

H. Völz

Riesiger Magnetwiderstand und Nobelpreis

Es ist selten, dass ein Nobelpreis im Zusammenhang mit der praktischen Nutzung von Ergebnissen der Grundlagenforschung vergeben wird. Bisher galt das vor allem für die *nuclear magnetic resonance* (NMR) als Grundlage der medizinischen Tomographie. Dafür erhielten 1952 FELIX BLOCH und EDWARD MILLS PURCELL den Nobelpreis für Physik. Der diesjährige Preis ging an PETER GRÜNBERG (*1939) und ALBERT FERT (*1938) für die Entdeckung des *giant magneto resistive effects* (GMR). Er ermöglicht deutliche Fortschritte bei den Festplatten. Leider sind die entsprechenden Grundlagen und ihre Anwendung nicht einfach. Sie verlangen viel quantenphysikalisches und technisches Hintergrundwissen. Hier wird der Versuch unternommen, dies möglichst einfach darzustellen.

Der Magnetkopf der Festplatte

Der GMR ermöglicht eine besonders leistungsfähige Magnetkopfausführung, die heute nicht nur, wie mehrfach zu lesen war, bei Festplatten, sondern u.a. auch bei Streamern (Magnetbandgeräte zur Datenarchivierung) benutzt wird, sowie mittelbar auch zum magnetischen RAM führt. Da jedoch der Magnetkopf das wohl kleinste Bauteil der Speicher ist, kann er ohne Mikroskop nicht gesehen werden. **Bild 1** soll dies für eine 20-GByte-Festplatte aus dem Jahre 2002¹ demonstrieren. Bild 1a) zeigt die Festplatte geöffnet. Die Spiegelglatte Oberfläche lässt die Kamera und die Hände des Fotografen erkennen. Der rechteckige Umriss zeigt jenen Teil, der dann nach der Demontage von der Unterseite vergrößert in Bild 1b zu erkennen ist. Der Hauptteil ist der Gleiter mit den Gleitkufen. Er besitzt eine glatte Oberfläche und ist erhöht aufgebracht. Die anderen metallischen Flächen des Führungshebels erscheinen im Bild heller und gekörnt. Der Gleiter fliegt im Betrieb im Abstand von nur etwa 50 nm über der Plattenoberfläche. Selbst bei dieser Vergrößerung ist der elliptisch umrandete Kopf nur zu erahnen. Um dies deutlicher zu machen, ist im Teilbild 1c die Entwicklung der Gleiter mit dem angebauten Kopf aufgezeigt. Bis etwa 1980 wurde der damals induktive Kopf als kleines Magnetjoch mit der Wicklung hinten angefügt. Dan folgte der integrierte Kopf, auf den weiter unten eingegangen ist.

Induktiver Kopf kontra GMR-Kopf

Für viele magnetische Speicher genügt ein induktiver Ringkopf gemäß **Bild 2** sowohl zur Aufzeichnung als auch Wiedergabe und Löschung. Ein GMR-Magnetkopf ist jedoch nur für die Wiedergabe geeignet. Genügte bei älteren Festplatten ein induktiver Kopf zur Aufzeichnung und Wiedergabe, so ist bei Nutzung des GMR-Kopfes ein zusätzlicher induktiver Kopf für die Aufzeichnung (und Löschung) erforderlich. Diese Erhöhung des Aufwandes muss also deutliche Vorteile erbringen. Um dies zu verstehen, sind die Wiedergabe-Signale zu betrachten. Gemäß **Bild 3a** enthält die Aufzeichnung der äußeren Spur deutlich mehr Bit-Signale die der inneren Spur. Da die Festplatte mit konstanter Rotationsfrequenz rotiert, entstehen unterschiedliche Wiedergabefrequenzen. Weil aber die Spannung eines induktiven Kopfes proportional zur zeitlichen Flussänderung ($d\Phi/dt$) ist, sind die Signale proportional zur Frequenz (Bild 3b). Dies bedeutet einen beachtlichen Verarbeitungsaufwand bei der Signalerkennung.

¹ Eine neuere, defekte stand dem Autor zum Zerstören und Fotografieren leider nicht zur Verfügung.

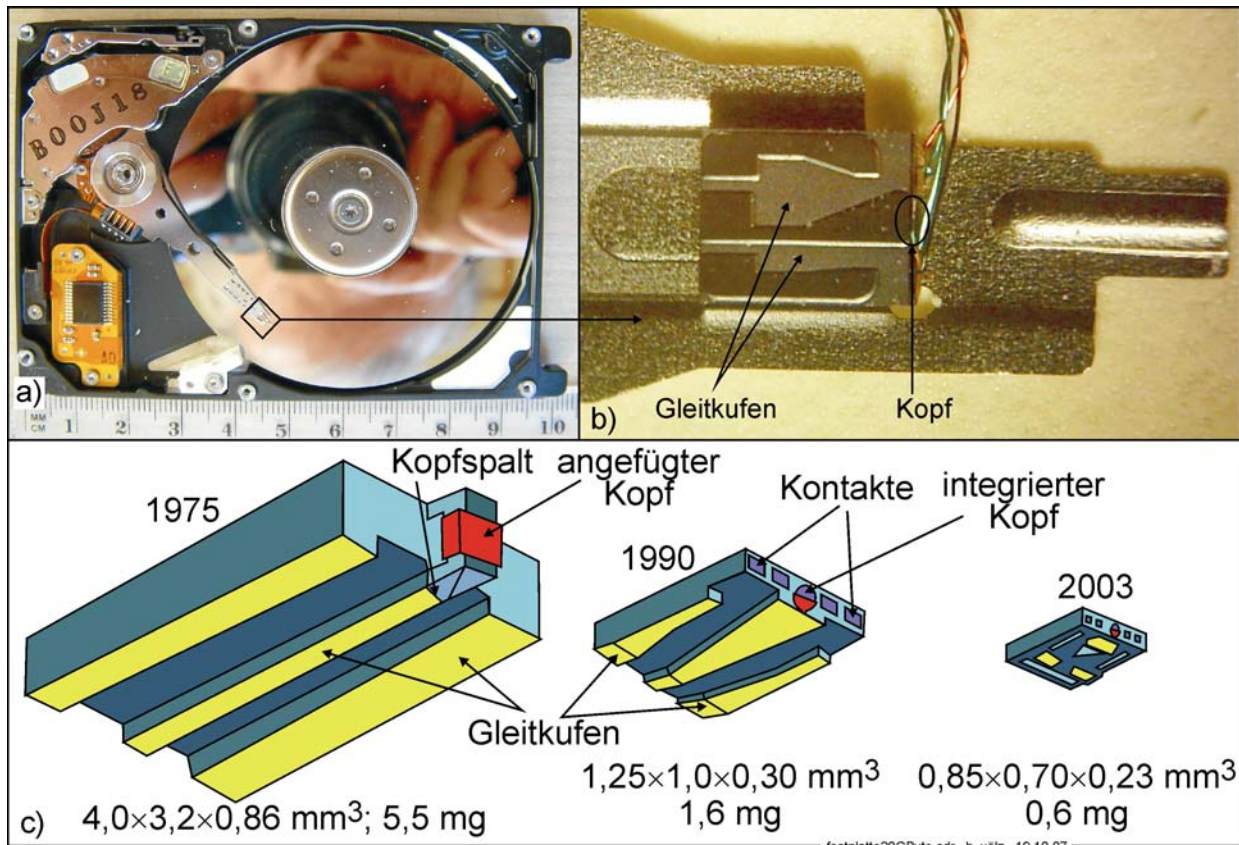


Bild 1. Eine 20 GByte 2 1/2-Zoll-Festplatte von 2002; a) geöffnet, b) Gleiterbereich von der Unterseite, c) geschichtliche Entwicklung der Gleiter mit Kopfanbau.

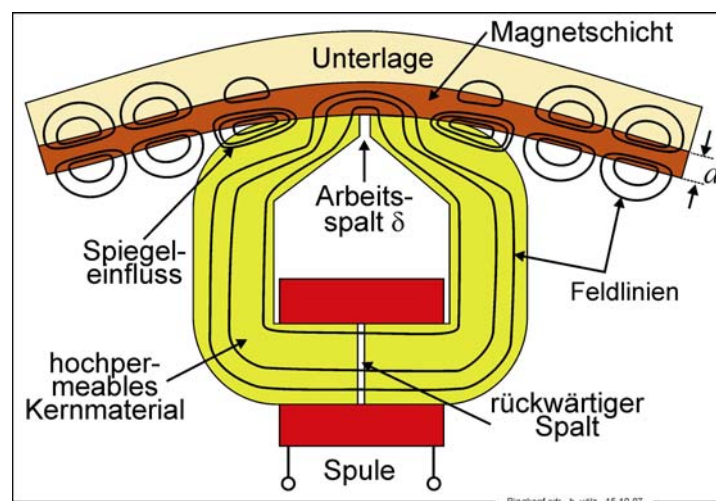


Bild 2. Typischer Aufbau und Funktion eines induktiven Magnetkopfes.

Die zu speichernden 0/1-Daten benötigen jedoch infolge längerer 1- bzw. 0-Folgen unterschiedliche Abstände zwischen den Nord- und Süd-Magnetisierungen. Ein Beispiel hierzu zeigt Bild 3c. Die Signale werden dadurch nicht nur unterschiedlich groß, es treten zusätzliche Störungen auf, die u.a. Gleichdrift und Spitzenverschiebung (peak shift, betrifft den Nulldurchgang der Magnetisierung) T_1 und T_2 bewirken. Gäbe es eine Möglichkeit, den auf der Platte erzeugten Magnetfluss direkt zu detektieren, so würden faktisch alle genannten und auch weitere Störungen entfallen. Untersuchungen zu derartigen, dann aber zusätzlichen flussempfindlichen Wiedergabeköpfen gibt es seit den 50er Jahren. Sie führten aber erst über

den GMR zum Erfolg. Er wurde 1988 unabhängig von GRÜNBERG (IBM Jülich) und FERT (Universität Paris) entdeckt. Bei etwa 4 K (-269 °C) konnten an dünnen Fe/Cr/Fe-Viellagenschichten magnetfeldabhängige Widerstandsänderungen von fast 50 % gemessen werden. Während FERT die Ergebnisse sofort publizierte, reichte GRÜNBERG Patente ein. Eine gewisse zeitlang gab es Urheberstreitigkeiten. Doch für die Nutzung gewann letztlich GRÜNBERG. 1991 erreichten STUART PARKIN u.a. (IBM) mit Co/Cu/Co-Mehrlagenschichten auch bei Raumtemperatur hohe Widerstandsänderungen. Daraufhin wurde 1993 der GMR-Lesekopf bei Festplattenspeichern eingeführt. Er ist heute Standard und IBM verdient durch die Lizenz jährlich mehrere Millionen Euro.

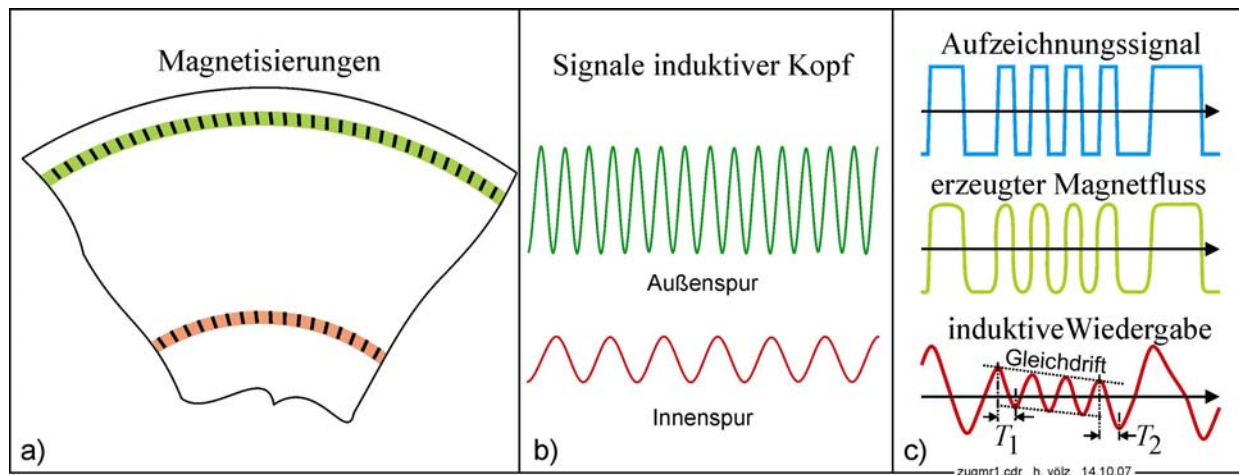


Bild 3. Bei gleichen Magnetisierungsabständen besitzen innere und äußere Spuren unterschiedlich viele etwa gleichdichte Signale (a). Bei konstanter Drehzahl der Platte entstehen so unterschiedliche Frequenzen, die mit den üblichen induktiven Magnetköpfen unterschiedlich große Signale erzeugen (b). Ein Rechtecksignal mit Information besitzt unterschiedliche Flankenabstände. Ein induktiver Magnetkopf erzeugt daraus ein Signal mit mehreren Fehlern (c).

Elektronenspin und Magnetismus

Gemäß dem klassischen Bohr'schen Atommodell (**Bild 4**) sind bei einem Atom drei magnetische Momente zu unterscheiden. Sie betreffen die Bahnbewegung der Elektronen um den Kern sowie die Eigenrotation (Spins) des Atomkerns bzw. der Elektronen. In fast allen Stoffen kompensieren sich diese Momente. Sie sind daher unmagnetisch (genauer unmagnetisierbar). Für die Spins ist zu beachten, dass sie als Rechts- oder Linksdraht (Spin $up = \uparrow$ bzw. $down = \downarrow$) auftreten. Erstmals wurde der Spin des Elektrons 1921 mit dem Stern-Gerlach-Versuch nachgewiesen. Die einzelnen Elektronen eines Atoms müssen gemäß der Pauli-Regel unterschiedliche Energie-Niveaus besitzen (Schalen 1, 2, 3, ... und Zustände s, d, f usw.). In jedem der möglichen Zustände können sich dann noch jeweils 2 Elektron befinden, die sich aber durch \uparrow und \downarrow unterscheiden müssen. Fast immer werden die Schalen von unten beginnend bis zur maximalen Kernladungszahl Z aufgefüllt. Jedoch bei den Elementen Eisen, Chrom und Nickel gelangen Elektronen in die Schale 4 bevor 3 aufgefüllt ist. Das bewirkt eine Abschirmung für die Schale 3 und so überwiegen bei 3d Elektronen mit \uparrow . So entstehen die magnetischen Eigenschaften der drei Metalle. Ein ähnlicher Fall tritt noch bei den Seltenen Erden ein.

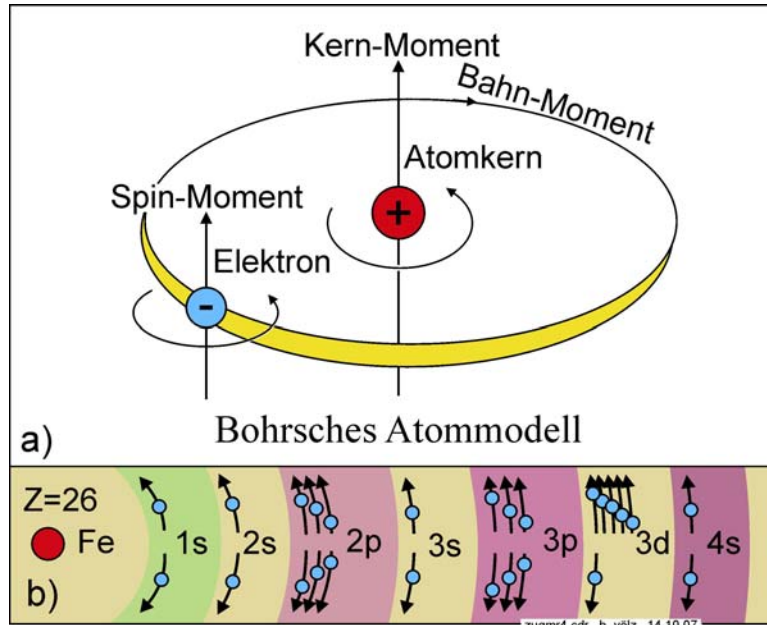


Bild 4. Atommodell und Entstehung des Magnetismus bei Eisen infolge der abschirmenden Wirkung der 4s-Elektronen bezüglich der 3d-Elektronen mit bevorzugter Spinausrichtung.

Polarisiertes Licht als Modell für den GMR

Bei den üblichen Anwendungen besteht ein Elektronenstrom immer aus gleichviel Elektronen mit \downarrow und \uparrow . Es ist erst eine Erkenntnis der letzten Jahrzehnte, dass dies nicht notwendig ist. Die Anwendung von Strömen mit einem bevorzugten Spin heißt heute bereits Spin-Elektronik und ist ein wichtiges Gebiet der Quantenelektronik. Ihre erste große Anwendung ist der magnetoresistive Kopf auf Basis des GMR. Doch zunächst ist zu klären, wie solche Ströme hergestellt werden können. Dazu möge zunächst eine Lichtanalogie dienen. Bild 5a zeigt den schematisierten Schwingungsverlauf eines Photons. Für unser Tageslicht treten natürlich wesentlich mehr Schwingungen auf. Dennoch ist der Wellenzug eines dafür typischen Photons nur wenige mm lang (Interferenzlänge). Eine weitere Vereinfachung benutzt einen Wellenzug mit konstanter Amplitude. Er besteht aus einem elektrischen und magnetischen Anteil, die beide senkrecht aufeinander stehen (Bild 5b).

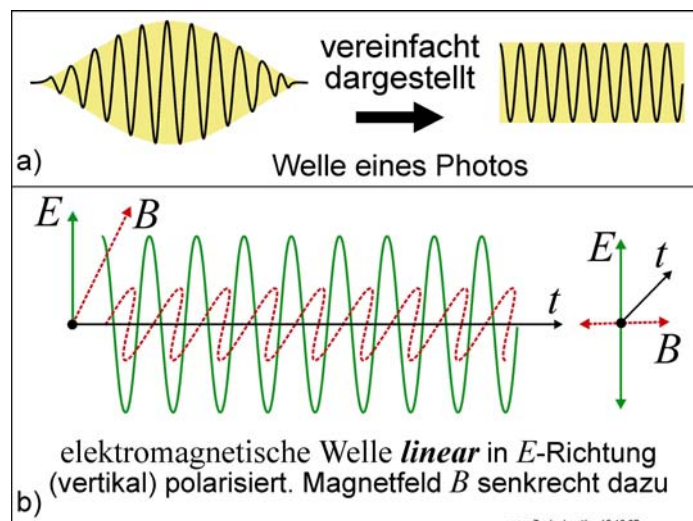


Bild 5. Lichtwelle und Polarisation.

Bei normalem Licht besitzen die Photonen unterschiedliche Ausrichtung des elektrischen Feldvektors (**Bild 6a**). Erst wenn sie ein Polarisationsfilter passieren, entsteht polarisiertes Licht (**Bild 6b**). Hierbei erscheinen die einzelnen Amplituden unterschiedlich groß. Das gilt jedoch nur statistisch über viele Photonen gemittelt. Durch ein zweites um α verdrehtes Polarisationsfilter werden nur noch Photonen (-anteile) entsprechend $\cos(\alpha)$ hindurch gelassen (**Bild 6c**). Für $\alpha=60^\circ$ ergibt sich ein Anteil von 25 %. Bei 0° können alle, bei 90° keine Photonen passieren. Mit der gegenseitigen Verdrehung beider Filter kann so polarisiertes Licht unterschiedlicher Intensität erzeugt werden. Wenn ausgangsseitig die Polarisationsrichtung gleich bleiben soll, muss das erste Filter verdreht werden.

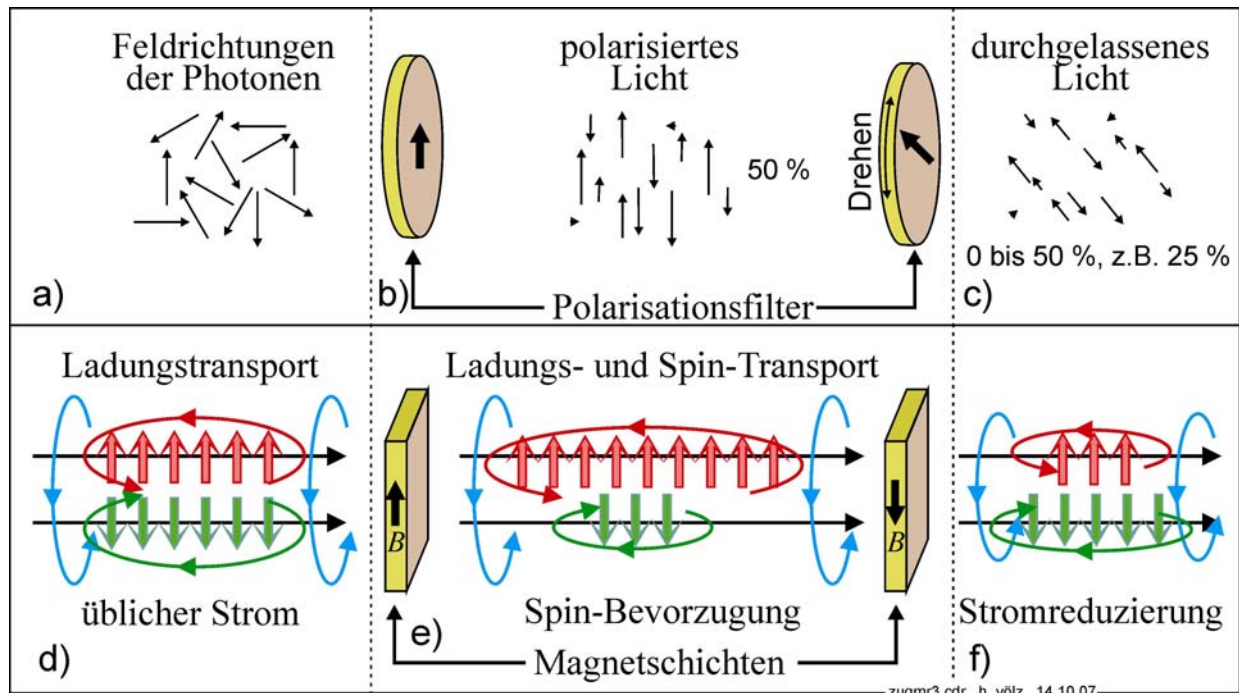


Bild 6. Analogie zwischen Lichtpolarisation und Spinanteil eines Elektronenstroms.

Magnetismus und Spinanteil

Im „üblichen“ elektrischen Strom sind gleichviel Elektronen mit Spin \downarrow und \uparrow vorhanden. Hierdurch heben sich diese Spin-Magnetfelder – rot bzw. grün in Bild 6d – gegenseitig auf. Wirksam wird nur das blau gezeichnete (übliche) Magnetfeld des fließenden Stroms. Durchläuft er ein Magnetmaterial, so wirkt sich die dort unterschiedliche Anzahl der Spins der 3d-Elektronen (Bild 4b) aus. Stromelektronen mit gleicher Richtung werden bevorzugt und mittels Spin-Flip wechseln einige von \downarrow nach \uparrow (Bild 4e). In Analogie zur Lichtpolarisation wird dabei jedoch der Gesamtstrom nicht geändert. Nun kompensieren sich aber nicht mehr die Spin-Magnetfelder. Deshalb kommt zum Ladungstransport ein Spintransport hinzu. Im Gegensatz zur Lichtpolarisation erfolgt die Spinausrichtung leider unvollständig. Durchfließt nun dieser Strom ein zweites Material mit entgegengesetzter Magnetisierung, so werden die Elektronen mit \downarrow bevorzugt und einige von \uparrow nach \downarrow geflippt. Doch insgesamt wird dabei der Strom geringer (Bild 6f). Je nach Richtung und Intensität des zweiten Magnetmaterials kann folglich die Stromstärke verändert werden. Dies bedeutet, dass der elektrische Widerstand beider Magnetmaterialien von der Orientierung und Stärke der Magnetfelder abhängt. Dies ist der vereinfachte Hintergrund des GMR. Genauere Betrachtungen sind vor allem mit dem quantentheoretischen Bändermodell möglich [1] bis [3].

Das geschilderte Prinzip verlangt leider einige, technisch nicht leicht zu erfüllende Voraussetzungen. So muss der Abstand zwischen den beiden Magnetschichten kleiner als die freie Weglänge der Elektronen von 2 - 5 nm sein. Andernfalls erfolgen im Bereich von Bild 6e Elektronenstöße, welche zusätzliche Spin-Flips bewirken und so die Bevorzugung einer Spinrichtung verringern. Genau deshalb wurde der Effekt zunächst bei sehr tiefen Temperaturen mit wenigen und energiearmen Elektronenstößen gefunden. Andererseits dürfen sich die beiden Magnetschichten nicht gegenseitig beeinflussen, nur dann ist nämlich eine entgegengesetzte Magnetisierung frei wählbar. Zusätzlich ist es vorteilhaft, wenn die beiden Magnetschichten sehr dünn sind, ebenfalls im nm-Bereich. Diese Abmessungen erfordern Hoch-Technologien. Das erfordert integrierte, photolithographische Verfahren, die aber schon mit induktiven Köpfen ab 1980 gebräuchlich und in der Halbleitertechnik ihr Vorbild hatten. Der Übergang zur Raumtemperatur verlangte dann noch eine zusätzliche antiferromagnetische² Schicht (z.B. FeMn), welche die Magnetisierung einer Schicht festhielt (pinning). So ergibt sich der typische Aufbau eines GMR-Kopfes gemäß Bild 7a. Der dort gezeigte Winkel von 45° betrifft die Anisotropierichtung des Materials. Er ist notwendig, damit die beiden Magnetisierungsrichtungen der Aufzeichnung unterschieden werden können. Da eine Dünnschichtfolge der Magnetschichten nur ungenügend den Spin auswählt, sind bis zu hundert gestapelte Vielfachschichten üblich. Den Prinzipaufbau der Kombination aus induktiven Aufzeichnungs- und GMR-Wiedergabekopf zeigt Bild 7b. Wie sie funktionell angeordnet sind zeigt Bild 7c. Damit der GMR-Kopf dichte Aufzeichnungen gut detektieren kann, ist er zwischen einer hochpermeablen Abschirmung und dem magnetischen Kern des induktiven Kopfes eingeklemmt.

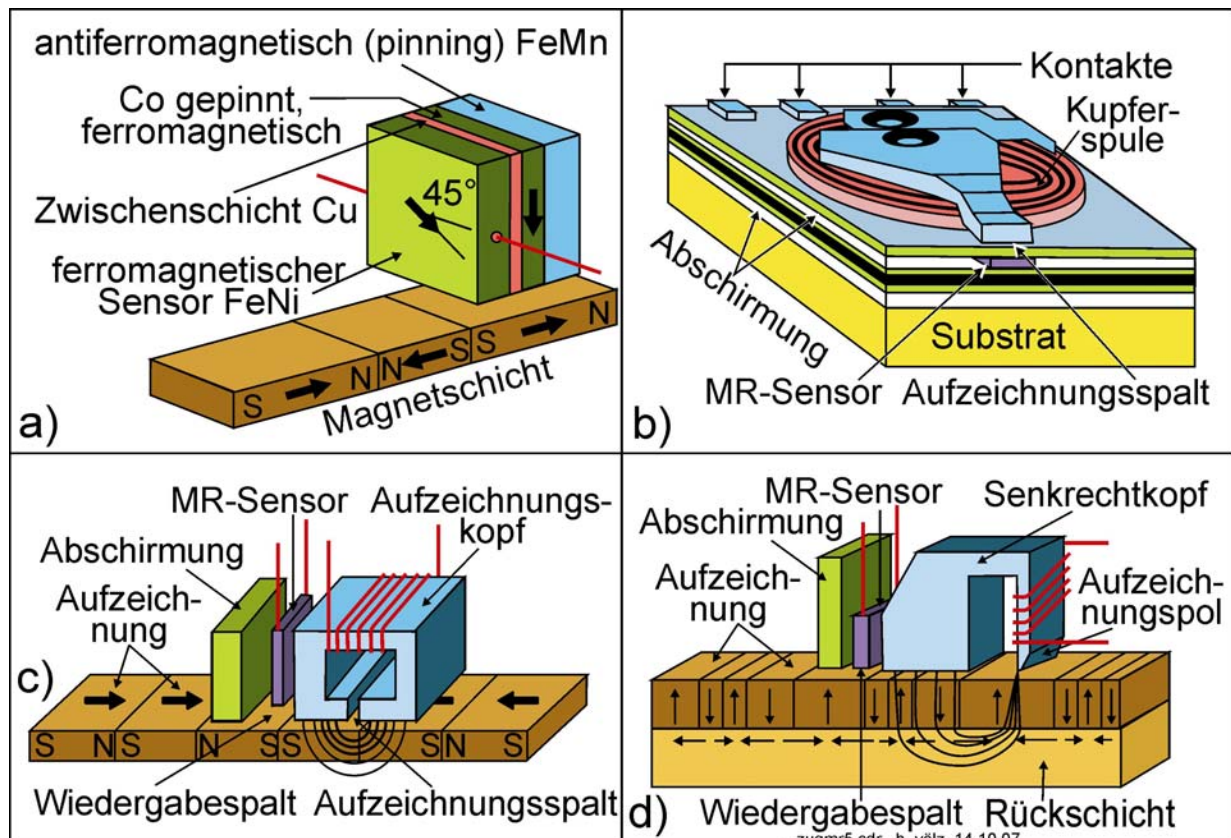


Bild 7. Anwendung des GMR: a) Sensoraufbau, b) integriertes Kopfsystem, c) schematisches Wirkungsprinzip, d) Übergang zur Senkrechtspeicherung.

² Es gibt 5 Arten von Magnetismus: Dia-, Para-, Ferro-, Ferri- und Antiferro-Magnetismus. Details verlangen ein tiefes physikalisches Verständnis, siehe u.a. [2] bzw. [3].

Senkrechtspeicherung

Mit dem GMR-Kopf erfolgt z.Z. der Übergang zur Senkrechtspeicherung (Bild 7d). Zunächst war hier der ähnlich aufgebaute TMR-Kopf üblich (*tunneleffect magnetic resistive*). Doch es gibt bereits erfolgreiche Versuche mit dem CPP-GMR-Kopf (*current perpendicular-to-the-plane*) wieder zurückzukehren. Beim TMR ist die metallische Zwischenschicht von Bild 7a durch einen Isolator ersetzt. Die Elektronen fließen dann senkrecht durch die vier Schichten. Entdeckt wurde er 1975 von MICHEL JULLIÈRE an Fe/Ge/Co-Dünnschichten bei 4,2 K (-268°C). Bei Raumtemperatur wurde er erstmals 1994 an einem Schichtsystem Fe/Al₂O₃/Fe nachgewiesen. Seitdem hat er vor allem große Bedeutung für die MRAM erlangt. Sie könnten zumindest teilweise die heutigen dRAM ersetzen. Sie sind deutlich schneller und verlieren ihren Inhalt auch dann nicht, wenn der Strom ausfällt [2] bzw. [3].

Abschließend noch ein Vergleich bezüglich des Flugs des Gleiters über der Oberfläche der Platte. Umgerechnet müsste eine Boing 747 mit 800facher Schallgeschwindigkeit über die Erdoberfläche in weniger als 1 cm Abstand fliegen und dabei jeden Grashalm „erkennen“. Auf der Fläche von Deutschland dürften höchstens 12 nicht korrigierbare Fehler auftreten.

Literatur

- [1] M. Albrecht, J.-U. Thiele u. A. Moser: Terabit-Speicher – bald Realität oder nur Fiktion? Physik Journal 2 (2003) Nr. 10, S. 25 – 31. Auch download: idefix.physik.uni-konstanz.de/albrecht/paper/physik_journal_Oct03.pdf
- [2] Völz, H.: Wissen - Erkennen - Information. Datenspeicher von der Steinzeit bis ins 21. Jahrhundert. Digitale Bibliothek Bd. 159, Berlin 2007 (als CD-ROM)
- [3] Völz, H.: Handbuch der Speicherung von Information, Bd. 3: Geschichte und Zukunft elektronischer Medien. Shaker Verlag Aachen 2007 (s.a.: www.rosw.cs.tu-berlin.de/voelz)