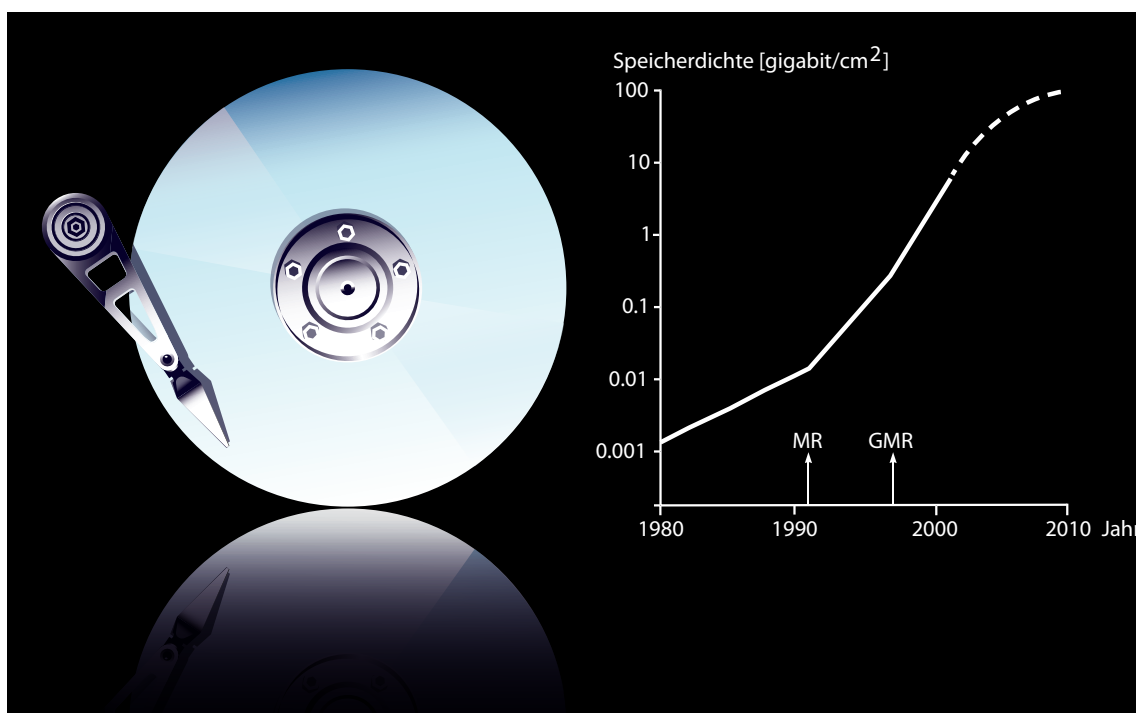


# Der Nobelpreis für Physik 2007

*Der Nobelpreis für Physik 2007 wird ALBERT FERT und PETER GRÜNBERG verliehen für ihre Entdeckung des Riesenmagnetowiderstandes. Anwendungen dieses Phänomens haben die Technik revolutioniert, mit der Computer-Festplatten die Information auslesen. Die Entdeckung spielt auch eine grosse Rolle für verschiedene magnetische Sensoren wie auch für die Entwicklung einer neuen Generation Elektronik. Die Nanotechnik kann ihren Einsatz im Riesenmagnetowiderstand als eine ihrer ersten grossen Nutz- anwendungen verbuchen.*

## Mit Nanotechnik von Riesenwiderstand zu Zwergelektronik

Daß Elektronik ständig kleiner und kleiner wird, sieht man in der IT-Welt von heute als selbstverständlich an. Wir ziehen kaum noch die Augenbrauen hoch über den alljährlichen Zuwachs von noch kraftvolleren und leichteren Rechnern auf dem Markt. Ganz besonders Computer-Festplatten sind kleiner geworden – der platzraubende Kasten unter dem Schreibtisch ist bald nur noch eine blasse Erinnerung, wenn sich eine gleiche oder grössere Datenmenge nun genauso gut in einem schlanken Laptop unterbringen läßt. Und heute, wo bald jeder einen MP3-Spieler an sich trägt, fragt keiner mehr danach, wie vielen CD-Platten eigentlich die Musikmenge in der winzigen Festplatte entspricht. Vor kurzem erst wurden Festplatten mit einem Terabyte (Tausend Milliarden Byte) für den Hausgebrauch vorgestellt.



Das Diagramm der IT-Branche, in dem die beschleunigte Verdichtung so dargestellt wird, als folgte sie einem Naturgesetz, läßt diese technische Entwicklung trügerisch einfach erscheinen. Doch in Wirklichkeit stützt sich die gegenwärtige IT-Revolution auf ein kompliziertes Zusammenspiel zwischen grundlegenden wissenschaftlichen Fortschritten und technischem Feinschliff. Genau davon handelt der Nobelpreis in Physik 2007.

Damit Anwendungen, wie von tragbaren Computern und vielen MP3-Spielern oder kraftvollen Internet-Suchmaschinen, möglich werden, muss die Information dicht gepackt werden. Die Daten auf einer Festplatte bestehen aus Bereichen, die in verschiedene Richtungen magnetisiert werden, wobei eine bestimmte Richtung des magnetischen Feldes einer Null entspricht und die Gegenrichtung einer Eins. Zum Abrufen der auf der Festplatte gespeicherten Daten wird ein Lesekopf verwendet, der die Platte abtastet und die verschiedenen Richtungen der magnetischen Felder registriert. Wird die Festplatte kleiner, muß auch jedes einzelne magnetische Bit kleiner werden. Jedes kleine magnetische Feld wird damit auch schwächer und schwieriger zu lesen. Je mehr Information man auf eine Festplatte packen möchte, desto empfindlicher muß die dafür notwendige Lesetechnik werden.

Ende der 1990er Jahre wurde eine völlig neue Technik bei den Leseköpfen für Festplatten zum Standard, und das ist der entscheidende Grund, weshalb wir in letzter Zeit eine so schnelle Entwicklung hin zu immer größerer Speicherkapazität in den Festplatten gesehen haben. Die neue Lesetechnik baut auf einen physikalischen Effekt, den die beiden diesjährigen Nobelpreisträger in Physik zum ersten Mal vor fast zwanzig Jahren sahen. Der Franzose Albert Fert und der Deutsche Peter Grünberg entdeckten 1988, jeder für sich und unabhängig von einander, den so genannten Riesenmagnetowiderstand – auf englisch *giant magnetoresistance*, *GMR*. Für diese Entdeckung erhalten nun beide den Nobelpreis in Physik.

## Von Lord Kelvin zur Nanotechnik

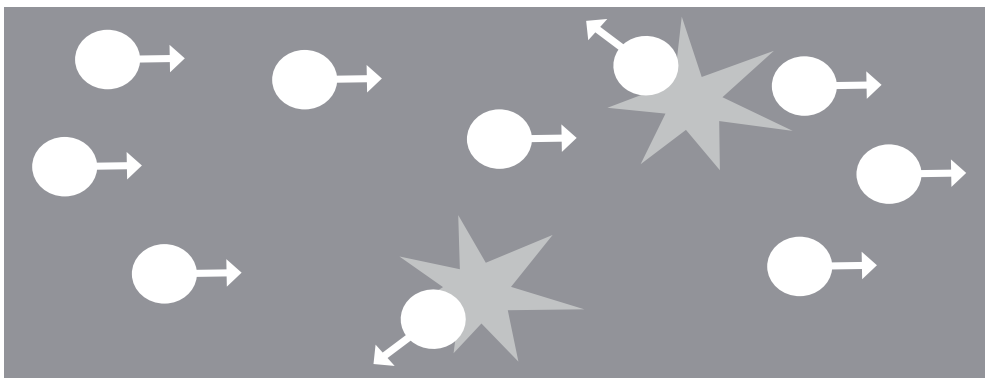
Ursprünglich wurden Induktionsspulen in Leseköpfen verwendet, bei denen man die Tatsache nutzte, daß eine Veränderung des magnetischen Feldes einen Strom durch eine elektrische Spule erzeugt (induziert). Diese Technik ausreichend zu verbessern war jedoch schwierig, als die immer mehr verdichteten Festplatten immer empfindlichere Leseköpfe erforderten. Für das Einschreiben auf die Festplatte werden jedoch nach wie vor Induktionsspulen verwendet.

Daß der elektrische Widerstand in verschiedenen Materialien, wie Eisen, von magnetischen Feldern beeinflußt werden kann, ist schon seit langer Zeit bekannt. Der britische Physiker Lord Kelvin veröffentlichte bereits 1857 einen Artikel, in dem er nachwies, daß der elektrische Widerstand abnimmt, wenn ein magnetisches Feld längs eines Eisenleiters gelegt wird, aber zunimmt, wenn das magnetische Feld quer zum Leiter liegt. Diesen richtungsabhängigen (auch anisotrop genannten) Magnetwiderstand (magnetoresistance, MR) nützte man vor dem Riesenmagnetowiderstand aus für das Lesen der Daten auf Festplatten. Doch allmählich endeten bei dieser Technik die Entwicklungsmöglichkeiten. Die Empfindlichkeit ließ sich nicht ausreichend genug verbessern.

Eine Voraussetzung für die Entdeckung des GMR-Effekts gaben die neuen Möglichkeiten zur Herstellung von nanometerdünnen Schichten, die seit den 1970er Jahren entwickelt wurden. Ein Nanometer ist ein milliardstel eines Meters, und hier geht es darum, Systeme von Schichten aufzubauen, deren Einzelschichten eine Dicke von nur wenigen Atomen haben. Im Atombereich verhält sich die Materie anders und häufig kann man neue Materialeigenschaften entdecken, wenn man die Voraussetzungen findet, mit nanometerfeinen Strukturen zu arbeiten. Das gilt nicht nur für Magnetismus und elektrische Leitfähigkeit, sondern kann sich beispielsweise auch bei den mechanischen, chemischen und optischen Eigenschaften eines Werkstoffs zeigen. Die GMR-Technik kann deshalb als eine der ersten Anwendungen für die heute in so vielen verschiedenen Zusammenhängen diskutierte Nanotechnik angesehen werden.

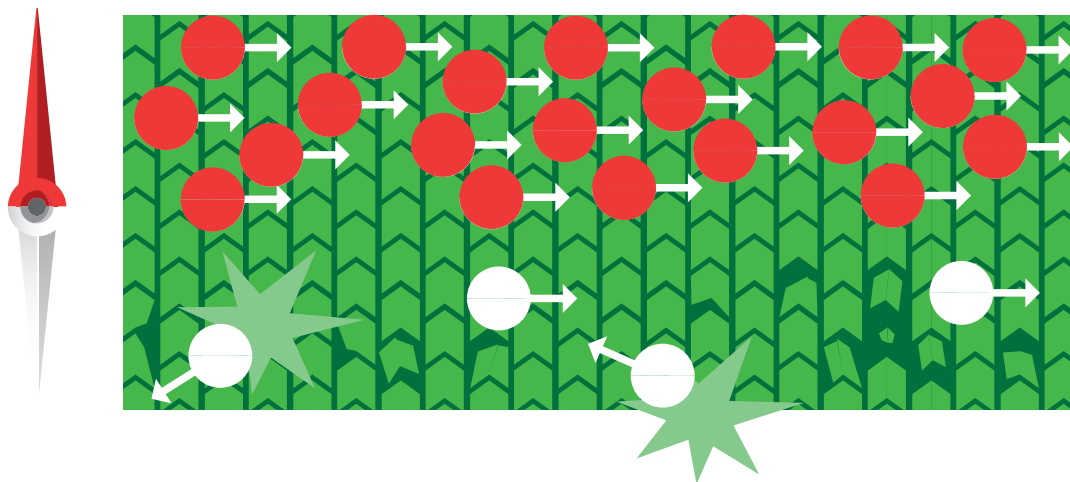
## Magnetfeld und Widerstand

In einem Leiter aus Metall wird die Elektrizität mittels Elektronen transportiert, die sich frei im Material bewegen können. Der Strom wird geleitet, indem sich die Elektronen in eine bestimmte Richtung bewegen – je gerader der Weg, desto besser die Leitfähigkeit. Der elektrische Widerstand entsteht dadurch, daß die Elektronen von ihrem geraden Weg abweichen, wenn sie sich durch Unebenheiten und Verunreinigungen im Material bewegen. Je größer die Streuung der Elektronen, desto höher der Widerstand.



*Der elektrische Widerstand in einem Leiter entsteht dadurch, dass Elektronen an Verunreinigungen im Material gestreut werden und damit an ihrem Vorwärtkommen behindert werden.*

In magnetischen Materialien wird die Streuung auch von der Richtung des magnetischen Feldes beeinflusst. Der starke Zusammenhang zwischen magnetischem Feld und Widerstand durch den Riesenmagnetowiderstand entsteht aufgrund des dem Elektron eigenen magnetischen Moments – der quantenmechanische Eigenschaft des Spins, welcher zwei entgegengesetzte Richtungen einnehmen kann. In einem magnetischen Material zeigt der Spin der meisten Elektronen in die gleiche Richtung (parallel), während eine geringere Anzahl in die entgegengesetzte Richtung weist (antiparallel). Dieses Ungleichgewicht ist die Ursache für Magnetisierung und der Grund, weshalb Elektronen mit unterschiedlichen Spinrichtungen unterschiedlich stark streuen in ungleichmäßigem und verunreinigtem Material und vor allem an Grenzschichten zwischen verschiedenen Materialien. Welche Spinrichtung sich am stärksten ausbreitet, hängt von der Art der Materialien ab.



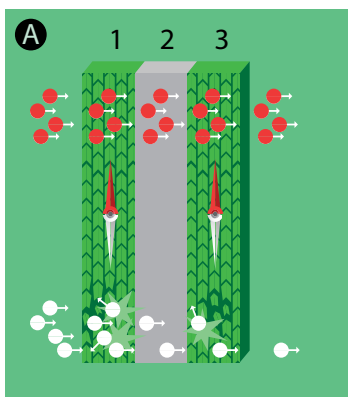
*In einem magnetischen Leiter haben die meisten Elektronen (rot) einen Spin, der parallel zum Magnetfeld gerichtet ist. Eine Minderzahl der Elektronen (weiß) hat einen Spin, der entgegengerichtet ist. In eben diesem Beispiel werden die Elektronen am stärksten gestreut, deren Spin dem Magnetfeld entgegengesetzt ist.*

## Riesenmagnetowiderstand – GMR

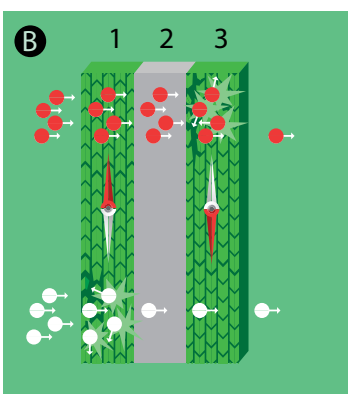
Ein Beispiel für das einfachste System des Riesenmagnetowiderstands besteht aus einer Schicht nicht-magnetischen Metalls zwischen zwei Schichten eines magnetischen Metalls (siehe Bild unten). Im Innern des magnetischen Materials und vor allem in der Grenzschicht zwischen dem magnetischen und nicht-magnetischen Material werden Elektronen mit unterschiedlichem Spin unterschiedlich stark gestreut. Betrachten wir den Fall der Elektronen, deren Spin parallel zur Magnetisierungsrichtung liegt (1). Der Widerstand wird folglich bei diesem Beispiel am größten für Elektronen mit antiparallelem Spin. Kommen die Elektronen dann in das nicht-magnetische Material, werden sie alle, unabhängig von der Spinrichtung, genauso viel gestreut (2). In der Grenzschicht und an und in der nächsten magnetischen Schicht (3) streuen wieder die Elektronen mit antiparallelem Spin mehr als die mit parallelem Spin.

Zeigt die Magnetisierung der beiden magnetischen Schichten in die gleiche Richtung, bedeutet dies, daß die meisten Elektronen (mit parallelem Spin) leicht vorankommen und der Gesamtwiderstand deshalb niedrig wird (A). Ist die Magnetisierung der beiden Schichten dagegen gegenläufig, bedeutet dies, daß alle Elektronen an einer Schicht einen antiparallelen Spin haben. Unabhängig von der Spinrichtung gibt es dann keine Elektronen, die leicht durch das gesamte System gelangen können, der Widerstand insgesamt wird deshalb hoch (B).

Liegt die Magnetisierung in Schicht (1) fest, während die Richtung in Schicht (3) von den magnetischen Feldern beeinflusst wird, über die der Lesekopf fährt, bedeutet dies, daß die Felder in den zwei magnetischen Schichten abwechselnd gegenläufig bzw. gleichläufig sind. Die Folge ist, daß der Widerstand und damit der Strom im Lesekopf wechseln. Dieser Strom ist das Ausgangssignal für den Lesekopf – hoher Strom kann eine Eins darstellen, niedriger Strom eine Null.



Wenn die Richtung des Magnetfeldes in beiden magnetischen Schichten die gleiche ist, können Elektronen mit parallelem Spin durch das ganze System flitzen ohne besonders viel gestreut zu werden (oberer Teil im Bild). Elektronen mit antiparallelem Spin werden dagegen stark gestreut (unterer Teil im Bild), aber insgesamt wird der Widerstand trotzdem gering.



Wenn aber die Feldrichtungen in den beiden magnetischen Schichten gegeneinander stehen, haben alle Elektronen antiparallelen Spin in der einen oder der anderen Schicht, und damit werden sie alle stark gestreut. Das führt dazu, daß der Widerstand insgesamt hoch wird.

## **GMR wurde schnell zum Stand der Technik**

Mitte der 1980er Jahre erkannten Wissenschaftler in der Magnetismusforschung die Möglichkeiten, die nanometerdünne Schichten bieten konnten. Albert Fert und seine Kollegen schufen Schichtstrukturen von etwa dreißig Einzelschichten – mit Dicken von jeweils einigen wenigen Atomen – bestehend aus abwechselnd magnetischem Eisen und dem nicht-magnetischen Metall Chrom. Für ein erfolgreiches Gelingen mußten sie nahezu in Vakuum arbeiten und ein Gas aus Eisenatomen beziehungsweise Chromatomen bei sehr niedrigem Druck anwenden. Die Atome des Gases bleiben dann nacheinander auf der Oberfläche haften, die somit Atomschicht für Atomschicht aufgebaut wird. Peter Grünbergs Gruppe schuf auf ähnliche Weise ein etwas einfacheres System mit nur zwei oder drei Schichten aus Eisen und mit einer Schicht Chrom dazwischen.

Unter anderem wegen dieser größeren Anzahl von Schichten in Ferts System fiel der von ihm festgestellte Magnetwiderstand größer aus als der bei Grünberg. Die französische Gruppe nahm eine magnetfeldabhängige Differenz des Widerstands von 50 Prozent wahr, während die deutsche höchstens eine 10-prozentige Veränderung feststellen konnte. Der grundlegende Effekt und die dahinter liegende Physik waren jedoch gleich und beide Gruppen verstanden, daß sie ein völlig neues physikalisches Phänomen wahrgenommen hatten. Mit dem herkömmlichen Magnetwiderstand hätte man zwischen der einen und der anderen Magnetfeldrichtung nicht mehr als eine Differenz von einigen Prozent elektrischem Widerstand gemessen. Albert Fert war es, der zur Beschreibung des neuen Effekts den Begriff Riesenmagnetowiderstand, GMR, prägte. In seinem ersten Artikel erwähnte er, daß die Entdeckung eine große Bedeutung für Anwendungen finden könnte. Auch Peter Grünberg sah die praktische Nutzung dieses Phänomens und reichte gleichzeitig mit seinem ersten Forschungsartikel hierzu eine Patentanmeldung ein.

Für eine kommerzielle Nutzung dieser Technik war es jedoch notwendig, die Schichtsysteme industriell fertigen zu können. Die Methode, der sich sowohl Grünberg als auch Fert bedienten (die so genannte Epitaxie), war zeitraubend und kostspielig und eher für ein Forschungslabor geeignet als für eine technische Herstellung in großem Maßstab. Deshalb war es ein wichtiger Schritt, als der in den USA tätige Engländer Stuart Parkin zeigte, daß die gleiche Wirkung mit einer einfacheren Technik möglich war (dem genannten Sputtering), die unter anderem kein so hohes Vakuum erforderte, und mit der das GMR-System „am Fließband“ hergestellt werden konnte. Es zeigte sich kurzum, daß der GMR-Effekt keineswegs so perfekte Schichtstrukturen erforderte, wie zunächst angenommen. Dieses relativ einfache Herstellungsverfahren in Kombination mit einer hohen Empfindlichkeit der GMR-Köpfe bedeutete, daß diese schon bald nach der Produktion des ersten kommerziellen GMR-Kopfs im Jahre 1997 zur Standardausführung von Festplatten wurden.

## **Elektronik neu: Spintronik**

GMR stand jedoch nicht nur für einen technischen Durchbruch, wenn es darum ging, dicht gepackte Datenmengen von Festplatten auslesen zu können. Ebenso interessant dürfte sein, daß man diese Technik als ersten Schritt ansehen kann zur Entwicklung einer völlig neuen Elektronikform, auch Spintronik genannt. Spintronik zeichnet sich darin aus, daß sie den Spin des Elektrons ausnützt, und nicht, wie bei der herkömmlichen Elektronik, nur seine elektrische Ladung. Voraussetzung für die Spintronik sind gerade die kleinen Dimensionen, mit denen die Nanotechnik arbeitet. Die Richtung des Elektronenspins bleibt nämlich nur über kürzere Strecken beibehalten, bei dickeren Schichten wechselt der Spin die Richtung, ehe man die verschiedenen Eigenschaften der unterschiedlichen Spinrichtungen ausnützen kann (beispielsweise höheren und niedrigeren Widerstand).

Im Zuge der GMR-Technik ist es zum Beispiel gelungen, ein ähnliches System zu bauen, bei dem das nicht-magnetische Metall in der Zwischenschicht durch eine dünne Schicht von elektrisch isolierendem Material ersetzt wird. Eigentlich sollte durch die isolierende Schicht elektrischer Strom überhaupt nicht geleitet werden können; doch wenn sie genügend dünn ist, schaffen die Elektronen es, durchzukommen mit Hilfe des Tunneleffekts. Deshalb wird dieses System TMR, Magnetischer Tunnelwiderstand, genannt. Beim TMR werden von sehr schwachen magnetischen Feldern noch größere Unterschiede beim Widerstand gebildet und die nächste Generation von Leseköpfen bedient sich dieser Technik.

## Ein Speicher für Alles?

Eine weitere Anwendung der Spintronik, die bereits das Licht der Welt erblickt hat, ist ein magnetischer Arbeitsspeicher, genannt MRAM. Neben der Festplatte, auf der die Information permanent gespeichert ist, haben Computer ein Speichersystem mit schnellem Zugriff, genannt RAM (random access memory). Im Arbeitsspeicher werden die vom Computer zur Arbeit benötigten Daten vorübergehend gespeichert, doch können die heutigen Standardarbeitsspeicher die Information nicht auf Dauer speichern. Während ein Text gerade auf dem Computer geschrieben wird, ist er nur im Arbeitsspeicher eingelagert. Bei Stromausfall oder wenn jemand den Computer ohne vorheriges Speichern abschalten sollte, geht der Text verloren. Erst wenn man die Taste „Speichern“ drückt, wird der Text auf die Festplatte übertragen und unauslöschlich gespeichert.

Der springende Punkt der MRAM-Technik ist, daß man durch Verwendung von TMR für das Einschreiben und Auslesen einen Speicher mit schnellem Zugriff schaffen kann, der an Stelle der langsameren Festplatten auch als Arbeitsspeicher eingesetzt werden kann. Gleichzeitig ist MRAM ein nicht-flüchtiger Speicher, der nicht von einer Stromversorgung abhängig ist, da er wie die Festplatte auf der Grundlage von stabilen Veränderungen der Magnetisierungsrichtung von Bits beruht. Ein MRAM kann deshalb möglicherweise zu einer Art Universalspeicher entwickelt werden, der den herkömmlichen Arbeitsspeicher und die Festplatte zugleich ersetzt. Durch seine Eignung als „Rundum“-Speicher kann der MRAM eine besonders große Bedeutung erhalten für Applikationen mit kleinen eingebauten Rechnersystemen für alles Mögliche, von programmierbaren Küchenherden bis hin zu Automotoren.

Die Entdeckung des GMR öffnet damit auch die Tür zu einer ganz neuen Technikwissenschaft, der Spintronik, in der beim Elektron sowohl seine Ladung wie auch sein Spin genützt werden. Die erwachende Nanotechnik war einmal eine Voraussetzung bei der Entdeckung des GMR; nun ist die Spintronic eine Triebfeder für die schnelle Entwicklung durch die Nanotechnik. Dieses Gebiet ist daher ein besonders deutliches Beispiel, wie grundlegende Wissenschaft und Technik sich Seite an Seite entwickeln und gegenseitig befruchten.

## LINKS UND MEHR LESETIPPS

Mehr Information zu den Preisen dieses Jahres, darunter einen weiterführenden wissenschaftlichen Artikel auf englisch, findet man auf der Website der Königl. Schwedischen Akademie der Wissenschaften, [www.kva.se](http://www.kva.se), und auf <http://nobelprize.org>. Dort kann man auch die Pressekonferenz als Web-TV miterleben. Weitere Informationen über Ausstellungen und Veranstaltungen zu den Nobel-Preisen können unter [www.nobelmuseum.se](http://www.nobelmuseum.se) abgerufen werden.

### Weiterführende Veröffentlichungen

Ganz frisch im September 2007:

„*Kopplung macht den Widerstand*“ von Peter Grünberg, *Physik Journal* Bd. 6 (2007) Nr. 8/9 S. 33–39. Wiley-VCH-Verlag, Weinheim (deutsch). Internet-Version: [www.pro-physik.de/Phy/pjtoc/25753/3](http://www.pro-physik.de/Phy/pjtoc/25753/3)

„*Giant steps with tiny magnets*“ von Agnes Barthélémy und Albert Fert et al., *Physics World* Nov. 1994 (englisch).

„*Spintronics*“ von Dirk Grundler, *Physics World* April 2002 (englisch).

### Wissenschaftliche Originalartikel

„*Giant Magnetoresistance of (001)Fe/(001)Cr Magnetic Superlattices*“ von M.N. Baibich et al., *Physical Review Letters* Vol. 61, No. 21 (1988). (Albert Fert's Originalartikel).

„*Enhanced magnetoresistance in layered magnetic structures with antiferromagnetic interlayer exchange*“ von G. Binasch et al., *Physical Review B*, Vol. 39, No. 7 (1989). (Peter Grünberg's Originalartikel).

### Link

Präsentation der GMR-Technik auf der Website von IBM (Hintergrund, Graphik und Animationen): [www.research.ibm.com/research/gmr.html](http://www.research.ibm.com/research/gmr.html)

## DIE PREISTRÄGER

### ALBERT FERT

Unité Mixte de Physique CNRS/ THALES,  
Université Paris-Sud  
Domaine de Corbeville  
FR-91404 Orsay  
FRANKREICH  
[www2.cnrs.fr/en/338.htm](http://www2.cnrs.fr/en/338.htm)

Französischer Staatsbürger. Geb. 1938 in Carcassonne, Frankreich. Promotion 1970 an der Université Paris-Sud, Orsay, Frankreich. Professor an der Université Paris-Sud, Orsay, Frankreich, seit 1976. Wissenschaftlicher Leiter der Unité Mixte de Physique CNRS/THALES, Université Paris-Sud, Orsay, Frankreich, seit 1995.

### PETER GRÜNBERG

Forschungszentrum Jülich GmbH  
Institut für Festkörperforschung  
DE-52425 Jülich  
DEUTSCHLAND  
[www.fz-juelich.de/portal/gruenberg\\_e](http://www.fz-juelich.de/portal/gruenberg_e)

Deutscher Staatsbürger. Geb. 1939 in Pilsen. Promotion 1969 an der Technischen Universität Darmstadt, Deutschland. Seit 1972 Professor am Institut für Festkörperforschung, Forschungszentrum Jülich, Deutschland.