Optimierung der neuartigen Speicherbausteine in der Hand.

Um der Wechselwirkung auf die Spur zu kommen, richten die beiden Physiker das Augenmerk gezielt auf die Magnet-Oxid Kontaktfläche: “Wenn es uns gelingt, ins Innere der dortigen Atome zu blicken, dann können wir die Magnetisierung der Elektronenspins entschlüsseln...”

Mit Elektronen sieht man besser In einem Atom umschwirren Elektronen den Kern wie Bienen ihren Stock. Alle Materialeigenschaften werden durch die Gestalt der Elektronenwolke bestimmt: Sie entscheidet, wieso Gold glänzt, weshalb Kupfer den Strom leitet und warum Eisen magnetisch ist. Glücklicherweise hat jedes Element eine einzigartige Elektronenverteilung. Passt man ein Experiment ganz gezielt an die charakteristischen Resonanzen der Elektronenwolke an, dann lassen sich die Elektronen beobachten, die zum Beispiel für die Magnetisierung eines Materials verantwortlich sind.

Schläge ein Schüler im Physikunterricht vor, einen TMR-Sandwich mit einer Taschenlampe zu beleuchten, um dessen Magnetisierung sichtbar zu machen, würde er wohl ausgelacht werden. Zu Unrecht: Zwar kann man den Elektronenspin nicht mit bloßem Auge sehen, aber die Wissenschaftler tappen dennoch nicht völlig im Dunkeln. Denn tatsächlich lassen sich Elektronen mit Licht aus einem Material herauslösen - und dann verraten sie, was im Inneren der Materie vor sich geht. So gelingt es, den Magnetismus sichtbar zu machen. Allerdings genügt dafür keine Taschenlampe...

“Um in die Feinstruktur der atomaren Welt zu blicken, scheuen wir keine Mühen und Wege.” Augenzwinkernd tritt Frank Matthes neben ein monströses Metallungestüm. Ihre Experimente an diesem mannshohen Versuchsaufbau haben die beiden Physiker über viele Wochen im Forschungszentrum Jülich vorbereitet. Ginge es um Untersuchungen mit sichtbarem Licht, kämen sie noch mit einem starken Labor-Laser zurecht. Statt dessen benötigen sie eine dem Licht verwandte Strahlung: stark fokussiertes, ultraviolettes (UV) Licht. Seine Energie liegt einige hundert Male höher, und seine Erzeugung ist extrem aufwendig: Nur Synchrotronstrahlungsquellen können bisher UV-Strahlung der benötigten Intensität und Bündelung liefern. Mehr als zwei Dutzend solcher Großforschungsanlagen gibt es weltweit. Modernen Nor-



Physikeralltag am Synchrotron: Während der Meßzeit spielt sich das Leben (24/7) am Experiment ab.

maden gleich, ziehen Physiker mit ihren Experimenten zu diesen "brillianten" Lichtquellen.

Das Herzstück jedes Synchrotrons ist ein Teilchenbeschleuniger, in dem Elektronen auf Kreisbahnen bis an die Grenze der Lichtgeschwindigkeit getrieben werden. Schon Heinrich Hertz hat entdeckt, dass beschleunigte elektrische Ladungen Energie abstrahlen. Und wer schon einmal auf einem Kirmeskarussell herumgewirbelt worden ist, der weiß, dass eine Kreisbewegung eine ständige Beschleunigung bedeutet. Die Elektronen senden, anders als ein Laser, gleichzeitig sichtbares Licht, ultraviolette Strahlung und Röntgenquanten aus.

Diese Auswahl an Synchrotronstrahlung ist für die Wissenschaftler Bedingung, denn der Blick ins Atom muss präzise gewählt sein. Während Röntgenquanten tief ins Innere der Atome eindringen können, so eignet sich UV-Licht besser zur Untersuchung der Elektronen nahe an der Atomoberfläche. Und genau dort lässt sich der Magnetismus am Besten beobachten.



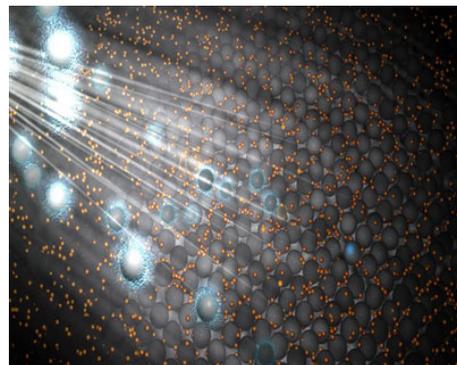
Einsteins Nobelpreis-Theorie: Licht verhält sich gleichzeitig als Welle und Ansammlung von Teilchen, den Photonen.

“Der Shutter ist jetzt auf”, ruft Frank Matthes. Er hat das Verbindungsventil zwischen dem Jülicher Experiment und dem Elektronenspeicherring geöffnet. Durch ein kleines Bullauge der metallenen Vakuumkammer zeigt Martina Müller auf ein metallisches Plättchen: “Auf der Oberfläche der Probe ist jetzt die Hölle los. Das Licht wirkt wie ein Strahl winziger Gewehrkegeln, der Elektronen aus dem Material herausschießt.” Nach Einstein ist Licht nämlich nichts anderes als ein Fluss von Teilchen. Trifft solch ein Lichtquant - oder Photon - auf einen Festkörper, so wird es von einem Elektron absorbiert und überträgt diesem die Energie, um sich vom Atom zu lösen. Photoemission – wie das Phänomen im Fachjargon heißt – findet zum Beispiel auch Anwendung in Solarzellen, in denen das Sonnenlicht im Material Elektronen auslöst, die schließlich einen Stromfluß bewirken.

Die freigesetzten Elektronen sind die Magnet-Sonden aus dem Inneren der Atome. Frank Matthes weiß um die Tücken des Experiments: “Die Kunst ist es, zur gleichen Zeit ein Elektron und seinen Spin aufzuspüren.” Das Problem dabei: So ein “Spin-Detektor” ist ein äußerst träges Messinstrument. Gerade einmal jedes Tausendste aller vorbeifliegenden Elektronen wird von ihm wahrgenommen. Und bevor es vernünftige Ergebnisse liefert, müssen viele Hunderttausend Elektronen eingesammelt werden. Der Natur in die Karten zu sehen, ist ein mühsames

Geschäft, aber der Aufwand lohnt sich: Am Ende eines Messtages halten die Wissenschaftler ein Porträt der Elektronenwolke und die wertvolle Information über ihre Spin-Orientierung in den Händen – sie haben ein Stück Quantenmechanik sichtbar gemacht.

Es ist bereits Nacht in Berlin, doch beide Physiker sind hellwach: Konnte das Experiment die Wechselwirkungen zwischen den TMR Sandwich-Lagen enthüllen? Das Ergebnis ist überraschend: Mal ignorieren sich Magnetschicht und Oxid und manchmal beeinflussen sie sich gegenseitig. Wann das passiert, das hängt von der Beschaffenheit des Oxids ab. Obwohl dieses eigentlich vollkommen unmagnetisch ist, hat es unter bestimmten Voraussetzungen die Fähigkeit, die Magnetschicht mehr oder weniger magnetisch zu machen.



Photoemission: Photonen einer Synchrotronquelle haben genug Energie, um Elektronen aus einer Materialoberfläche herauszuschlagen.

“Wie im richtigen Leben kommt es darauf an, ob zwischen beiden die “Chemie stimmt” oder nicht”, schmunzelt Martina Müller und erläutert die Zusammenhänge: Ein Magnet verliert seine magnetischen Eigenschaften, wenn er rostet. Und genau das passiert, wenn das Oxid – oder der in ihm enthaltene Sauerstoff – mit einem magnetischen Metall chemisch reagiert. Auf atomarer Ebene wird dabei seine charakteristische Elektronenverteilung unwiderrufflich verändert und mit ihr die Ordnung der Elementarmagnete. Aber wie kann ein Oxid einen Magneten noch magnetischer machen? Dies ist eine verzwickte Situation, die nur dann auftritt, wenn das Oxid einen Sauerstoff-Mangel hat. Sie führt dazu, dass sich mehr Elektronenspins in der Magnetschicht in die gleiche Richtung anordnen. Eine Art Supermagnet lässt sich mit dieser Erkenntnis jedoch nicht herstellen, denn der Effekt spielt sich nur in der Nanowelt ab.

Dass die Kontaktflächen eines TMR-Sandwiches alles andere als vernachlässigbar sind, haben die Experimente damit deutlich demonstriert. Die Beschaffenheit der Oxidschicht kann den TMR-Effekt vollkommen verändern. Neue Klarheit auch für das TMR-Speicherkonzept: Nur wenn die Metall-Oxid Kontaktfläche auf atomarer Ebene kontrolliert wird, lässt sich der TMR-Effekt gezielt steuern. “Ein kleiner Etappensieg”, freut sich das Forscherteam, “schließlich tüfteln Wissenschaftler weltweit daran, die Eigenschaften von TMR Speicherzellen zu optimieren.”

Ein Speicher für alles? Unlängst hat die Industrie die praktischen Vorteile des Tunnel-Magneto-Widerstand Effekts entdeckt: Beim TMR werden auch von sehr schwachen magnetischen Feldern größere Unterschiede beim Widerstand gebildet als beim GMR-Effekt. Die neueste Generation von Festplatten-Leseköpfen bedient sich mittlerweile dieser Technik. Eine Wiederholung der Erfolgs-Story des GMR-Effekts.

Im Februar 2008 wurden auf MRAM basierende Speicherelemente mit einem japanischen Forschungssatelliten ins All geschossen, der das Magnetfeld der Erde untersuchen wird. Die Entscheidung zu Gunsten von MRAM sei insbesondere wegen hoher Zuverlässigkeit, Dateierhaltung auch ohne Strom sowie in einem großen Temperaturbereich gefallen.

Magnetische Datenspeicher können in Zukunft sowohl an Stelle der langsameren Festplatten als auch als Arbeitsspeicher eingesetzt werden. Da sie besonders stromsparend sind, eignen sie sich als "Rundum"-Speicher für alle möglichen Anwendungen in mobilen Rechnersystemen, von Organizern bis hin zu Laptops.

Die Messzeit am Berliner Elektronensynchrotron geht dem Ende entgegen. Gut gepolstert und verpackt stehen Messapparaturen und Elektronikracks auf der Laderampe des Transporters, der sie zurück ins Forschungszentrum Jülich bringen wird. Ein letztes Mal schweift der Blick der beiden Physiker durch die Experimentierhalle, ihre Heimat der beiden letzten Wochen. Bis zur nächsten Messzeit – schließlich gibt der Magnetismus ihnen noch viele Rätsel auf ...