

Terabit-Speicher – bald Realität oder nur Fiktion?

Neue Technologien der magnetischen Datenspeicherung werden die heutigen longitudinalen Speichersysteme ablösen.

Manfred Albrecht, Jan-Ulrich Thiele und Andreas Moser

Derzeit verdoppelt sich die Speicherdichte von Festplatten innerhalb von einem Jahr und damit schneller als die Leistungsfähigkeit von Computer-Chips gemäß dem Mooreschen Gesetz. Wie lange sich diese Entwicklung in Zukunft fortsetzen lässt, ist fraglich, da sich herkömmliche Technologien physikalischen Grenzen wie dem superparamagnetischen Limit nähern. Wann genau diese Grenze erreicht wird, ist umstritten – Schätzungen von Experten reichen von zwei bis fünf Jahren. Weitgehende Einigkeit herrscht aber darüber, dass langfristig andere Speichertechnologien erforderlich sein werden, um die stetig wachsenden Datenmengen bei fortschreitender Miniaturisierung bewältigen zu können.

Das anbrechende Informationszeitalter hat mit dem Internet und seinen jederzeit von fast überall auf der Welt zugänglichen Anwendungen Datenströme von vor kurzem noch ungeahnten Ausmaßen mit sich gebracht. Die Infrastruktur hinter dem Internet und die immer kleineren mobilen Endnutzergereäte wurden dabei neben den eigentlichen Netzwerkkomponenten auch durch die rasanten Fortschritte in der Datenspeicherung ermöglicht, die immer höhere Speicherkapazitäten in immer kleineren Formaten mit immer schnelleren Zugriffsraten zur Verfügung stellt – und das nach Möglichkeit zu immer niedrigeren Preisen. Eine Schlüsselrolle spielt dabei die vor mehr als 100 Jahren durch Valdemar Poulsen erfundene magnetische Datenspeicherung. Seit 1956, als IBM das erste magnetische Festplattenlaufwerk (RAMAC) mit der für damalige Verhältnisse enormen Gesamtspeicherkapazität von 5 Megabyte vorstellte (auf 50 Speicherplatten mit 61 cm Durchmesser), hat die Speicherdichte um mehr als das 30-millionenfache zugenommen – heute fasst das Hitachi Microdrive auf einer einzelnen Speicherplatte von nur 2,5 cm Durchmesser 4 Gigabyte.

Ein Festplattenlaufwerk besteht aus einer oder mehreren Platten, welche ein- oder beidseitig mit einem 10–15 nm dicken magnetischen Film beschichtet sind, und integrierten Schreib- und Leseköpfen, welche in einem Abstand von weniger als 20 nm über die Platten fliegen. Informationen werden mit Hilfe eines induktiven Schreibkopfes, welcher aus einem mikrofabrizierten Elektromagneten besteht, in Form von unterschiedlich magnetisierten Bereichen (Bits) geschrieben (Abb. 1). Die minimale Bitlänge beträgt dabei noch etwa

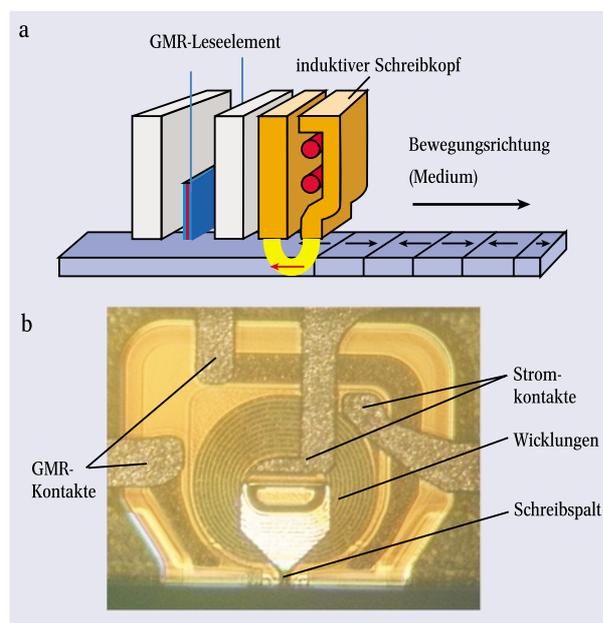


Abb. 1: Das Design eines Schreib- und Lesekopfes:

► a) In herkömmlichen longitudinalen Speichersystemen wird das magnetische Bit im Spalt (Schreibspalt) zwischen den Polen des Schreibkopfes geschrieben und mit einem Riesenmagnetowiderstandssensor (GMR) ausgelesen.
► b) Frontansicht eines Schreib-/Lesekopfes (Ausschnitt: $120\ \mu\text{m} \times 100\ \mu\text{m}$).

35 nm. Abfolgen der einzelnen Informationseinheiten werden in Spuren abgespeichert, welche in Produkten der neusten Generation weniger als 270 nm auseinanderliegen. Damit die Übergänge zwischen zwei entgegengesetzt magnetisierten Bereichen möglichst scharf sind und somit das Signal-zu-Rausch-Verhältnis (signal to noise ratio, SNR) möglichst groß wird, besteht die magnetische Schicht aus magnetischen Körnern, welche im Idealfall vollständig magnetisch entkoppelt sind (Abb. 2). Das von den Übergängen ausgehende magnetische Streufeld wird mit einem Riesenmagnetowiderstandselement ausgelesen (siehe Infokasten „Aufbau und Prinzip eines GMR-Lesekopfes“). Das analoge Signal wird dann von elektronischen Filtern in eine Folge von Bits dekodiert. Im Labor ließen sich bis heute Dichten von mehr als $130\ \text{Gbit}/\text{inch}^2$ demonstrieren und Datenströme mit bis zu $2\ \text{Gbit}/\text{s}$ schreiben und lesen.

Einer der Schlüsselparameter der verwendeten magnetischen Speichermedien ist die sog. magnetische (magneto-kristalline) Anisotropie K (Einheit: J/m^3), welche multipliziert mit dem Kornvolumen die Energie beschreibt, die aufgebracht werden muss, um die Magnetisierung aus ihrer Vorzugsrichtung um 180° zu drehen. Diese Größe bestimmt zum einen das zur Ummagnetisierung aufzubringende magnetische Feld, zum

Dr. Manfred Albrecht, Dr. Jan-Ulrich Thiele, Dr. Andreas Moser, Hitachi San Jose Research Center, 650 Harry Road, San Jose, CA 95120, USA

Mit dem Verkauf der IBM Storage Technology Division an Hitachi Ltd. zu Beginn des Jahres wurde der Forschungsbereich „Magnetische Datenspeicherung“ aus dem IBM Almaden Research Center in das im selben Gebäude befindliche Hitachi San Jose Research Center ausgelagert, dem auch die Autoren jetzt angehören.

anderen die Stabilität der Magnetisierung gegenüber thermischen Fluktuationen. Eine hohe Anisotropie ist hierbei für letzteres von großem Vorteil, allerdings erfordern Medien mit hoher Anisotropie höhere von einem Schreibkopf aufzubringende Schreibfelder.

Eine ausführliche Diskussion dieses Dilemmas und eine Darstellung der wichtigsten Zusammenhänge zwischen Anisotropie und Miniaturisierung der Speicherkomponenten bzw. Erhöhung der Speicherdichte sind im Infokasten „Skalierungsgesetze und ...“ beschrieben.

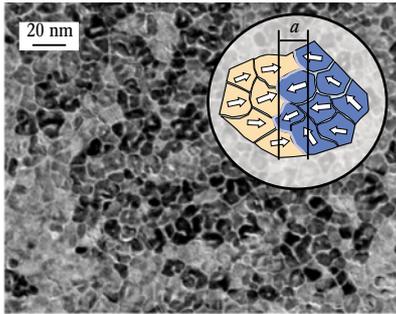


Abb. 2: Ein modernes granulares, longitudinales CoCrPtB-Speichermedium unter dem Transmissionselektronenmikroskop (TEM). In den Korngrenzen befindet sich eine nichtmagnetische Cr-reiche, amorphe Legierung, die die Co-reichen Körner magnetisch entkoppelt. Das Inset zeigt die magnetische Orientierung zwischen zwei entgegengesetzt magnetisierten Bereichen. Damit dieser Übergangsbereich (gekennzeichnet durch den Übergangsparameter α) möglichst scharf wird, besteht die magnetische Schicht aus einzelnen winzigen magnetischen Körnern, welche nur schwach miteinander gekoppelt sind.

In vielen kristallinen Materialien liegt die Richtung der Anisotropie entlang einer der Hauptkristallachsen. In heutigen Medien wählt man mit Hilfe geeigneter Substrate und Keimschichten die Anisotropieachse der magnetischen Schicht innerhalb der Ebene der magnetischen Speicherschicht (longitudinale Anisotropie). Allerdings mussten in herkömmlichen longitudinalen Magnetspeichersystemen in den letzten Jahren stetig neue Technologien entwickelt werden, um die jährlichen Steigerungsraten der Speicherdichte und Zugriffszeiten gewährleisten zu können [1]. Große Fortschritte wurden mit dem Einsatz von sog. orientierten Medien erzielt. In diesen Medien sind die Anisotropieachsen der Körner nicht zufällig in der Ebene verteilt, sondern vorzugsweise in der Spurrichtung ausgerichtet. Solche Medien zeigen weniger Rauschen und eine bessere thermische Stabilität, ohne auf eine gleichzeitige Erhöhung des Schreibfeldes angewiesen zu sein.

Vor etwa zwei Jahren gelang ein weiterer Durchbruch mit dem ersten Produkt mit sog. antiferromagnetisch gekoppelten (AFC)-Medien, auch bekannt unter dem Hitachi Slogan „Pixie Dust“ [2]. Diese Medien be-

stehen aus zwei ferromagnetischen Schichten A und B, welche durch eine nur 6 Å dünne Ruthenium-Schicht antiferromagnetisch gekoppelt sind (Abb. 3a). In Remanenz (Magnetisierung M ohne angelegtes Feld) zeigt sich aufgrund dieser Kopplung eine reduzierte effektive magnetische Schichtdicke, $M_{\text{eff}}t = M_A t_A - M_B t_B$ (t : Schichtdicke), daher sieht ein solches AFC-Medium in Remanenz wie eine einzelne, viel dünnere Schicht aus (Abb. 3b). Dies hat den Vorteil, dass der effektive Kopf-Medium-Abstand kleiner wird und daher mit höherer Auflösung geschrieben und gelesen werden kann. Die thermische Stabilität wird dabei im Wesentlichen von der oberen magnetischen Schicht A bestimmt. Diese kann daher bei gleichem SNR viel dicker und somit thermisch stabiler als in konventionellen, longitudinalen Medien sein.

Über die letzten 30 Jahre wurden immer wieder Versuche unternommen, die longitudinale Speichertechnologie abzulösen. Die entwickelten Produkte waren aber wenig erfolgreich, was vor allem auf die überlegene Leistungsfähigkeit der longitudinalen Festplattenspeicher zurückzuführen war. Diese Situation hat sich heute deutlich geändert. Erstmals ist die weitere Steigerung der Speicherdichten in magnetischen Festplatten nicht mehr „nur“ durch technologischen Fortschritt begrenzt, sondern es werden die physikalischen Grenzen wie z. B. das superparamagnetische Limit (s. Infokasten „Skalierungsgesetze und ...“) erreicht. Deshalb hat in der Industrie eine fieberhafte Suche nach alternativen Materialien und Technologien für die magnetischen Datenspeicher der Zukunft begonnen.

Speichermedien mit senkrechter magnetischer Anisotropie

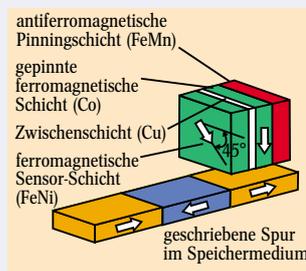
Vor mehr als 25 Jahren wurden erste Festplattenspeichersysteme mit Medien mit senkrechter magnetischer Anisotropie getestet. Die Vorteile dieser Medien liegen insbesondere in den folgenden Eigenschaften:

- ▶ annähernde Verdoppelung des verfügbaren Schreibfeldes,
- ▶ scharfe Bitübergänge in relativ dicken Medien,
- ▶ reduziertes Rauschen von den Spurseiten,

Aufbau und Prinzip eines GMR-Lesekopfes

Zur magnetischen Datenspeicherung werden heutzutage sog. GMR-Leseköpfe (giant magneto-resistance) verwendet. Diese nutzen den Riesenmagnetowiderstandseffekt aus, der 1988 von zwei Forschergruppen um Peter Grünberg und Albert Fert entdeckt wurde. Er beruht darauf, dass zwei benachbarte ferromagnetische Eisen-schichten, die durch eine nur 1 nm dünne Chromschicht getrennt sind, eine antiparallele Ausrichtung (antiferromagnetische Kopplung) ihrer Magnetisierung zeigen. Legt man nun ein externes Feld an, das beide Schichten zur parallelen Ausrichtung zwingt, so nimmt der elektrische Widerstand um etwa 1,5 % ab. Weitaus größere Widerstandsänderungen

konnten in Multischichten beobachtet werden, allerdings sind dazu hohe Magnetfelder und tiefe Temperaturen notwendig.



1991 gelang es Forschern um Stuart Parkin vom IBM Almaden Forschungszentrum, diesen Effekt für Anwendungen nutzbar zu machen. Bei der dabei entwickelten Schichtenanordnung wurde zunächst die Magneti-

sierungsrichtung einer weichmagnetischen Kobaltschicht mittels einer antiferromagnetischen Eisen-Mangan-Schicht fixiert. Diese magne-

ten relativ zur harten Schicht schon bei geringen Feldern umklappen, wobei damals Widerstandsänderungen von bis zu 10 % bei Raumtemperatur erzielt wurden.

In heutigen Produkten liegt die Magnetisierungsrichtung des „free layers“ gegenüber der gepinnten harten Schicht um 45° gedreht (Abb.). In dieser Anordnung reagiert der Sensor auf die senkrechte Komponente des Streufeldes, die an den Bit-Übergängen besonders groß ist. Durch diese Wahl des Arbeitspunktes des Sensors erhält man eine lineare Abhängigkeit des Auslesesignals von der Magnetfeldstärke und einen Vorzeichenwechsel des Signals bei entgegengesetzter Polarität.

► hohe Orientierung der Anisotropieachsen.

Das Schreibfeld wird hauptsächlich dank einer weichmagnetischen Unterschicht annähernd verdoppelt. Diese weichmagnetische Schicht leitet den magnetischen Fluss mit hoher Effizienz vom einen zum anderen Schreibpol und ist somit ein wesentlicher Teil des Schreibkopfes (Abb. 4a). In dieser Anordnung können Medien mit höherer Anisotropie geschrieben werden, welche wiederum thermisch stabiler sind. Dadurch lässt sich das superparamagnetische Limit zu höheren Speicherdichten verschieben.

Einige der größten physikalischen wie technischen Hürden, die einer Markteinführung von magnetischen Speichermedien mit senkrechter Anisotropie im Wege stehen, sind:

► Die weichmagnetische Unterschicht muss den magnetischen Fluss effizient zwischen den Schreibpolen leiten und ist daher beinahe 10-mal so dick wie gewöhnliche Medien. Es ist deshalb deutlich schwieriger, Unterschichten mit ausreichend glatten Oberflächen herzustellen, die für das Wachstum der Speicherschichten und ihre tribologischen Eigenschaften unbedingt erforderlich sind.

► Die internen Entmagnetisierungsfelder sind vor allem in großen, uniform magnetisierten Bereichen sehr groß und können zum Umklappen der Magnetisierung in einzelnen Körnern führen.

► Die weichmagnetische Unterschicht wirkt zusammen mit dem Leseelement des Kopfes wie eine Magnetfeldlinse. Somit kann schon ein kleines externes Magnetfeld zur Ummagnetisierung von einzelnen Körnern und schließlich zu Datenverlust führen.

Wie Galliumarsenid in der Silizium-dominierten Halbleitertechnologie genießen magnetisch senkrechte Speichermedien seit 30 Jahren den zweifelhaften Ruf, eine Technologie der Zukunft zu sein. Die erheblichen

Investitionen in die zu ihrer Herstellung notwendige Infrastruktur könnten jedoch durch das nahende superparamagnetische Limit für longitudinale Medien

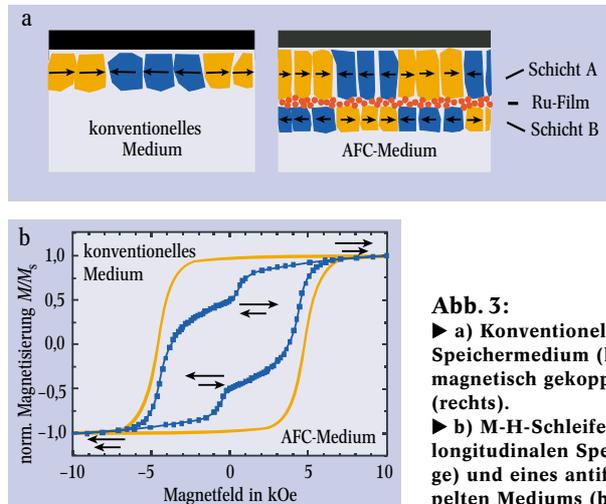


Abb. 3:

► a) Konventionelles longitudinales Speichermedium (links) und antiferromagnetisch gekoppeltes Speichermedium (rechts).
 ► b) M-H-Schleife eines konventionellen longitudinalen Speichermediums (orange) und eines antiferromagnetisch gekoppelten Mediums (blau).

erstmalig gerechtfertigt sein. Noch hat sich keiner der führenden Hersteller mit einem Produkt vorgewagt, jedoch wird auf den einschlägigen Fachtagungen offen über die baldige Markteinführung diskutiert.

Thermisch assistiertes Schreiben

Wie im Infokasten „Skalierungsgesetze und ...“ beschrieben, wird die thermische Stabilität magnetischer Bits in erster Linie durch die magnetische Anisotropie und das Kornvolumen bestimmt. Nun sind zwar eine ganze Reihe unterschiedlicher Materialien mit hoher magnetischer Anisotropie und somit erhöhter thermischer Stabilität bekannt, diese benötigen jedoch hö-

1) In Produkten verwendete Schreibköpfe bestehen aus Polmaterialien wie NiFe, die mit einer Sättigungsfeldstärke von ca. 2,2 T weniger als 10 % von den höchsten bekannten Sättigungsfeldstärken von 2,5–2,4 T entfernt sind. Weiterentwicklungen des Schreibkopfes im Hinblick auf die Feldstärke sind deswegen enge Grenzen gesetzt.

2) Oft auch „heat assisted magnetic recording“ (HAMR) oder „hybrid recording“ genannt.

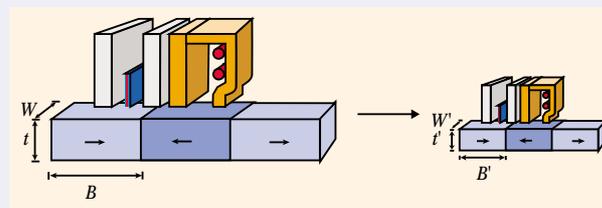
Skalierungsgesetze und physikalische Grenzen der magnetischen Datenspeicherung

Eine höhere Speicherdichte (kleinere Bitbreite W und Bitlänge B) erfordert zwangsläufig kleinere Schreibköpfe sowie bessere magnetische Speichermedien. Eine wichtige Charakterisierungsgröße in diesem Zusammenhang ist das Signal-zu-Rausch-Verhältnis (SNR) des Lesesignals. Dieses lässt sich abschätzen über

$$\text{SNR} \sim \frac{B^2 W}{a^2 D(1 + \sigma^2)} \sim \frac{B^2 W}{D^5(1 + \sigma^2)}, \quad (1)$$

wobei D der Korndurchmesser, σ die Breite der normierten Korngrößenverteilung und a der Übergangsparameter ist. Letzterer kennzeichnet die Breite des magnetischen Überganges zwischen zwei entgegengesetzt magnetisierten Bereichen (siehe Abb. 2), der umso schärfer wird, je kleiner die Kornstrukturen werden ($a \sim D$). Gleichung (1) zeigt recht deutlich, dass eine Verringerung

der Korngröße sehr wirkungsvoll ist, um das SNR zu verbessern. Allerdings führt eine Verkleinerung des Kornvolumens, $V = \pi D^2 t/4$ (t : Filmdicke), zu einer kleineren Energiebarriere, welche überwunden werden muss, um die Magnetisierungsrichtung



der Partikel bei Anwesenheit eines magnetischen Feldes umzukehren (Stoner-Wohlfarth-Partikel):

$$E_B(H, V) = \frac{K V}{1 - H/H_0}^{3/2}. \quad (2)$$

K ist die magnetische Anisotropie und H_0 das interne Schaltfeld. Somit spielen thermische Fluktuationen, die ein Umklappen der Magnetisierung bewirken kön-

nen, eine immer wichtigere Rolle („superparamagnetischer Effekt“). Die thermische Aktivierungsenergie ist gegeben durch $k_B T$ (k_B : Boltzmann-Konstante, T : absolute Temperatur). Thermisch aktivierte Umkehrprozesse lassen sich durch eine

charakteristische Zeitkonstante τ mit Hilfe des Arrhenius-Néel-Gesetzes beschreiben:

$$\tau = 1/f_0 \exp(E_B/k_B T) \quad (3)$$

(thermische Anregungsfrequenz f_0 , typischerweise $10^9 - 10^{12}$ Hz).

Noch erwähnt werden sollte, dass in realen Systemen eine Verteilung der Korngröße und Anisotropie

und somit der Energiebarriere vorliegen. Als Folge dieser Verteilung findet man anstelle eines exponentiellen Zerfalls (Gl. 3) ein logarithmisches Zerfallsverhalten der Magnetisierung.

Aus Gl. (2) und (3) folgt, dass kleinere Korngrößen mit kleineren τ -Werten einhergehen. Damit wird das Speichermedium langsam thermisch entmagnetisiert, was zwangsläufig zu Signal- und Datenverlust führt.

Um thermische Langzeitstabilität zu gewährleisten (typischerweise 10 Jahre, $KV/k_B T \approx 60$), muss die magnetische Anisotropie des Speichermediums erhöht werden, um die Verkleinerung der Kornvolumina zu kompensieren. Dies hat zur Folge, dass auch das erforderliche Schreibfeld $H_W \sim K/M_S$ (M_S : Sättigungsmagnetisierung) erhöht werden muss.

here Schreibfelder, die sich mit einem konventionellen Schreibkopf nicht erzeugen lassen.¹⁾ Einen potenziellen Ausweg aus dieser Sackgasse bietet thermisch assistiertes Schreiben (thermally assisted recording, TAR).²⁾ Hierbei wird das magnetische Speichermedium während des Schreibvorganges z. B. durch einen Laserstrahl kurzzeitig von der Speichertemperatur T_{storage} auf die Schreibtemperatur T_{write} aufgeheizt (Abb. 4b). Die Magnetisierung fällt dabei mit steigender Temperatur

$$D_{\text{max}} = \frac{T_{\text{storage}}}{T_{\text{write}}} \cdot \frac{E_B(T_{\text{storage}})}{k_B T_{\text{storage}}} \cdot \frac{1}{\ln(t_{\text{exp}} \cdot f_0)} \quad (1)$$

berechnen [3]. Hierbei ist f_0 die thermische Anregungsfrequenz und t_{exp} die kumulative Zeit, während der eine Datenspur im Medium erhöhten Temperaturen ausgesetzt ist. Um den Nutzen von TAR voll auszuschöpfen, ist es also notwendig, t_{exp} z. B. durch eine möglichst kleine Hitzequelle zu minimieren. Diese sollte idealerweise etwa gleichgroß wie die Breite der Datenspuren sein, d. h. für Speicherdichten von 1 Tbit/inch² einen Durchmesser von ungefähr 50 nm aufweisen. Erste Versuche, eine solche Hitzequelle durch Laserdioden in Verbindung mit nahfeldoptischen Bauelementen wie optischen Fasern oder Immersionlinsen zu realisieren, scheiterten an den unzureichenden Leistungsdichten. Plasmonresonanz-unterstützte optische Transmission durch sehr kleine Aperturen scheint jedoch hierfür einen Ausweg zu bieten [4].

Speichermedien, welche die Vorteile der spezifischen Eigenschaften von TAR ausnützen können, unterscheiden sich erheblich von konventionellen magnetischen Medien. Im Brennpunkt stehen Materialien mit extrem hoher magnetischer Anisotropie wie chemisch geordnete FePt-Legierungen. Diese stellen zwar zum Teil höhere Anforderungen an die Depositionsanlagen – so muss z. B. FePt bei erheblich höheren Substrattemperaturen von ca. 600 °C abgeschieden werden, um die magnetisch „harte“, magnetisch hochanisotrope, chemisch geordnete fct-Phase (face centered tetragonal) dieses Materials zu erhalten –, ließen sich aber durchaus mit relativ geringfügigen Modifikationen auch auf heutigen Produktionsanlagen herstellen. Neben den Anforderungen an konventionelle Speichermedien wie kristallographische Orientierung, Korngröße, Korngrößenverteilung kommt allerdings für TAR nun zusätzlich noch die Temperaturabhängigkeit der magnetischen Eigenschaften als wichtiger Parameter hinzu. So wird die Breite des magnetischen Übergangs zwischen zwei Bits durch die Faltung des Temperaturprofils mit der Temperaturabhängigkeit des Schaltfeldes und der isothermen Verteilung des Schaltfeldes im Medium sowie das Schreibfeldprofil des Kopfes bestimmt. Der gesamte Feldgradient hängt somit neben den Eigenschaften des Schreibkopfes auch vom thermo-magnetischen Verhalten des Mediums ab. Kombiniert man z. B. ein Medium mit einem Temperaturkoeffizienten des Schaltfeldes von 10 Oe/K wie in modernen CoPtCr-basierten Legierungen (siehe dazu die gezeigte Temperaturabhängigkeit in Abb. 5a, untere Kurve) mit dem thermischen Gradienten von 10 K/nm (siehe Abb. 5b, Temperaturprofil eines Laserspots), so erhält man einen effektiven Feldgradienten von ungefähr 100 Oe/nm im Medium. Dieser Wert liegt im Bereich der heute in magnetischen Schreibköpfen erreichten Feldgradienten. Um den thermo-magnetischen Schreibvorgang in solchen Medien optimal auszunutzen, wird man deshalb versuchen, den Laserstrahl und die magnetischen Schreibelemente so genau wie möglich zu überlagern, sodass die Punkte maximaler Temperatur und maximalen magnetischen Feldes im Medium zusammenfallen. Die Situation ändert sich für Medien mit höherer magnetischer Anisotropie, für die nun der Übergang eindeutig durch das thermische Profil dominiert wird (Abb. 5b).

Ein weiterer wichtiger Aspekt ist die benötigte Schreibtemperatur – Medien mit hoher Anisotropie

Abb. 4:
 ► a) Senkrechte Speichermedien verwenden sog. Einzelpolköpfe und eine dicke weichmagnetische Unterschicht, die den magnetischen Fluss rückleitet.
 ► b) Beim thermisch assistierten Speichern wird zusätzlich eine Heizquelle (z. B. Laser) ausgenutzt, die das Schaltfeld des Speichermediums reduziert.

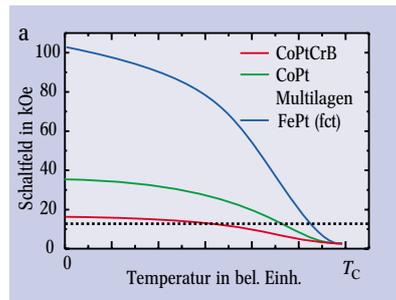
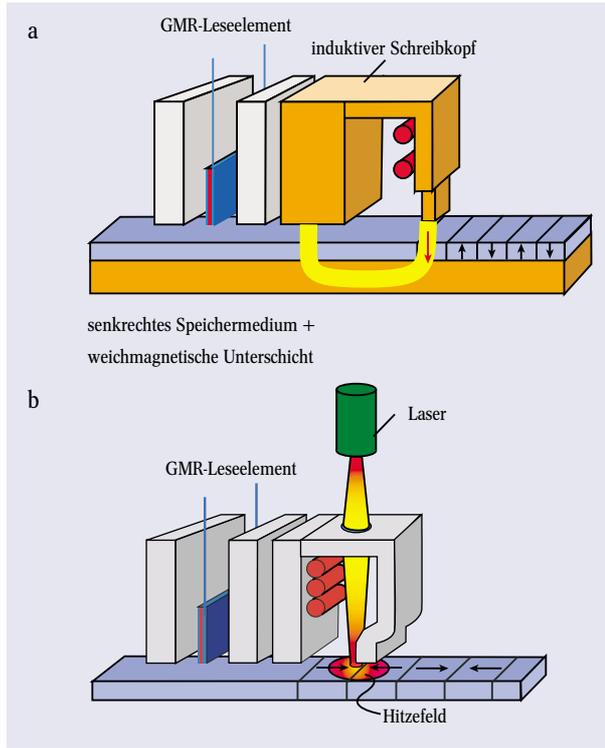
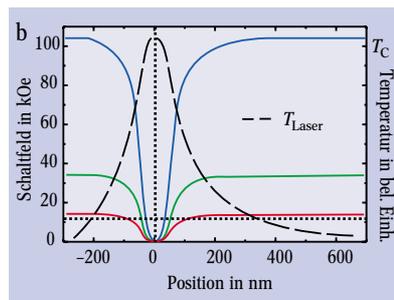


Abb. 5:
 ► a) Simulierte Temperaturabhängigkeit des Schaltfeldes für drei verschiedene Materialtypen. Die gestrichelte Linie kennzeichnet das von einem induktiven Schreibkopf erzeugte maximale Schreibfeld.



► b) Simulierte räumliche Verteilung des Schaltfeldes für die verschiedenen Materialtypen aus a) bei Aufheizen des Mediums mit einem Laserstrahl ($\varnothing = 100$ nm), der mit 10 m/s über das Medium bewegt wird. Die gestrichelte Kurve zeigt das Temperaturprofil des Lasers.

stetig ab (Curie-Weiss-Kurve). Die magnetische Anisotropie fällt jedoch gemäß $K(T) \sim M_S(T)^n$ ($n > 2$) steiler ab als die Magnetisierung, und die benötigte Schreibfeldstärke, $H_W \sim K/M_S$, wird mit steigender Temperatur reduziert. Nach Abschluss des Schreibvorganges kühlt das Speichermedium ab und das geschriebene Bit-Muster friert aufgrund der höheren Anisotropie gewissermaßen ein. Der maximale Dichtegewinn, D_{max} , von TAR gegenüber einem konventionellen System lässt sich aus einfachen geometrischen Überlegungen zu

müssen zwangsläufig bei Temperaturen nahe der Curie-Temperatur geschrieben werden (Abb. 5a). Um die mechanische Belastung von Kopf und Medien möglichst gering zu halten, ist es aber erstrebenswert, die Schreibtemperatur so niedrig wie möglich zu halten. In den meisten einfachen ferromagnetischen Materialsystemen lässt sich die Curie-Temperatur durch Variation der Zusammensetzung der magnetischen Legierung zwar verändern, meist führt dies jedoch auch zu einer Reduktion der magnetischen Anisotropie. Eine kürzlich vorgeschlagene Schichtstruktur würde dieses Problem dadurch umgehen, dass eine Schicht aus einem Material mit hoher magnetischer Anisotropie wie FePt an eine zweite Schicht aus FeRh austauschgekoppelt wird [5]. Die chemisch geordnete Phase von FeRh ist bei Raumtemperatur ein Antiferromagnet, wird aber oberhalb einer kritischen Temperatur T_N ferromagnetisch mit einem großen magnetischen Moment und sehr kleiner Anisotropie. Für hinreichend dünne FePt/FeRh-Doppelschichten bedeutet dies, dass bei Raumtemperatur die Koerzitivfeldstärke und auch die thermische Stabilität allein durch die hohe Anisotropie der FePt-Schicht bestimmt werden, dass aber während des Schreibvorgangs bei $T_W > T_N$ die benötigte Schreibfeldstärke durch das zusätzliche Moment des FeRh deutlich reduziert wird (Abb. 6).

Insgesamt bleibt festzuhalten, dass thermisch assistiertes Schreiben sicherlich das Potenzial hat, die Grenzen herkömmlicher Speichertechnologie zu überwinden und den Weg zu Speicherdichten jenseits von 1 Tbit/inch² zu ebnet. Die amerikanische Firma Seagate hat zusammen mit mehreren Universitäten ein mehrjähriges Forschungsprojekt begonnen, um in Konzeptstudien und in Labordemonstrationen die Einsetzbarkeit von TAR und seine Umsetzbarkeit in ein konkurrenzfähiges Produkt zu demonstrieren. Wie genau eine (optische) Hitzequelle in den schon jetzt sehr komplexen Herstellungsprozess eines Schreib/Lesekopfes zu integrieren und kostengünstig im großen Maßstab herzustellen wäre, ist dabei sicherlich eine der entscheidenden Fragen.

Quantum-Disk

Ein weiteres vielversprechendes Prinzip ist das Speichern von Daten in individuellen periodisch angeordneten Nanostrukturen, auch „Quantum Disk“ oder „Patterned Media“ genannt. Anstatt ein Daten-Bit in vielen magnetischen Körnern zu speichern, deren Größe und Position statistisch verteilt sind, besteht hierbei jedes Bit aus genau einer wohldefinierten Nanostruktur. In diesem Fall wird die thermische Stabilität durch das große Volumen bei moderater magnetischer Anisotropie gewährleistet. Dieses Prinzip stellt jedoch erhebliche Anforderungen an das Herstellungsverfahren, insbesondere im Hinblick auf Auflösung und Produktdurchsatz. Um beispielsweise eine Speicherdichte von 1 Terabit/inch² zu erzielen, müssen periodische Nanostruktur-Arrays mit einer maximalen Periodizität von 25 nm realisiert werden. Dies bedeutet,

dass man bei einer lithographisch vorgegebenen Linienebreite von 12,5 nm Nanostrukturen mit einer Seitenlänge von ebenfalls 12,5 nm erzeugen muss. Diese lithographische Auflösung ist mit herkömmlicher, optischer Lithographie nicht zu erreichen. Andere lithographische Technologien wie Elektronenstrahl-Lithographie sind zu zeitaufwändig und zu teuer, um direkt für die Massenproduktion eingesetzt zu werden. Allerdings wurden gerade in den letzten Jahren eine Vielzahl an neuen Methoden wie Interferenz-Lithographie und unterschiedliche Nanoimprint-Verfahren intensiv entwickelt [6]. Aber auch alternative Methoden wie die Verwendung von Block-Copolymeren, die selbstorganisierte periodische Strukturen von 20 nm (Periode ca. 40 nm) auf einer Substratoberfläche ausbilden und als Maskenmaterial zur Nanostrukturierung benutzt werden können [7], werden derzeit an unterschiedlichen Instituten intensiv untersucht.

Neben der großflächigen Nanostrukturierung spielen natürlich auch die magnetischen Eigenschaften der erzeugten Nanostrukturen für den Einsatz als magnetisches Speichermedium eine entscheidende Rolle. Eine Grundvoraussetzung für „Quantum Disks“ ist eine uniaxiale magnetische Anisotropie der Nanostrukturen, wobei im Allgemeinen eine senkrechte Anisotropie aufgrund der Kompatibilität mit einer radialsymmetrischen Disk bevorzugt wird. Geeignete Materialien findet man in metallischen Verbindungen wie FePt und CoPt, aber auch in magnetischen Multischichten wie beispielsweise Co/Pt oder Co/Pd.

Ein weiterer wichtiger Aspekt der „Quantum Disk“ ist die äußerst komplexe Systemsteuerung. Während bei konventionellen Speichermedien ein magnetisches Daten-Bit prinzipiell an jeder beliebigen Stelle des Mediums geschrieben werden kann, muss bei einer „Quantum Disk“ der magnetische Puls des Schreibkopfes in Zeit und Ort zur topographischen Position der einzelnen Nanostruktur synchronisiert werden. Abbildung 7 zeigt Beispiele, in denen es mithilfe einer Rastersondenmethode unter Verwendung eines konventionellen Schreib/Lesekopfes als Sonde gelungen

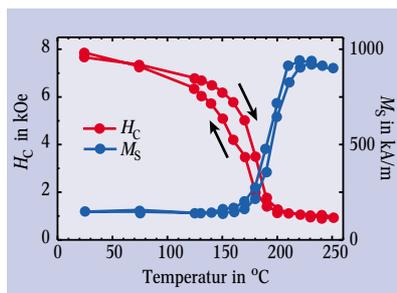


Abb. 6: Temperaturverlauf von Magnetisierung M_S und Koerzitivfeldstärke H_C für eine FeRh-FePt-Doppelschicht beim Aufheiz- und anschließenden Abkühlvorgang. Der Übergang von Anti- zu Ferromagnetismus in FeRh tritt bei $T_N \approx 200$ °C auf. Dieser Übergang ist verknüpft mit einem rapiden Anstieg der Sättigungsmagnetisierung M_S bei gleichzeitiger Reduzierung der Koerzitivfeldstärke. Die optimale Schreibtemperatur T_{write} ist daher bei maximaler Sättigungsmagnetisierung zu wählen, hier $T_{write} \approx 220$ °C.

meinen eine senkrechte Anisotropie aufgrund der Kompatibilität mit einer radialsymmetrischen Disk bevorzugt wird. Geeignete Materialien findet man in metallischen Verbindungen wie FePt und CoPt, aber auch in magnetischen Multischichten wie beispielsweise Co/Pt oder Co/Pd.

Ein weiterer wichtiger Aspekt der „Quantum Disk“ ist die äußerst komplexe Systemsteuerung. Während bei konventionellen Speichermedien ein magnetisches Daten-Bit prinzipiell an jeder beliebigen Stelle des Mediums geschrieben werden kann, muss bei einer „Quantum Disk“ der magnetische Puls des Schreibkopfes in Zeit und Ort zur topographischen Position der einzelnen Nanostruktur synchronisiert werden. Abbildung 7 zeigt Beispiele, in denen es mithilfe einer Rastersondenmethode unter Verwendung eines konventionellen Schreib/Lesekopfes als Sonde gelungen

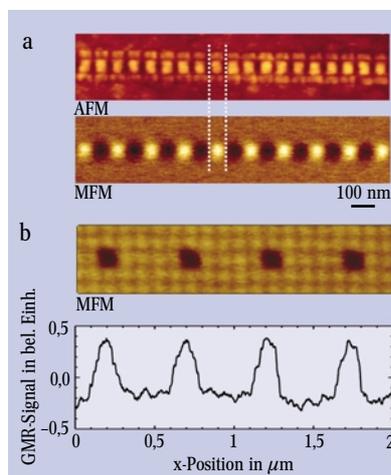


Abb. 7:

► a) Rasterkraftmikroskopiebild einer lithographisch hergestellten Reihe von magnetischen Nanostrukturen. Darunter ein magnetisches Rasterkraftmikroskopiebild, das nach dem Schreiben eines alternierenden magnetischen Musters aufgezeichnet wurde. Die Magnetisierungsrichtung steht senkrecht zur Bildebene.

► b) Kontrolliertes Adressieren von individuellen Nanostrukturen in einer periodischen Anordnung dichtgepackter Nanostrukturen. Darunter das dazugehörige Auslesesignal eines GMR-Sensors.

ist, Daten (a) in eine einzelne Reihe und (b) in eine periodische Anordnung dichtgepackter Nanostrukturen kontrolliert zu schreiben und wieder auszulesen.

Konzeptionell stellen „Quantum Disks“ sicherlich eine Alternative zu herkömmlichen Datenspeichern dar, die es erlauben sollte, in den Terabit-Bereich vorzustoßen. Erste vielversprechende Experimente mit Speicherdichten von bis zu 200 Gbit/inch² gelangen bereits an Teststrukturen [8], allerdings sind die dazu notwendigen Herstellungsverfahren, was ihre industrielle Umsetzbarkeit in eine kostengünstige Massenproduktion betrifft, noch im Anfangsstadium.

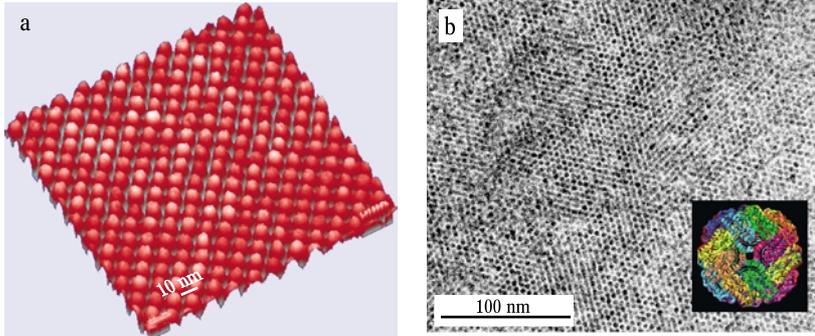


Abb. 8:
a) TEM-Bild einer Monolage periodisch angeordneter FePt-Nanopartikel mit einem Durchmesser von 4 nm. Der Bildausschnitt beträgt 130 nm × 130 nm.
b) Hexagonale Anordnung einer Monolage monodisperser Eisenoxid-Nanopartikel, die in einer Proteinhülle ein-

geschlossen sind. Das Inset zeigt eine Computersimulation der Ferritin-Molekülstruktur. Das Molekül hat einen Durchmesser von 12 nm und besteht aus 24 Untereinheiten, die farblich gekennzeichnet sind. (Quelle: NanoMagnetics Ltd.)

Nanopartikel

Fasst man die in den vorangegangenen Abschnitten aufgeführten Kriterien für ein ideales Speichermedium zusammen, so gelangt man zu einem Material mit

- ▶ 1) der höchstmöglichen magnetischen Anisotropie (thermische Stabilität) bei Gewährleistung der Schreibbarkeit,
- ▶ 2) der daraus resultierenden kleinstmöglichen Korngröße,
- ▶ 3) der kleinstmöglichen Korngrößenverteilung,
- ▶ 4) regelmäßiger Anordnung der Körner und
- ▶ 5) vollständiger magnetischer Orientierung.

Herkömmliche Vakuumdepositionsverfahren wie z. B. das heute überwiegend eingesetzte „magnetron sputtering“ erlauben zwar eine ausgezeichnete Kontrolle über (1), (2) und (5), die Anordnung und Größenverteilung der Körner wird aber in erster Linie durch Dichte und Anzahl der Nukleationszentren auf dem Substrat und die anschließende Wachstumsdynamik wie (Oberflächen-)Diffusion und mithin durch statistische Prozesse bestimmt. Obwohl es in den letzten Jahren erhebliche Fortschritte in ingenieur-technischem Verständnis und Kontrolle dieser Prozesse gegeben hat, beträgt die Standardabweichung der Korndurchmesserverteilung in den besten heute kommerziell erhältlichen Medien immer noch ungefähr 30 %. Ein neuartiger Ansatz, annähernd monodisperse Nanopartikel magnetisch hochanisotroper Materialien wie FePt mithilfe eines nasschemischen Verfahrens herzustellen [9], ist deshalb auf sehr großes Interesse gestoßen und hat innerhalb kürzester Zeit zu breitgefächerten Forschungsaktivitäten geführt. Zum gegenwärtigen Zeitpunkt ist es verschiedenen Gruppen mit diesen Verfahren gelungen, monodisperse Nanopartikel (Durchmesser: 3 nm,

Standardabweichung $\leq 5\%$) binärer Legierungen in Lösung herzustellen und in Einzel- und Multilagenauf Substrate abzuscheiden (Abb. 8a). Ein völlig anderes Herstellungskonzept wird von der englischen Firma Nanomagnetics verfolgt. Die Idee besteht darin, mit Hilfe des Proteins „Ferritin“ magnetisches Material im Zentrum des Proteins anzulagern [10]. Ferritin hat einen Außendurchmesser von etwa 12 nm und wird in lebenden Organismen zur Anreicherung und Lagerung von Eisen benutzt. Durch Verwendung von „leeren“ Proteinen („Apo-ferritin“) und unter Zugabe von magnetischen Materialien in eine Lösung lassen sich magnetische, monodisperse Nanopartikel mit einer Größe von 8 nm im Protein anreichern. Nach Aufbringen der „gefüllten“ Proteine auf eine Substratoberfläche und thermisches Anlassen, welches zu einer „Verkohlung“ der Proteinhülle führt, erhält man regelmäßig angeordnete magnetische Nanopartikel, die in eine Kohlenstoffmatrix (Proteinreste) eingebettet sind (Abb. 8b).

Die entscheidenden Schritte auf dem Weg zur Nutzung chemisch synthetisierter oder protein-induzierter Nanopartikel in magnetischen Speichermedien, auf die sich die aktuelle Forschung zu konzentrieren beginnt, liegen im Verständnis (und der großtechnischen Kontrolle) der für die Herstellung benötigten Prozessbedingungen und in der grundlegenden Schwierigkeit, die Nanopartikel aus der Lösung mit einer vorgegebenen magnetischen Orientierung auf das Substrat abzuscheiden.

Ausblick

Aus heutiger Sicht ist die Einführung von magnetischen Medien mit senkrechter Anisotropie die aussichtsreichste Technologie, um in absehbarer Zukunft longitudinale Medien abzulösen und Speicherdichten von bis zu 1 Tbit/inch² zu erreichen. Die oben diskutierten Ansätze lassen konzeptionell magnetische Datenspeicherung mit Dichten von mehreren Tbit/inch² möglich erscheinen. Ob diese Investitionen im gegenwärtigen durch rapiden Preisverfall gekennzeichneten Umfeld ökonomisch zu rechtfertigen sind, wird aber von einer weiteren entsprechenden Kostenoptimierung in Design und Produktion und das Vordringen in neue Märkte mit höheren Gewinnmargen abhängen. Darüber hinaus unterliegen die magnetischen Einheiten in jeder magnetischen Speichertechnologie letztlich dem superparamagnetischen Effekt, der einem Vorstoß in atomare Dimensionen Grenzen setzt. Einen alternativen Ansatz zur Datenspeicherung bietet eine völlig neue Speichertechnologie, die unter dem Namen „Millipede“ für reichlich Schlagzeilen gesorgt hat. Das Millipede-Konzept [11] basiert auf der Verwendung von Rastersondenmethoden und hat zumindest konzeptionell das Potenzial, Datenspeicherung bis in den atomaren Bereich zu betreiben. Nanometergroße Spitzen erlauben es, äußerst kleine Datenbits in geeignete Speichermedien zu schreiben. Hohe Datenraten lassen sich durch Verwendung einer großen Anzahl von parallelen Spitzen erzielen, die auf einem zwei-dimensionalen Träger in einem Array positioniert werden. Ein gegenwärtig in der Erprobung befindlicher Prototyp verwendet bereits 1024 Spitzen; und in einigen Jahren, so wird prophezeit, sollten Anwendungen wie beispielsweise briefmarkengroße Speicherkarten für Digitalkameras oder MP3-Spieler auf dem Markt erhältlich sein. Um allerdings mehrere Terabits auf einer 65-mm-Festplatte zu speichern, müssten Arrays mit 10⁵ bis 10⁶ Spitzen geschaltet und kontrolliert werden.

3) vgl. K. Buse und E. Sörgel, Physik Journal Mai 2003, S. 37

Darüber hinaus werden immer wieder optische Methoden, im Besonderen die holographische Datenspeicherung als neuartige Speichertechnologie diskutiert. Deren Markteinführung scheiterte allerdings bislang an den unzureichenden Eigenschaften der Speichermaterialien.³⁾

Zumindest ist für die nähere Zukunft keine Technologie in Sicht, die in der Lage wäre, die magnetischen Datenspeicher aus ihrer dominanten Marktposition zu verdrängen. Man darf gespannt sein, was die Zukunft bringen wird, aber eines ist gewiss, der Konsument wird in jedem Fall der Gewinner sein.

Literatur

- [1] A. Moser et al., J. Phys. D: Appl. Phys. **35**, R157 (2002)
- [2] US patent 6280813 (2001), E. E. Fullerton et al., Appl. Phys. Lett. **77**, 3806 (2000); E. N. Abarra et al., Appl. Phys. Lett. **77**, 2581 (2000)
- [3] J. J. M. Ruigrok, J. Magn. Soc. Jpn. **25**, 313 (2001)
- [4] T. W. Ebbesen et al., Nature **391**, 667 (1998)
- [5] J.-U. Thiele, S. Maat, E. E. Fullerton, Appl. Phys. Lett. **82**, 2859 (2003)
- [6] C. Ross, Annu. Rev. Mater. Res. **31**, 203 (2001)
- [7] M. Park et al., Science **276**, 1401 (1997)
- [8] M. Albrecht et al., Appl. Phys. Lett. **81**, 2875 (2002)
- [9] S. Sun et al., Science **83**, 47 (1999)
- [10] E. Mayes et al., IEEE Trans. Magn. **39**, 624 (2003)
- [11] P. Vettiger, G. Binnig, Scientific American **1**, 47 (2003)

Die Autoren

Manfred Albrecht hatte sich nach seiner Promotion an der Uni Konstanz intensiv mit der Legierungsbildung von magnetischen Speichermaterialien auf Schicht-halbleiteroberflächen beschäftigt. Seit nunmehr zwei Jahren arbeitet er als *post doc* am Hitachi San Jose Research Center an der Untersuchung und Optimierung der Speichereigenschaften von magnetischen Nanostrukturen. Neben



seinem Interesse für die Wissenschaft ist er begeisterter Sportler und liebt Segel- ausflüge entlang der französischen Riviera.



Nach dem Studium der Physik in Hannover und der Promotion in Basel kam **Jan-Ulrich Thiele** 1996 „für 1 Jahr“ als *post doc* ans IBM Almaden Research Center in San Jose. Dort arbeitete er zunächst an der Erforschung der physikalischen Grenzen konventioneller Da-

tenspeicher und seit nunmehr drei Jahren als *Research Staff Member* an Konzepten, wie diese Grenzen zu umgehen seien. Entgegen landläufigen Vorstellungen von Kalifornien verbringt er seine Freizeit am liebsten in der Sierra Nevada beim Bergsteigen und Skifahren.

Während der letzten sieben Jahre hat sich **Andreas Moser** am Hitachi San Jose Research Center zunächst als *post doc* und später als *Research Staff Member* mit den Eigenschaften und den physikalischen Grenzen von konventionellen magnetischen Speichersystemen beschäftigt. Zuvor promovierte er an der Uni Basel mit Arbeiten über Flusslinien in Hochtemperatur-Supraleitern. Seine Freizeit verbringt er am liebsten im Freien mit Segeln, Skifahren und anderen Freizeitaktivitäten, welche Kalifornien zu Wasser und zu Land bietet.

