

## Das magnetische Gedächtnis

**Die Speicherkapazität von Festplatten wächst noch schneller als die Leistungsfähigkeit von Chips. Ermöglicht haben dies metallische Schichtsysteme mit maßgeschneiderten magnetischen Eigenschaften.**

**Abb. 1:** Dank neuer physikalischer Effekte, die den Weg vom Labor zum Produkt innerhalb weniger Jahre zurückgelegt haben, schrumpfen Festplatten immer weiter, während ihre Speicherkapazität gleichzeitig zunimmt. (Foto: IBM)



Die erste Festplatte mit der Bezeichnung RAMAC 305, die das amerikanische Unternehmen IBM 1956 auf den Markt brachte, konnte bei einer Speicherdichte von 5000 bits/inch<sup>2</sup> fünf Millionen Zeichen oder 5 Mbyte unterbringen. Dazu waren 50 mit Eisenoxid beschichtete Aluminiumplatten mit jeweils 60 Zentimeter Durchmesser nötig, die zusammen etwa eine Tonne wogen und die Größe zweier Kühlschränke hatten. Pro MByte ergab sich der stolze Preis von 10000 Dollar. In den 1980er-Jahren stieg die Speicherkapazität um jährlich 20 bis 30 %, Anfang der 1990er-Jahre mit Einführung der magnetoresistiven Leseköpfe (s. u.) bereits um 60 % und heute sind 100 % pro Jahr erreicht. Diese glatte Verdoppelung in 12 Monaten übertrifft somit sogar noch das Mooresche Gesetz, das die Leistungsverdopplung bei Chips alle 18 Monate beschreibt. Immer „dickere“ Betriebssysteme (früher passten die mal auf eine Diskette...) und neue Anwendungen beispielsweise im Multimediabereich sorgen schon dafür, dass die Nachfrage nach immer größeren Festplatten nicht nachlässt. Heute hat ein PC mindestens 40 GByte Speicherplatz zu bieten, und holt man diesen Artikel in einigen Jahren nochmal hervor, wird man vermutlich schmunzeln müssen, weil dann bereits das „G“ durch ein „T“ ersetzt sein wird.

Die Speicherdichte ist das Produkt zweier Kenngrößen: der Dichte der Spuren, die nebeneinander geschrieben werden (TPI: Tracks

per Inch), und der linearen Dichte der in einer Spur aufeinander folgenden Bits (BPI: Bits per Track). Der Zuwachs an Speicherdichte der letzten Jahrzehnte ist auf Verbesserungen bei beiden Größen zurückzuführen, in den letzten zehn Jahren um einen Faktor 20 bei der Spurbreite und einen Faktor 10 bei der Bitlänge. Die Größe BPI hängt dabei von der Physik des magnetischen Speichermaterials ab, die Spurdichte TPI von den Dimensionen des Schreib-Lese-Kopfs.

### Lesen im Tiefflug

Heutige Festplatten bestehen aus einer oder mehreren beidseitig magnetisch beschichteten Metall- oder Glasplatten, die sich mit 3000 bis 10000 Umdrehungen pro Minute drehen. Ein Schreib-Lese-Kopf an einem servogesteuerten Tragarm, der auf einem nur 25 Nanometer dünnen Luftpolster über der Platte schwebt, beschreibt bzw. liest die einzelnen konzentrisch angeordneten Sektoren der Platte. Diese Schreib-Lese-Köpfe arbeiteten anfangs induktiv: Beim Beschreiben der magnetischen Platte änderte das Streufeld aus einem schmalen Spalt eines Hufeisenmagneten in winzigen Domänen die Polarität und legte damit eine Eins oder eine Null auf der Platte ab. Genau umgekehrt verlief das Auslesen: Die magnetisch unterschiedlichen Bereiche der rotierenden Festplatte induzieren in der Lesespule elektrische Signale, aus denen sich die abgespeicherte Bitfolge rekonstruieren lässt.

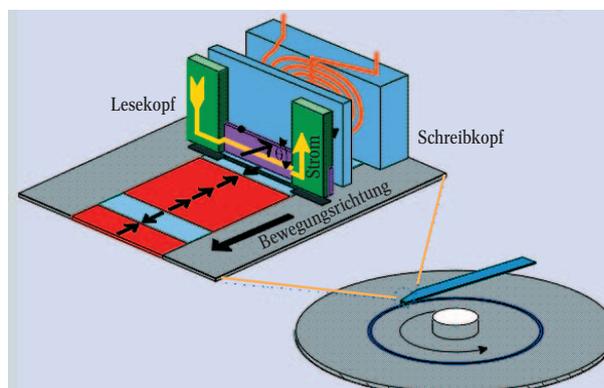
Der Schreib- und Leseprozess einer Festplatte ist also eine mechanische Präzisionsarbeit, soll sich doch die nach aerodynamischen Kriterien geformte Kopfeinheit ohne Berührung und ohne Flattern über die Platte bewegen. Ein Jumbojet müsste es bei entsprechenden, auf ihn übertragenen Anforderungen schaffen, mit mehrfacher Schall-

geschwindigkeit etwa einen Meter über dem Erdboden zu fliegen. Festplattenlaufwerke sind daher sehr empfindlich gegen äußere Einflüsse, z. B. Wärme, die zwangsläufig im Laufwerk erzeugt wird. Daher sind alle Hersteller bemüht, den Strombedarf der Komponenten (und damit die Wärmeezeugung) so niedrig wie möglich zu halten und den Reibungswiderstand der Lager zu minimieren.

Während die Schreib-Köpfe auch heute noch induktiv arbeiten, wurden die Leseköpfe mit Beginn der Neunzigerjahre, als die Speicherdichte die 1-Gbit/inch<sup>2</sup>-Schwelle überschritt, zunehmend durch sog. MR-Köpfe verdrängt, die *Magnetwiderstandseffekte* (auch magnetoresistive Effekte genannt) nutzen (Abb. 2). Diese sind charakteristisch für ferromagnetische Materialien, die ihren elektrischen Widerstand unter dem Einfluss eines äußeren Magnetfeldes ändern und sich daher als Magnetfeldsensoren eignen. Bereits seit ca. 1850 bekannt ist der *anisotrope Magnetwiderstand* (AMR), der den ersten MR-Köpfen zugrunde lag und Speicherdichten bis etwa 5 Gbit/inch<sup>2</sup> ermöglicht. Dieser Effekt beruht darauf, dass der elektrische Widerstand einer ferromagnetischen Schicht aufgrund der Spin-Bahn-Kopplung vom Winkel zwischen Strom und Magnetfeld abhängt. Die maximale Widerstandsänderung beträgt etwa 2,5 %.

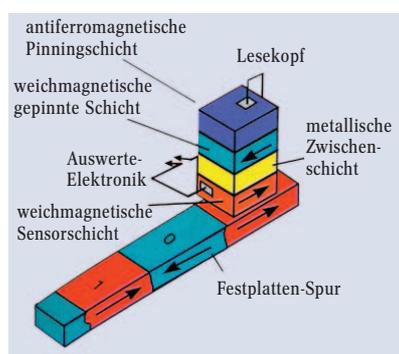
### Riesenmagnetwiderstand für winzige Bits

Noch effektiver sind GMR-Köpfe, die auf dem *Riesenmagnetwiderstand* (engl. Giant Magnetoresistance) beruhen. 1988 entdeckten unabhängig voneinander Peter Grünberg am Forschungszentrum Jülich und Albert Fert in Paris, dass die magnetischen Momente in benachbarten Eisenschichten, die durch eine dünne, nichtmagneti-



**Abb. 2:** Die Schreibköpfe zum Speichern der Daten auf eine Festplatte beruhen noch immer auf Induktion. Der Leseprozess nutzt jedoch aus, dass der elektrische Widerstand eines metallischen Schichtsystems vom Magnetfeld abhängt.

sche Chromschicht voneinander getrennt sind, antiparallel ausgerichtet sind. Für den Stromfluss, zu dem in einer magnetischen Schicht primär die sog. Majoritätsladungsträger beitragen, deren Spin parallel zur Magnetisierung ausgerichtet ist, hat diese antiferromagnetische Austauschkopplung wichtige Konsequenzen: Gelangen die Majoritätsladungsträger der einen Schicht über die Chromschicht in die andere Eisenschicht, so sind sie dort Minoritätsladungsträger und werden stark gestreut, d. h. der elektrische Widerstand dieser Struktur ist hoch. Erzwingt man jedoch durch ein äußeres Magnetfeld eine parallele Ausrichtung beider Schichten, so tritt diese spinabhängige Streu-



**Abb. 3:** Prinzip eines Lesekopfes mit einem Spin-Ventil-System. Die oberste Schicht fixiert die Magnetisierung der darunter liegenden weichen Schicht, während sich die Magnetisierung der Sensorschicht nach den Daten auf der Festplatte orientiert.

ung nicht auf, und der Widerstand geht deutlich zurück, bei dem Eisen-Chrom-System um bis zu 45 % – allerdings nur bei sehr hohen Magnetfeldern und tiefen Temperaturen.

Am IBM-Forschungszentrum in Almaden gelang es 1991, in einer Schichtstruktur aus Kobalt und Kupfer eine Widerstandsänderung von 70 % bei Raumtemperatur zu erzielen und damit den GMR-Effekt für Anwendungen nutzbar zu machen. Die bis dato nötigen hohen Magnetfeldstärken ließen sich durch eine spezielle Schichtstruktur reduzieren. Diese Spin-Ventil-Systeme beruhen auf dem GMR-Effekt, bestehen aber aus einer magnetisch „harten“ und einer magnetisch „weichen“ Schicht, die durch eine unmagnetische, aber elektrisch leitfähige Zwischenschicht getrennt sind. Da die Magnetisierung der weichen Schicht schon bei relativ kleinen Magnetfeldern relativ zur harten Schicht umklappt, lassen sich mit diesen Systemen wesent-

lich kleinere Bits auf der Festplatte mit entsprechend schwächeren Feldern auslesen.

Die Widerstandsänderungen in GMR-Köpfen betragen bis zu 20 %; gegenüber den AMR-Vorläufern kommen sie deshalb mit Datendichten bis zu 20 Gbit/inch<sup>2</sup> zurecht. Doch dann rückt das Ende langsam näher: Je höher die Schreibdichte werden soll, desto kleiner müssen die winzigen magnetisch ausgerichteten Domänen auf der Platte werden. Ab einer bestimmten Grenze, der so genannten superparamagnetischen Grenze, können diese aber ihre Ausrichtung nicht mehr halten: Thermische Effekte sorgen dann dafür, dass Atomspins zufällig umkippen und somit, da immer weniger Atome für die Speicherung eines Bits gebraucht werden, das magnetische Gedächtnis verloren geht. Man schätzt, dass diese Schwelle bei etwa 40 Gbit/inch<sup>2</sup> erreicht sein wird.

Soll die derzeitige Wachstumsrate bei den Plattenkapazitäten auch in Zukunft anhalten, müssen neuartige Techniken entwickelt werden. IBM beispielsweise entwickelte für die Speicherplatte eine Schichtstruktur aus zwei magnetischen Legierungen, die durch eine nur drei Atomlagen dicke unmagnetische Ruthenium-Schicht getrennt sind. Die Besonderheit liegt darin, dass aufgrund der bereits erwähnten antiferromagnetischen Austauschkopplung die magnetischen Domänen in der oberen und der unteren Schicht immer entgegengesetzt zueinander sind. Ein solches System widersteht wesentlich besser thermischen Störungen und behält seine Magnetisierung auch über die superparamagnetische Grenze hinaus. Im November 2002 stellte IBM eine AFC-Notebook-Festplatte mit einer Datendichte von 70 Gbit/inch<sup>2</sup> vor. Das Unternehmen Hitachi Global Storage Systems, in das inzwischen die Speicher-Abteilungen von IBM und Hitachi aufgegangen sind, bringt in diesem Jahr eine Familie von Microdrive-Laufwerken mit einem 4-GB-Spitzenmodell auf den Markt, die ebenfalls auf der AFC-Technologie basiert, eine Datendichte von 60 Gbit/inch<sup>2</sup> realisiert und zudem ultraminiaturisierte Komponenten benutzt. Um das obige Flugbeispiel nochmals aufzugreifen: Der Jumbojet fliegt jetzt nur noch einen Millimeter über der Oberfläche.

ULRICH KILIAN