Spintronik einfach erklärt: Wie der Spin von Elektronen Daten speichert

ELEKTRONIK MIT DEM SPIN

Im Juni 2002 stellte eine Gruppe um Russell Cowburn in der Zeitschrift Science ein Logikgatter vor, das ohne fließende Ladung rechnete. Ein Draht aus einer Nickel-Eisen-Legierung, schmaler als ein Mikrometer, bildete eine spitze Kehre. Ein in der Drahtebene rotierendes Magnetfeld schob die Grenze zwischen zwei Magnetisierungsrichtungen, eine sogenannte Domänenwand, durch diese Kehre, und dabei kehrte sich die gespeicherte Information um. Aus einer magnetischen 1 wurde eine 0 und umgekehrt [1]. Rechnen mit Magneten ist seither vor allem Forschung geblieben [2]. Verwandt damit ist eine Idee, die still und leise die Datenspeicher der Welt verändert hat: Information nicht nur über die Ladung von Elektronen zu verarbeiten, sondern auch über ihren Spin. Sie heißt Spintronik.

Ein winziger Magnet in jedem Elektron

Dass Elektronen einen Spin haben, schlugen George Uhlenbeck und Samuel Goudsmit 1925 vor, um Feinheiten in den Spektren von Atomen zu erklären [3]. Man stellt sich den Spin gern als Eigendrehung vor, doch das Bild hinkt: Das Elektron ist nach allem, was man weiß, punktförmig, und es dreht sich nichts. Der Spin ist eine rein quantenmechanische Eigenschaft, die sich wie ein Drehimpuls verhält und gemessen immer nur zwei Werte zeigt, „auf“ oder „ab“. Mehr dazu, und warum Elektronen deshalb zu den Fermionen gehören, steht im Artikel über Fermionen und Bosonen.

Mit dem Spin ist ein magnetisches Moment verbunden. Jedes Elektron ist also auch ein winziger Magnet, dessen Stärke fast genau das sogenannte Bohrsche Magneton beträgt [4]:

$$\mu_B = \frac{e\hbar}{2m_e} \approx 9{,}274 \cdot 10^{-24}\ \mathrm{J/T} \tag{1}$$

In den meisten Stoffen heben sich diese Momente gegenseitig auf. In Ferromagneten wie Eisen, Kobalt und Nickel richten sich dagegen viele Spins von selbst gemeinsam aus, zumindest innerhalb kleiner Bereiche, der Domänen. Deshalb lassen sich diese Metalle zu Magneten machen. Für die Spintronik ist eine Folge davon entscheidend. In einem solchen Ferromagneten sind Elektronen der beiden Spinrichtungen, man spricht von Majoritäts- und Minoritätselektronen, nicht gleichberechtigt. Sie finden unterschiedlich viele freie Zustände vor und werden deshalb unterschiedlich stark gestreut. Nevill Mott hat schon

1936 vorgeschlagen, den Strom in solchen Metallen als zwei getrennte Ströme zu behandeln, einen für jede Spinsorte [5], und Albert Fert und Ian Campbell haben dieses Zwei-Strom-Modell Ende der 1960er-Jahre an Nickel experimentell bestätigt [6].

Der Riesenmagnetowiderstand

1988 fanden zwei Gruppen unabhängig voneinander einen Effekt, der genau auf diesem Unterschied beruht. Albert Fert in Orsay untersuchte Stapel aus hauchdünnen Schichten Eisen und Chrom. Ohne äußeres Feld waren benachbarte Eisenschichten entgegengesetzt magnetisiert, und legte er ein Magnetfeld an, das alle in dieselbe Richtung drehte, sank der elektrische Widerstand bei 4,2 Kelvin um rund die Hälfte [7],[8]. Peter Grünberg in Jülich sah an einer Schichtfolge aus nur zwei Eisenschichten mit Chrom dazwischen einen viel kleineren Effekt von rund 1,5 Prozent, dafür aber bei Raumtemperatur [9],[8]. Gewöhnliche Metalle ändern ihren Widerstand im Magnetfeld nur wenig, daher der Name Riesenmagnetowiderstand, englisch Giant Magnetoresistance oder GMR. 2007 erhielten Fert und Grünberg dafür den Physik-Nobelpreis [10].

Wie der Effekt zustande kommt, zeigt Abbildung 1. Elektronen, deren Spin zur Magnetisierung einer Schicht passt, kommen dort leicht durch, die anderen werden stark gestreut. Sind beide Magnetschichten parallel ausgerichtet, gibt es eine Spinsorte, die beide Schichten fast ungehindert passiert, und sie schließt den Widerstand gewissermaßen kurz. Sind die Schichten antiparallel, wird jede Spinsorte in einer der beiden Schichten ausgebremst, und der Widerstand steigt.

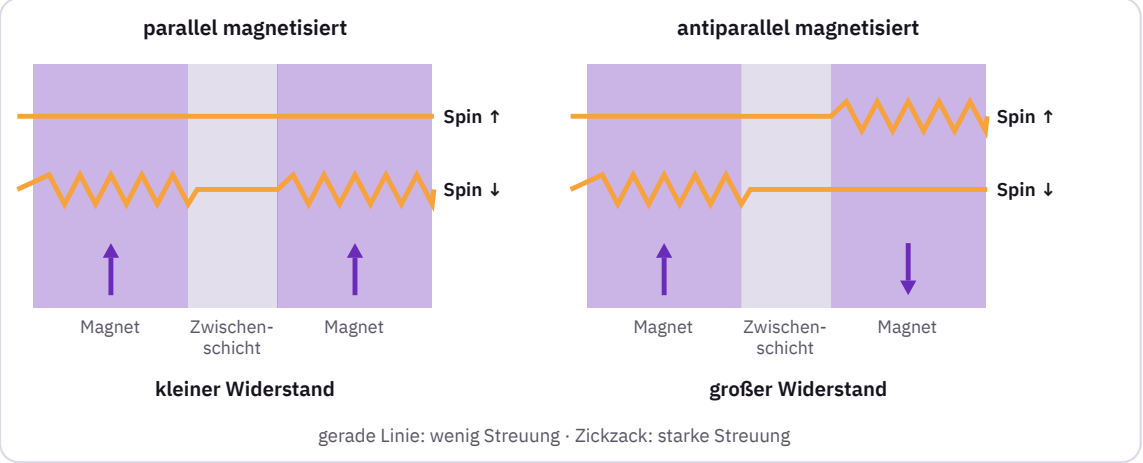

Abb. 1: Riesenmagnetowiderstand im Zwei-Strom-Modell. Welche Spinsorte in welcher Schicht wenig gestreut wird, hängt vom Material ab; das Prinzip bleibt dasselbe. Schematische eigene Darstellung nach [5],[7].

Rechnerisch ist das ein Netz aus Widerständen. Nennt man den Widerstand für die passende Spinsorte in einer Schicht r und für die unpassende R, fließen die beiden Spinströme wie zwei parallel geschaltete Leitungen. Daraus folgt:

$$R_\mathrm{P} = \frac{2rR}{r+R}, \quad R_\mathrm{AP} = \frac{r+R}{2} \quad \Rightarrow \quad \frac{R_\mathrm{AP} - R_\mathrm{P}}{R_\mathrm{P}} = \frac{(R-r)^2}{4rR} \tag{2}$$

Werden die unpassenden Elektronen zum Beispiel fünfmal so stark gestreut, ist also $R = 5r$, steigt der Widerstand beim Umschalten von parallel auf antiparallel um 80 Prozent (eigene Rechnung). Das einfache Modell lässt vieles weg, etwa Streuung an den Grenzflächen, zeigt aber, worauf es ankommt: auf den Unterschied zwischen *r* und *R*.

Für Festplatten war das ein Glücksfall. Die Bits auf einer Magnetplatte sind winzige Bereiche unterschiedlicher Magnetisierung, und ein Lesekopf muss ihre schwachen Felder in ein elektrisches Signal verwandeln. 1997 kamen die ersten Leseköpfe auf GMR-Basis auf den Markt und wurden rasch zum Standard [10]. Erst mit ihnen ließen sich so kleine Bits zuverlässig lesen, wie sie in den Festplatten der folgenden Jahre steckten.

Tunneln mit Spin

Einen Schritt weiter geht der Tunnelmagnetowiderstand. Hier trennt keine Metallschicht die beiden Magnete, sondern eine Isolierschicht, die nur etwa ein bis zwei Nanometer dick ist, also nur einige Atomlagen. Klassisch dürfte kein Strom fließen. Quantenmechanisch können Elektronen aber durch die dünne Barriere tunneln, und wie leicht ihnen das gelingt, hängt davon ab, ob auf der anderen Seite passende freie Zustände für ihren Spin warten. Michel Jullière hat den Effekt 1975 bei tiefen Temperaturen beobachtet und ein einfaches Modell dafür angegeben [11]. In heute üblicher Schreibweise, bezogen auf den Widerstand bei paralleler Stellung, lautet es:

$$\mathrm{TMR} = \frac{2P_1P_2}{1 - P_1P_2} \tag{3}$$

P_1 und P_2 sind die Spinpolarisationen der beiden Magnete, also wie ungleich die beiden Spinsorten unter den tunnelnden Elektronen vertreten sind. Bei je 50 Prozent ergibt die Formel bei antiparalleler Stellung einen um 67 Prozent höheren Widerstand als bei paralleler (eigene Rechnung). Bei Raumtemperatur gelang ein deutlicher Effekt erst 1995, mit Barrieren aus Aluminiumoxid [12]. Den Durchbruch brachte 2004 Magnesiumoxid. Zwei Gruppen, um Stuart Parkin bei IBM und um Shinji Yuasa am AIST in Tsukuba, erreichten damit bei Raumtemperatur bis zu 220 beziehungsweise 180 Prozent [13],[14], und 2008 waren es 604 Prozent [15], 2023 sogar 631 Prozent [16]. Bei Magnesiumoxid reicht die Jullière-Formel nicht mehr aus, weil die geordnete Kristallstruktur der Barriere bestimmte Elektronenzustände bevorzugt durchlässt [14].

Ein Speicher, der nichts vergisst

Mit einem solchen Tunnelkontakt lässt sich ein Bit speichern (Abb. 2). Eine Magnetschicht ist fest magnetisiert, die andere lässt sich umschalten. Parallel bedeutet kleiner Widerstand, antiparallel großer, und das entspricht zum Beispiel einer 0 beziehungsweise einer 1. Weil die Magnetisierung ohne Strom erhalten bleibt, verliert dieser Speicher seine Daten nicht, wenn man den Strom abschaltet. Er heißt MRAM, nach dem englischen Magnetoresistive Random Access Memory. Den ersten kommerziellen Chip mit 4 Megabit brachte Freescale 2006 auf den Markt [17]. Heutige MRAM-Zellen nutzen Tunnelbarrieren aus Magnesiumoxid [2].

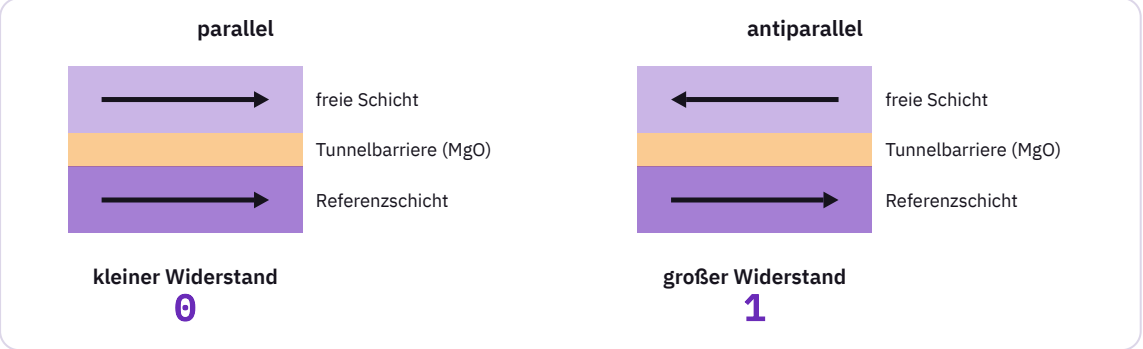

Abb. 2: Speicherzelle eines MRAM. Die Richtung der freien Schicht relativ zur Referenzschicht bestimmt den Widerstand und damit den Wert des Bits. In heutigen Zellen stehen die Magnetisierungen meist senkrecht zu den Schichten. Schematische eigene Darstellung nach [2].

Anfangs wurden die Bits mit Magnetfeldern aus benachbarten Leitungen umgeschaltet, also ebenfalls mit Magnetfeldern, wie bei Cowburns Gatter. Das braucht viel Platz und Energie. Eleganter ist ein Effekt, den John Slonczewski und Luc Berger 1996 unabhängig voneinander vorhergesagt haben: Ein Strom aus spinpolarisierten Elektronen kann seinen Drehimpuls auf eine dünne Magnetschicht übertragen und sie direkt umklappen [18],[19]. Auf diesem Spin-Transfer-Drehmoment beruht das heutige STT-MRAM. Große Halbleiterhersteller bieten es inzwischen als eingebauten Speicher in ihren Fertigungsprozessen an, etwa als Ersatz für den Flash-Speicher in Mikrocontrollern [2].

Rechnen mit Spins, wie es Cowburn 2002 vorschwebte, ist dagegen noch Forschung. Dabei geht es heute vor allem um Bauteile, die besonders wenig Energie verbrauchen oder Rechnen und Speichern verbinden [2]. Und auch Quantencomputer nutzen Spins, etwa als Qubits in Silizium, wie im Artikel über Festkörper-Quantencomputer beschrieben.

Quellen

1. D. A. Allwood, G. Xiong, M. D. Cooke, C. C. Faulkner, D. Atkinson, N. Vernier, R. P. Cowburn: *Submicrometer Ferromagnetic NOT Gate and Shift Register.* In: Science 296 (2002), S. 2003–2006, doi:10.1126/science.1070595.

2. B. Dieny u. a.: *Opportunities and challenges for spintronics in the microelectronics industry.* In: Nature Electronics 3 (2020), S. 446–459, doi:10.1038/s41928-020-0461-5.
3. G. E. Uhlenbeck, S. Goudsmit: *Ersetzung der Hypothese vom unmechanischen Zwang durch eine Forderung bezüglich des inneren Verhaltens jedes einzelnen Elektrons.* In: Die Naturwissenschaften 13 (1925), S. 953–954, doi:10.1007/BF01558878.
4. P. J. Mohr, D. B. Newell, B. N. Taylor, E. Tiesinga: *CODATA recommended values of the fundamental physical constants: 2022.* In: Reviews of Modern Physics 97 (2025), 025002, doi:10.1103/RevModPhys.97.025002.
5. N. F. Mott: *The electrical conductivity of transition metals.* In: Proceedings of the Royal Society of London A 153 (1936), S. 699–717, doi:10.1098/rspa.1936.0031.
6. A. Fert, I. A. Campbell: *Two-Current Conduction in Nickel.* In: Physical Review Letters 21 (1968), S. 1190–1192, doi:10.1103/PhysRevLett.21.1190.
7. M. N. Baibich, J. M. Broto, A. Fert, F. Nguyen Van Dau, F. Petroff, P. Etienne, G. Creuzet, A. Friederich, J. Chazelas: *Giant Magnetoresistance of (001)Fe/(001)Cr Magnetic Superlattices.* In: Physical Review Letters 61 (1988), S. 2472–2475, doi:10.1103/PhysRevLett.61.2472.
8. C. Day: *Discoverers of giant magnetoresistance win this year's physics Nobel.* In: Physics Today 60 (2007), Heft 12, S. 12–14, doi:10.1063/1.2825057.
9. G. Binasch, P. Grünberg, F. Saurenbach, W. Zinn: *Enhanced magnetoresistance in layered magnetic structures with antiferromagnetic interlayer exchange.* In: Physical Review B 39 (1989), S. 4828–4830, doi:10.1103/PhysRevB.39.4828.
10. Königlich Schwedische Akademie der Wissenschaften: *The Nobel Prize in Physics 2007.* Pressemitteilung, 9. Oktober 2007, kva.se.
11. M. Jullière: *Tunneling between ferromagnetic films.* In: Physics Letters A 54 (1975), S. 225–226, doi:10.1016/0375-9601(75)90174-7.
12. J. S. Moodera, L. R. Kinder, T. M. Wong, R. Meservey: *Large Magnetoresistance at Room Temperature in Ferromagnetic Thin Film Tunnel Junctions.* In: Physical Review Letters 74 (1995), S. 3273–3276, doi:10.1103/PhysRevLett.74.3273.
13. S. S. P. Parkin u. a.: *Giant tunnelling magnetoresistance at room temperature with MgO (100) tunnel barriers.* In: Nature Materials 3 (2004), S. 862–867, doi:10.1038/nmat1256.
14. S. Yuasa, T. Nagahama, A. Fukushima, Y. Suzuki, K. Ando: *Giant room-temperature magnetoresistance in single-crystal Fe/MgO/Fe magnetic tunnel junctions.* In: Nature Materials 3 (2004), S. 868–871, doi:10.1038/nmat1257.

15. S. Ikeda u. a.: *Tunnel magnetoresistance of 604% at 300 K by suppression of Ta diffusion in CoFeB/MgO/CoFeB pseudo-spin-valves annealed at high temperature.* In: Applied Physics Letters 93 (2008), 082508, doi:10.1063/1.2976435.
16. T. Scheike u. a.: *631% room temperature tunnel magnetoresistance with large oscillation effect in CoFe/MgO/CoFe(001) junctions.* In: Applied Physics Letters 122 (2023), 112404, doi:10.1063/5.0145873.
17. Electronic Design: *4-Mbit Device Is First Commercially Available MRAM.* 20. Juli 2006, electronicdesign.com.
18. J. C. Slonczewski: *Current-driven excitation of magnetic multilayers.* In: Journal of Magnetism and Magnetic Materials 159 (1996), S. L1–L7, doi:10.1016/0304-8853(96)00062-5.
19. L. Berger: *Emission of spin waves by a magnetic multilayer traversed by a current.* In: Physical Review B 54 (1996), S. 9353–9358, doi:10.1103/PhysRevB.54.9353.

Zitiervorschlag

quanten.de: *Spintronik einfach erklärt: Wie der Spin von Elektronen Daten speichert.* Stand: Oktober 2026. URL: https://quanten.de/spintronik.html (PDF: https://quanten.de/pdf/spintronik.pdf)

Texte und Abbildungen © 2026 quanten.de. Nutzung mit Quellenangabe und Link gern, kommerzielle Nutzung nach Absprache: info@quanten.de

Weiterlesen: Fermionen und Bosonen · Kernspintomographie · Festkörper-Quantencomputer

Online-Fassung mit aktualisierten Quellen: https://quanten.de/spintronik.html