
Spinelektronik

Vorlesungsskript zur Vorlesung im SS 2004

Prof. Dr. Rudolf Gross

und

Dr. Achim Marx

Walther-Meissner-Institut

Lehrstuhl für Technische Physik (E23)

Walther-Meissner-Strasse 8

D-85748 Garching

Rudolf.Gross@wmi.badw.de

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	9
Einleitung	1
I Grundlagen	9
1 Grundbegriffe und Messmethoden	11
1.1 Grundbegriffe des Magnetismus	12
1.2 Messmethoden	13
2 Spinabhängiger Transport	15
2.1 Magnetoresistive Effekte – ein phänomenologischer Überblick	16
2.1.1 Der positive Magnetwiderstand	16
2.1.2 Der negative Magnetwiderstand – Streuung an Spinunordnung	17
2.1.3 Der anisotrope Magnetwiderstand – AMR	18
2.1.4 Der Riesenmagnetwiderstand – GMR	19
2.1.5 Der Tunnelmagnetwiderstand – TMR	22
2.1.6 Der kolossale Magnetwiderstand – CMR	24
2.2 Elektrischer Transport in unmagnetischen Metallen	28
2.2.1 Boltzmann-Gleichung und Relaxationszeit	28
2.2.2 Elektrische Leitfähigkeit	33
2.2.3 Magnetwiderstand und Hall-Effekt im Einbandmodell	36
2.2.4 Vertiefungsthema: Magnetwiderstand und Hall-Effekt im Zweibandmodell	38
2.2.5 Streuprozesse	42
2.2.6 Streuprozesse in dünnen metallischen Schichten	48
2.3 Elektrischer Transport in magnetischen Metallen	52

2.3.1	Experimentelle Beobachtungen	52
2.3.2	Das Zwei-Spinkanal-Modell	54
2.3.3	Streuung in magnetischen Systemen	57
2.3.4	Streuung von Leitungselektronen an lokalisierten magnetischen Momenten	61
2.3.5	Vertiefungsthema: Der Kondo-Effekt	67
2.3.6	Vertiefungsthema: Einfluss der Leitungselektronen auf lokale magnetische Momente	69
2.3.7	Vertiefungsthema: Der Kondo-Widerstand	73
2.3.8	Hall-Effekt in ferromagnetischen Metallen	75
II	Magneto-resistive Effekte	83
3	AMR-Effekt	85
3.1	Experimentelle Beobachtungen	86
3.2	Anschauliche Erklärung des AMR	88
3.3	Widerstandstensor und AMR-Effekt	91
3.3.1	Anwendungsaspekte	92
3.4	Außergewöhnlicher Hall-Effekt	94
4	CMR-Effekt	95
4.1	Experimentelle Beobachtungen	97
4.2	Kristallstruktur	99
4.2.1	Toleranzfaktor	99
4.2.2	Vertiefungsthema: Ruddlesden-Popper-Serie	102
4.3	Elektronische Struktur	103
4.3.1	Das Kristallfeld	103
4.3.2	Jahn-Teller-Effekt	108
4.4	Grundlagen zur magnetischen Struktur	113
4.4.1	Experimentelle Beobachtungen	113
4.4.2	Der Superaustausch	114
4.4.3	Vertiefungsthema: Ladungstransfer- und Mott-Hubbard-Isolatoren	118
4.4.4	Die Goodenough-Kanamori-Anderson Regeln	120

4.4.5	Der Doppelaustausch	124
4.5	Elektrische Transporteigenschaften	132
4.5.1	Temperatur- und Magnetfeldabhängigkeit des spezifischen Widerstands	132
4.5.2	Skalenverhalten des CMR-Effektes	134
5	GMR-Effekt	137
5.1	Zwischenschicht-Austauschkopplung	139
5.1.1	Experimentelle Beobachtungen	139
5.1.2	Kopplungsarten	140
5.1.3	Phänomenologische Beschreibung der Zwischenschichtkopplung	143
5.1.4	Mikroskopisches Modell der Zwischenschichtkopplung	144
5.1.5	RKKY-Wechselwirkung	152
5.2	Der Riesenmagnetwiderstand	154
5.2.1	Einfache Modellvorstellungen	154
5.2.2	Intrinsischer GMR	157
5.2.3	Extrinsischer GMR	160
5.3	Skalenverhalten des GMR	165
5.3.1	Anwendungsaspekte	166
6	Spinventile	169
6.1	Austausch-Anisotropie	171
6.1.1	Phänomenologische Beschreibung der Austausch-Anisotropie	171
6.1.2	Theoretische Modelle zur Austausch-Anisotropie	176
6.2	Realisierung von Spinventilen	187
6.2.1	Optimierung des magnetoresistiven Effekts von Spinventilen	188
6.2.2	Wahl des Antiferromagneten	190
7	TMR-Effekt	195
7.1	Theoretische Behandlung des Tunnelns von Elektronen	198
7.1.1	Elastisches Tunneln durch eine eindimensionale rechteckförmige Barriere – zeitunabhängiger Ansatz	198
7.1.2	Vertiefungsthema: Elastisches Tunneln durch eine eindimensionale rechteckförmige Barriere – zeitabhängiger Ansatz	202
7.1.3	Vertiefungsthema: Elastisches Tunneln durch eine eindimensionale Barriere beliebiger Form – WKB-Näherung	203

7.1.4	Elastisches Tunneln in planaren Metall/Isolator/Metall-Kontakten	204
7.1.5	Vertiefungsthema: Tunneln unter Berücksichtigung des Bildpotenzials	209
7.1.6	Bandstruktureffekte beim elastischen Tunneln	210
7.1.7	Vertiefungsthema: Resonantes Tunneln	211
7.2	NIN- und NIS-Kontakte	214
7.3	Ferromagnet/Isolator/Supraleiter-Kontakte	218
7.3.1	Zeemann-Aufspaltung der Quasiteilchen-Zustandsdichte in Supraleitern	218
7.3.2	Zustandsdichte und Spinpolarisation in Ferromagneten	221
7.4	Ferromagnet/Supraleiter-Kontakte: Andreev-Reflexion	227
7.4.1	Andreev-Streuung an Metall/Supraleiter-Grenzflächen	227
7.4.2	Andreev-Streuung an Ferromagnet/Supraleiter-Grenzflächen	234
7.5	FM/I/FM-Tunnelkontakte	239
7.5.1	Jullière – Modell	241
7.5.2	Weiterentwicklungen des Jullière-Modells	242
7.6	Experimente zu FM/I/FM-Tunnelkontakten	249
7.6.1	Untersuchung und Verbesserung der Barriereneigenschaften	251
7.6.2	Temperatur- und Spannungsabhängigkeit des JMR	253
7.6.3	Dotierung der Tunnelbarriere	256
7.6.4	FM/I/FM Tunnelkontakte mit nichtmagnetischen Zwischenschichten	258
7.6.5	Grenzflächeneffekte und Vorzeichen der Spinpolarisation	259
7.6.6	Neue Materialsysteme	261
7.6.7	Rastertunnelmikroskopie	263
7.7	Inelastisches Tunneln	266
7.7.1	Inelastisches Tunneln mit Wechselwirkungsprozessen in der Barriere	266
7.7.2	Inelastisches Tunneln mit Wechselwirkungsprozessen in den Tunnelelektroden	269
7.7.3	Tunneln über Zwischenzustände – Glazmann-Matveev Modell	269
7.8	Tunneln durch ferromagnetische Barrieren – Spinfilter	275
7.9	Austauscheffekte an Grenzflächen zu Ferromagneten	278
8	EMR- und BMR-Effekt	281
8.1	Der ballistische Magnetwiderstand	282
8.1.1	Punktkontakte	282
8.1.2	Ballistischer Magnetwiderstandseffekt in Nanokontakten	284
8.1.3	BMR-Effekt: Artefakte	287

III	Spininjektion und Spintransport	289
IV	Materialien für die Spinelektronik	291
V	Anwendungen	293
9	XMR-Effekte – Anwendungen	295
9.1	Sensoren	298
9.1.1	GMR Sensoren	301
9.1.2	Anwendungen von GMR-Sensoren	307
9.2	Magnetoresistive Leseköpfe	312
9.2.1	Design von Lese- und Schreibköpfen	314
9.3	Magnetic Random Access Memory – MRAM	319
9.3.1	Geschichtlicher Hintergrund	319
9.3.2	MRAM basierend auf AMR und GMR	322
9.3.3	MRAM basierend auf Spinventilen	324
9.3.4	MRAM basierend auf magnetischen Tunnelkontakten	324
9.3.5	Ansteuerkonzepte für MRAMs	326
VI	Quanten-Spinelektronik	331
VII	Appendix	333
A	Literatur	335
B	SI-Einheiten	336
B.1	Geschichte des SI Systems	336
B.2	Die SI Basiseinheiten	338
B.3	Einige von den SI Einheiten abgeleitete Einheiten	339
B.4	Vorsätze	341
B.5	Abgeleitete Einheiten und Umrechnungsfaktoren	342
C	Physikalische Konstanten	346

Einleitung

Otto Stern¹ und Walter Gerlach² führten 1921 das nach ihnen benannte *Stern-Gerlach-Experiment* durch. Dieses Experiment zeigte klar, dass Elektronen außer ihrer Ladung $-e$ und ihrer Ruhemasse m_0 noch eine weitere Eigenschaft besitzen müssen. Samuel A. Goudsmit und George E. Uhlenbeck stellten 1925 die Hypothese auf, dass freie Elektronen eine Eigenrotation besitzen. Den damit verbundenen Eigendrehimpuls bezeichneten sie als *Elektronenspin*. Eine derartige Rotation setzt voraus, dass wir es mit einem räumlich strukturierten Teilchen zu tun haben. Es macht keinen Sinn, von der Rotation eines Massenpunkts zu sprechen. Im Unterschied zum Proton, für das in Streuexperimenten eine echte Substruktur nachgewiesen werden kann (Quarks), ist dies für das Elektron (zumindest bis heute) nicht der Fall. Das heißt, wir müssen von einem punktförmigen Teilchen ausgehen. Theoretiker wie Wolfgang Pauli³ fanden diese Vorstellung nicht akzeptabel. Große Probleme bereitete ihnen vor allem der Spin-g-Faktor von etwa $g_s = 2$. Das Problem wurde gelöst, als Werner Heisenberg⁴ seine Matrizenmechanik entwickelte. Da diese Darstellung der Quantenmechanik im Gegensatz zur Schrödingerschen Wellenmechanik auf ein explizites Koordinatensystem verzichten kann, ist es legitim von einem *abstrakten Raum der Spinzustände* zu sprechen. Dieser Raum ist eine zwingende Folge der relativistischen Dirac-Gleichung. Von der anschaulichen Eigenrotation des Elektrons müssen wir Abstand nehmen. Im Stern-Gerlach Experiment wurden nur zwei mögliche Einstellungen Komponente des Spins parallel zum angelegten Magnetfeld gefunden. Wir können den Spin freier Elektronen also mit der Spinquantenzahl $s = 1/2$ beschreiben. Etwas lax sagen wir meist, dass Elektronen den Spin $1/2$ besitzen und wir sprechen aufgrund der zwei möglichen Einstellmöglichkeiten bezüglich einer Quantisierungsachse häufig von Spin- \uparrow und Spin- \downarrow -Elektronen.

Obwohl der Spin eine zentrale Eigenschaft des Elektrons ist, spielt er in der konventionellen "Elektronik" keine Rolle. Unsere heutigen elektronischen Bauelemente basieren nur auf dem Transport und der Manipulation von elektrischen Ladungen. In unseren elektronischen Geräten werden Elektronen hin- und

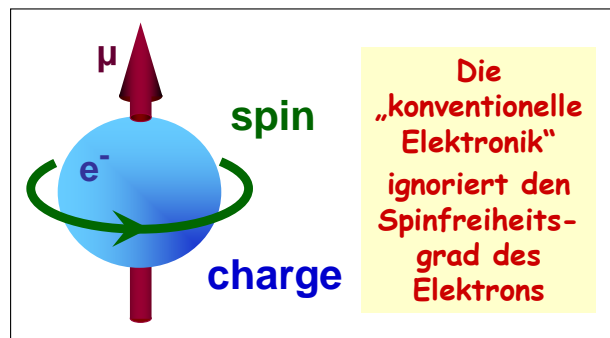


Abbildung 1: Elektron als Träger elektrischer Ladung $-e$ und eines mit seinem Spin verknüpften magnetischen Moments μ .

¹Otto Stern (1888-1969), Nobelpreis für Physik 1943.

²Walter Gerlach (1889-1979).

³Wolfgang Pauli (1900 – 1958), Nobelpreis für Physik 1945.

⁴Werner Heisenberg (1901 – 1976), Nobelpreis für Physik 1932.

hergeschoben, die gerade 50% Spin- \uparrow und 50% Spin- \downarrow besitzen. Es wird bisher nur der Ladungsfreiheitsgrad ausgenutzt, der Spinfreiheitsgrad der Elektronen ist dagegen in der konventionellen Elektronik von keinerlei Bedeutung. Anschaulich könnten wir sagen, dass wir in elektronischen Bauelementen zwei verschieden farbige Elektronenflüssigkeiten haben (rot = Spin- \uparrow , blau = Spin- \downarrow), die aber immer perfekt gemischt sind, so dass der Farbfreiheitsgrad keine Rolle spielt. Erst in den letzten Jahren hat der Spin der Elektronen wieder mehr Beachtung gefunden. Dies hängt unter anderem mit dem durch das Mooresche Gesetz beschriebenen phänomenalen Fortschritt unserer Halbleiterelektronik bei der Verbesserung der Leistungsdaten von Bauelementen durch Reduktion ihrer räumlichen Abmessungen zusammen. Diese Entwicklung scheint jetzt allerdings bis etwa zum Jahr 2010 an praktische und fundamentale Grenzen zu stoßen. Deshalb ist das Interesse an neuartigen Konzepten erheblich gestiegen. Da das Elektron sowohl Ladung als auch Spin besitzt, ist es naheliegend, den Spin als zusätzlichen Freiheitsgrad auszunutzen, um dadurch neuartige Bauelemente mit erweiterter Funktionalität und verbesserten Leistungsdaten (Geschwindigkeit, Leistungsverbrauch) zu erhalten. Dieser Ansatz hat zu dem heute sehr aktiven und ständig wachsenden Arbeitsgebiet der *Spinelektronik* oder kurz der *Spintronik* geführt. Darüberhinaus könnte sich die heutige "klassische Spinelektronik" zu einer "Quanten-Spinelektronik" und damit zu einer möglichen Hardware-Plattform für die Quanteninformationsverarbeitung weiterentwickeln

Was ist Spinelektronik ?

Es ist wohlbekannt, dass Elektronen die thermischen, elektrischen und magnetischen Eigenschaften von Festkörpern wesentlich bestimmen. Korrelationen im Elektronensystem führen zu interessanten Phänomenen wie zum Magnetismus, zu Metall-Isolator-Übergängen oder zur Supraleitung. Die Erforschung dieser Phänomene ist von grundlegendem Interesse und stellt ein zentrales Thema der modernen Festkörperphysik dar. Andererseits erwachsen aus diesen Phänomenen zahlreiche Innovationen für Technikfelder von großer wirtschaftlicher Bedeutung (Elektromotoren, Generatoren, Stromkabel, Medizintechnik, Sensoren, Leseköpfe für Festplatten, Aktoren, Mikrowellenbauelemente, Speichermedien, etc.).

Das Gebiet der *Spinelektronik* ist aus der Idee entstanden, den Spin- und Ladungsfreiheitsgrad von Elektronen gemeinsam in elektronischen Bauelementen zu benutzen. Der Ansatz, verschiedene Freiheitsgrade zusammen mit dem Ladungsfreiheitsgrad in Bauelementen auszunutzen ist nicht neu. Er ist, wie Abb. 2 zeigt, bereits mehrfach angewendet worden und hat zu erfolgreichen Gebieten wie der *Optoelektronik*, der *Fluxonik* oder der *Mechatronik* geführt.

Feld	Elektronik	Optoelektronik	Fluxonik	Mechatronik	Spintronik
Freiheitsgrade	Ladung	Ladung + optischer Freiheitsgrad	Ladung + fluxonischer Freiheitsgrad	Ladung + mechanischer Freiheitsgrad	Ladung + Spin- Freiheitsgrad

Abbildung 2: Zur Kombination des Ladungsfreiheitsgrades mit anderen Freiheitsgraden und den daraus entstehenden Arbeitsgebieten bzw. Technikfeldern.

Der Spin- und Ladungsfreiheitsgrad von Elektronen wurde lange Zeit nur getrennt in den Feldern Elektronik und Magnetismus verwendet. Die Ladung der Elektronen spielt, wie oben bereits gesagt wurde, in elektronischen Bauelementen, in denen Ladungen transportiert und manipuliert werden, die zentrale Rolle. In diesen Bauelementen hat dagegen der Spin meist

überhaupt keine Bedeutung. Umgekehrt spielt der Spin des Elektrons in magnetischen Systemen, die z.B. zur Datenspeicherung eingesetzt werden, die zentrale Rolle. Hier geht es nicht um die Bewegung von Ladungen, d.h. um elektrische Ströme durch eine Schaltkreisstruktur, sondern um die lokale Ausrichtung ihrer Spins zur Erzeugung von magnetischen Mustern. Das heißt, lange Zeit wurden in weitgehend getrennten Arbeitsgebieten entweder nur die dynamischen Eigenschaften von Ladungen (Ströme) und die statischen Eigenschaften von Spins (Magnetisierung) ausgenutzt. Durch die kontinuierliche Weiterentwicklung bei der Miniaturisierung von magnetischen Strukturen wurden Ende der 1980er Jahre überraschende Effekte gefunden, welche die Wechselwirkung der "statischen magnetischen" und der "dynamischen elektrischen" Eigenschaften von Festkörpern betreffen. Es wurde festgestellt, dass die Beeinflussung der "Bewegung" von Elektronen in einer magnetischen Schicht oder einer komplexen Vielschichtstruktur aus magnetischen und nicht-magnetischen Schichten durch die "statische" Spinanordnung zu interessanten *magneto-resistiven Effekten* führt. Ein wichtiger Meilenstein war dabei die Entdeckung des Riesenmagnetowiderstandseffekts (GMR: Giant MagnetoResistance) durch **Albert Fert** an der Universität Paris Sud und **Peter Grünberg** am Forschungszentrum Jülich.^{5,6} Bis heute wurden mehrere weitere magneto-resistive Effekte entdeckt:

- AMR (Anisotropic MagnetoResistance)
- GMR (Giant MagnetoResistance)
- CMR (Colossal MagnetoResistance)
- TMR (Tunneling MagnetoResistance)
- BMR (Ballistic MagnetoResistance)
- EMR (Extraordinary MagnetoResistance)
- GMI (Giant MagnetoImpedance)

Die physikalischen Grundlagen und Anwendungsmöglichkeiten dieser magneto-resistiven Effekte werden wir ausführlich in Teil II diskutieren.

Magnetoelektronik vs. Spinelektronik

Heute werden parallel die Bezeichnungen *Magnetoelektronik* und *Spinelektronik* verwendet und es ist häufig nicht klar, ob damit das gleiche oder etwas Unterschiedliches gemeint ist. Wir wollen die beiden Begriffe durch die in Abb. 3 gezeigten Bauelemente klarmachen.

Zweiter-Bauelemente: Mit Hilfe von magneto-resistiven Effekten können einfache magneto-resistive Bauelemente realisiert werden. Diese funktionieren in der Regel so, dass man mit Hilfe eines Magnetfeldes die Spinanordnung (z.B. die Magnetisierungsrichtung in einer ferromagnetischen Schicht) ändert und dadurch die Beweglichkeit der Elektronen, d.h. den elektrischen Widerstand steuert. Typischerweise sind also magneto-resistive Bauelemente so genannte passive *Zweiter-Bauelemente* (magnetfeldabhängige ohmsche Widerstände, siehe Abb. 3a), die mit Hilfe eines externen Magnetfeldes gesteuert werden. Im einfachsten Fall misst man einfach den elektrischen Widerstand zwischen den beiden Toren als Funktion des angelegten

⁵N. N. Baibich, J. M. Broto, A. Fert, F. Hguyen Van Dau, F. Petroff, P. Etienne, G. Creuzet, A. Friedrich, J. Chazelas, *Giant Magnetoresistance in (001)Fe/(001)Cr Magnetic Superlattices*, Phys. Rev. Lett. **61**, 2472 (1988).

⁶G. Binasch, P. Grünberg, F. Saurenbach, W. Zinn, Phys. Rev. **B 39**, 4828 (1989).

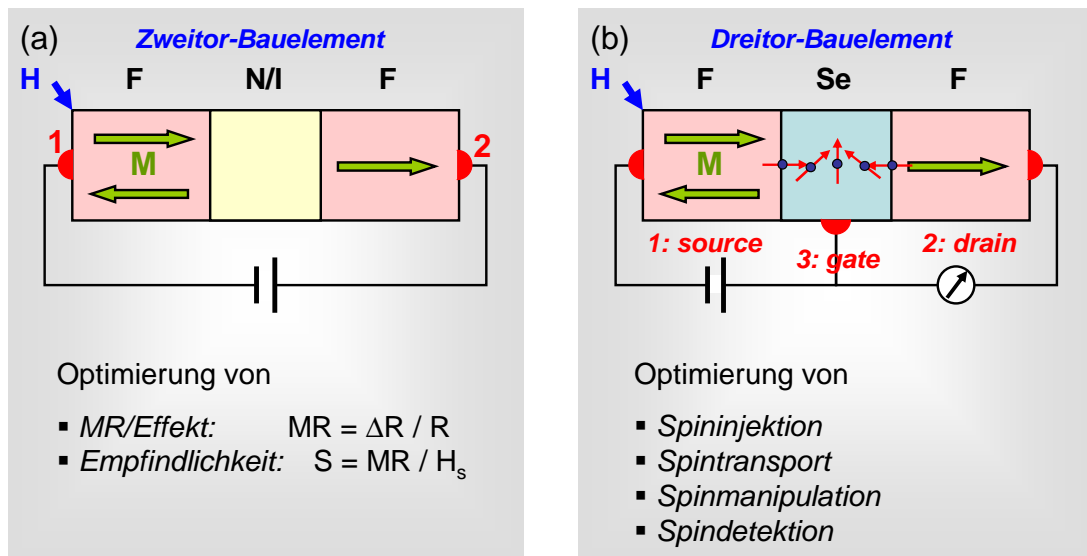


Abbildung 3: Zur Verdeutlichung der Begriffe Magnetoelektronik und Spinelektronik mit Hilfe von Zwei- (a) und Dreitor-Bauelementen (b). Die dicken Pfeile geben die Magnetisierungsrichtung in den ferromagnetischen Bereichen an, die mit einem externen Magnetfeld H gedreht werden kann. Die dünnen Pfeile in (b) geben die Richtung des Elektronenspins an, der durch eine Gate-Spannung gedreht werden kann (F: Ferromagnet, N/I: nicht-magnetisches Metall/Isolator, Se: Halbleiter, M: Magnetisierung).

Feldes. Deshalb wurde und wird das Arbeitsgebiet, das sich mit solchen Bauelementen befasst, auch als *Magnetoelektronik* bezeichnet. In diesem Arbeitsgebiet geht es neben der Klärung grundsätzlicher Fragen zum elektrischen Transport in magnetischen Systemen (siehe hierzu Teil I) vor allem um die Optimierung des magnetoresistiven Effekts MR (siehe hierzu Teil II), der wie folgt definiert ist:

$$MR \equiv \frac{R(H) - R(0)}{R(0)} = \frac{\Delta R}{R} \quad (0.0.1)$$

Üblicherweise wird der magnetoresistive Effekt in Prozent angegeben:

$$MR [\%] = \frac{R(H) - R(0)}{R(0)} \times 100 [\%] . \quad (0.0.2)$$

Magnetowiderstandseffekte können sowohl positiv als auch negativ sein, je nachdem ob der Widerstand im Magnetfeld zu oder abnimmt. In der neueren Literatur wird bei negativen Magnetowiderstandseffekten häufig eine Normierung auf $R(H)$ statt auf $R(0)$ vorgenommen. Falls $R(H) \ll R(0)$, erhält man dadurch sehr große MR-Werte, was vielen Autoren als opportun erschien. Für Anwendungen von magnetoresistiven Bauelementen (z.B. in der Sensorik oder der Datenspeicherung) ist es oft wichtig, dass ein großer MR-Effekt bereits bei einem kleinen Magnetfeld H_s erreicht wird, das heißt, man strebt eine hohe Empfindlichkeit $S = MR/H_s$ an.

Dreitor-Bauelemente: Passive Zweitor-Bauelemente sind für die Realisierung von komplexen elektronischen Schaltungen nicht ausreichend. Eine zentrale Fragestellung ist deshalb die

Ausnutzung des Spinfreiheitsgrades in aktiven *Dreitor-Bauelementen* (siehe Abb. 3b), wie sie aus der Halbleiterelektronik (Transistor) bestens bekannt sind. Diese verfügen über eine Steuerelektrode, die eine Kontrolle des Bauelements auch mit elektrischen oder optischen Kontrollgrößen erlaubt. Der Prototyp dieses Bauelementtyps ist der in Abb. 3b gezeigte Spintransistor. Bei diesem Bauelement werden spinpolarisierte Ladungsträger aus einer ferromagnetischen Quelle (Source) in einen nicht-magnetische (z.B. halbleitende) Kanal injiziert, beim Transport durch diesen Kanal mit Hilfe einer Gate-Elektrode manipuliert und in der Senke (Drain) bezüglich ihrer Spinrichtung detektiert. Die entscheidenden Prozesse, die physikalisch verstanden und technologisch beherrscht werden müssen, sind hier also (i) die Spininjektion, (ii) der Spintransport, (iii) die Spinmanipulation und (iv) die Spindetektion, die wir ausführlich in Teil III diskutieren werden. Solche Bauelemente erlauben prinzipiell die Ausnutzung des Spinfreiheitsgrades in der heute dominierenden Halbleiterelektronik und werden, falls die Prozesse (i) bis (iv) beherrscht werden, auch wirtschaftlich erfolgreich sein. Ein Grund dafür ist die Tatsache, dass in solchen Bauelementen die sehr günstigen elektronischen Eigenschaften von Halbleitern (Maßschneidern der Bandstruktur, Variation der Ladungsträgerdichte) mit den günstigen magnetischen Eigenschaften von Metallen (hohe Curie-Temperatur und hohe Spinpolarisation) verknüpft werden können. Da zusätzlich zur Spinmanipulation über die Gate-Elektrode noch die Möglichkeit besteht, mit Hilfe eines externen Feldes die Magnetisierungsrichtung in Source und Drain zu ändern, können wir formal auch von einem Viertor-Bauelement mit entsprechend erweiterter Funktionalität sprechen.

Der Begriff Magnetoelektronik passt sehr gut zu dem Feld der magnetoresistiven Zweitor-Bauelemente. Da bei den Dreitor-Bauelementen allerdings nicht unbedingt eine Steuerung mit Hilfe eines Magnetfeldes vorgenommen wird, passt hier der Begriff Magnetoelektronik schlecht. Deshalb wird heute der allgemeinere Begriff Spinelektronik verwendet, der als Untergebiet natürlich die Magnetoelektronik mit beinhaltet.

Auf der Basis dieser Überlegungen können wir folgende Definition für das Arbeitsgebiet *Spinelektronik* geben:

Spinelektronik – physikalische Definition:

Die Spinelektronik beschäftigt sich mit all denjenigen Phänomenen, bei denen der Spin von Ladungsträgern die elektrischen Eigenschaften beeinflusst.

Spinelektronik – technische Definition:

Die Spinelektronik bezeichnet eine neue Elektronik, welche den Spinfreiheitsgrad von Ladungsträgern in neuartigen elektronischen Bauelementen ausnutzt.

Anwendungen

Das Feld der Spinelektronik wurde und wird sicherlich durch die Vielzahl von interessanten Anwendungsmöglichkeiten stimuliert. Die Magnetowiderstandseffekte waren aber zunächst von grundlagenphysikalischen Interesse. Beim Riesenmagnetwiderstand (GMR) standen die magnetische Kopplung in Mehrlagenstrukturen aus magnetischen und nicht-magnetischen Schichten im Vordergrund, beim Kolossalen Magnetwiderstand war das komplexe Wechselspiel zwischen Struktur, Magnetismus sowie Ladungs- und orbitalen Ordnungsstrukturen von großem Interesse. Insgesamt spielte auch die Untersuchung und das Verständnis des spinabhängigen Transports in komplexen Materialsystemen eine große Rolle. Die technische Anwendbarkeit der durch die physikalische Grundlagenforschung entdeckten Effekte hat vor allem zu einer schnellen Weiterentwicklung der Materialtechnologie und damit zu wesentlich

besseren Proben geführt, die wiederum für die Grundlagenforschung von großem Nutzen waren. Heute laufen grundlagen- und anwendungsorientierte Forschung Hand in Hand und befruchten sich gegenseitig.

Von Magnetowiderstandseffekten zu XMR-Technologien

Die Nutzung von MR-Effekten ist vor allem überall dort naheliegend, wo das technische Problem der Umwandlung von magnetischer Information in elektrische Signale zu lösen ist. Die Magnetowiderstandseffekte sind deshalb für weite Bereiche der heutigen Sensorik und der magnetischen Speichertechnik von Interesse. Mit Hilfe der XMR-Effekte können Magnetfeldänderungen, welche Indikatoren für magnetische, elektrische oder mechanische Parameter sein können, in elektrische Signale umgewandelt werden, die dann mit herkömmlicher Elektronik weiterverarbeitet werden können. Interessant ist hierbei, dass die Magnetfeldänderungen berührungsfrei gemessen werden können. Die zur Zeit größte kommerzielle Anwendung sind Festplattenleseköpfe. Weitere Anwendungen im Fahrzeug- und Maschinenbau, der zerstörungsfreien Werkstoffprüfung oder der Medizintechnik sind absehbar. Seit etwa 1990 ist mit den so genannten XMR-Technologien (X: any, MR: magnetoresistance) ein ganz neues Anwendungsgebiet des Magnetismus entstanden, das sich gegenwärtig weltweit sehr dynamisch entwickelt. Eine Übersicht zu den verschiedenen MR-Effekten gibt Tabelle 1.

	AMR	GMR	TMR	CMR	GMI
Effektgröße: $\Delta R/R$ [%]	3 bis 4	6 bis 8 in Trilagen, bis zu 100 in Multilagen bei 300 K	bis zu 60 bei 300 K in planaren Tunnelkontakten	200 bis 400 bei 300 K, bis zu 10^8 bei tiefen Temperaturen	$\Delta Z/Z$ bis zu 360
Sensitivität $S = \frac{\Delta R}{R} / H_s$ [%/Oe] bei 300 K	1 bis 2, H_s klein	0.01 in Trilagen, bis zu 3 in Vielfachschichten, H_s mittel	bis zu 1.5, H_s klein	0.001, H_s groß	$(\Delta Z/Z)/H$: 10 bis 30, H_s klein bis mittel
physikalisches Funktionsprinzip	anisotrope Streuung im Volumen	spinabhängige Streuung an Grenzflächen, Bandstruktur-Effekte	spinabhängiges Tunneln	spinabhängige Streuung im Volumen	Impedanz in zweiter Ordnung abhängig von der Permeabilität
Entdeckung	1857	1988	1994 (erste Arbeiten aber bereits in 1970er Jahren)	1950 bei tiefen Temperaturen, 1993 bei Raumtemperatur	1992
erste technische Anwendung	erste Vorschläge 1971, seit 1990 in Leseköpfen	erster Sensor 1996, seit 1998 in Leseköpfen	erste Vorschläge 1995, ab 2004 in MRAM	bisher keine	erste Vorschläge 1995

Tabelle 1: Übersicht zu den verschiedenen Magnetowiderstandseffekten. Die für Anwendungen in der Sensorik wichtige Größe ist die Sensitivität S . Die angegebenen Werte beziehen sich, soweit nichts anderes angegeben ist, auf Raumtemperatur. Kleine Felder: $H_s < 100$ Oe, mittlere Felder: $H_s < 10$ kOe, hohe Felder: $H_s > 10$ kOe (Stand: Ende 2002).

Eine aufgrund der ökonomischen Bedeutung sehr wichtige Anwendung können Magnetic Random Access Memories (MRAMs) werden, mit denen nicht-flüchtige Datenspeicherelemen-

te realisiert werden können. Diese Bauelemente können mit Hilfe des TMR Effektes realisiert werden. In einer Pressemitteilung vom Dezember 2000 haben die Firmen IBM und Infineon mitgeteilt, dass sie im Rahmen einer Gemeinschaftsentwicklung bis zum Jahr 2004 MRAM Speicherbausteine bis zur Marktreife entwickeln wollen. Man hofft, mit Hilfe von MRAMs leistungssparende Bauelemente realisieren zu können, was für mobile Geräte enorm wichtig ist. Ferner könnte durch den Einsatz von MRAMs das Booten von Computern vermieden werden, da ja die Speicherinformation nach Abschalten des Rechners erhalten bleibt. Im September 2002 verkündeten die Elektronikkonzerne NEC und Toshiba, dass sie gemeinsam an der Entwicklung von MRAM-Speicherbausteinen arbeiten. Bereits im Jahr 2005 soll die Produktion von 256-MBit-MRAM-Chips aufgenommen werden. Auch die Firmen Motorola, Honeywell, NVE und Micromem arbeiten fieberhaft und mit massiver öffentlicher Förderung an der Entwicklung von MRAM-Chips.

Auf dem Weg zum Spintransistor?

Der Einzug der Spinelektronik in die etablierte Halbleitertechnologie liegt wohl noch in weiterer Zukunft. Hier müssen noch grundlegenden physikalische und materialtechnische Probleme gelöst werden. Erste Ergebnisse der Grundlagenforschung sind allerdings ermutigend und lassen erwarten, dass der Spinfreiheitsgrad der Elektronen auch in der Halbleiterelektronik in Zukunft eine wichtigere Rolle spielen wird. Der Gewinn wären Bauelemente mit erweiterter Funktionalität und verbesserten Leistungsdaten.

Es zeigt sich klar, dass sich aus den physikalischen Grundlagenphänomenen sehr schnell wichtige Zukunftstechnologien entwickeln. Dieses Zusammenspiel von Grundlagenforschung, anwendungsorientierter Forschung und Technologieentwicklung macht das Feld der Spinelektronik sehr attraktiv. Insgesamt ist Spinelektronik ein sehr junges und noch stark wachsendes Forschungsgebiet, von dem starke Innovationsimpulse für die Bereiche Sensorik für den Maschinen-, Fahrzeugbau und die Medizintechnik sowie für den Bereich der Elektronik und Informationstechnik (z.B. Leseköpfe für Festplatten, nicht-flüchtige magnetische Datenspeicherelemente: Magnetic Random Access Memory – MRAM) erwartet werden. Die verschiedenen MR-Effekte erlauben unterschiedliche Nutzungsmöglichkeiten:

- magnetoresistive Sensoren (extreme Miniaturisierung, hohe Empfindlichkeit, geringe Herstellungskosten)
- magnetoresistive Speicherbauelemente (MRAM)
- Spintransistoren, Spin-LED (light emitting diodes)
- Bolometer, magnetische Schalter
- neue magnetische Materialien

Materialien

Das starke Interesse an den physikalischen Grundlagen und Anwendungen der Spinelektronik hat auch zu einer intensiven Weiterentwicklung und Suche nach geeigneten Materialsystemen

geführt. Von großer Bedeutung sind Materialien mit einer hohen Spinpolarisation

$$P [\%] = \frac{N_{\uparrow}(E_F) - N_{\downarrow}(E_F)}{N_{\uparrow}(E_F) + N_{\downarrow}(E_F)} \times 100 [\%] . \quad (0.0.3)$$

der Ladungsträger beim Fermi-Niveau. Die Anwendung bei Raumtemperatur erfordert ferner eine Curie-Temperatur, die weit oberhalb von 300 K liegt. Für eine Optimierung/Vergrößerung der MR-Effekte (z.B. des TMR-Effektes) oder der Spininjektion sind Materialien mit $P \simeq 100\%$ erwünscht. Solche Materialien, die nur noch eine Spinsorte bei der Fermi-Energie besitzen, nennen wir *Halbmetalle*. In den letzten Jahren wurden einige potentiell halbmetallische Materialien wie die kubischen Heusler-Verbindungen (X_2YZ , X und Y sind Übergangsmetalle und Z ein Gruppe-III, -IV oder -V Element) und verschiedene ferromagnetische Oxide (dotierten Manganate, Doppelperovskite, Magnetit oder Chromdioxid) intensiv hinsichtlich ihrer Eignung für die Spinelektronik untersucht. Hierbei ist neben der Kompatibilität mit Halbleitermaterialien auch die Beherrschbarkeit von Grenzflächen ein entscheidendes Kriterium, da spintronische Bauelemente meist aus Mehrlagensystemen bestehen. Durch eine Degradation der Grenzfläche kann die prinzipiell hohe Spinpolarisation eines Materialsystems stark reduziert werden und damit für spintronische Bauelemente nicht ausgenutzt werden.

Die Kompatibilität zu Halbleitermaterialien und die theoretische Vorhersage von Curie-Temperaturen um 300 K für Mn-dotiertes ZnO und GaN hat die Untersuchung von verdünnten magnetischen Halbleitern (DMS: Diluted Magnetic Semiconductors) stark stimuliert und eine weltweite Suche nach neuen DMS getriggert. Der durchbrechende Erfolg ist hier aber noch nicht geglückt. Entweder sind die erreichten Curie-Temperaturen zu niedrig (Mn-dotierte III-V Halbleiter) oder die erreichten hohen Curie-Temperaturen stark umstritten (Mn-dotiertes GaN). Mit Co-dotiertem TiO_2 wurde aber auch ein neuer DMS mit einer Curie-Temperatur knapp oberhalb von Raumtemperatur gefunden.

Die derzeitigen Forschungsergebnisse zu Materialien für die Spintronik werden in Teil IV zusammengefasst.

Quanten-Spinelektronik

Obwohl die "Klassische Spinelektronik" noch nicht in allen Grundlagen- und Anwendungsaspekten verstanden ist, arbeiten viele Wissenschaftler bereits heute an der so genannten "Quanten-Spinelektronik". Diese Arbeiten wurden durch die Tatsache stimuliert, dass kohärente Spinzustände in Halbleitern eine genügend lange Lebensdauer haben, um mit diesen Spinzuständen brauchbare Quantenbits zu realisieren. In der Quanteninformationverarbeitung wird Information in Quantenbits kodiert, die ganz allgemein durch einen kohärenten Überlagerungszustand eines quantenmechanischen Zwei-Niveausystems gebildet werden. Das Spin-1/2-System eines Elektrons stellt ein solches Zwei-Niveausystem dar. Das entscheidende Kriterium ist nun, dass die Kohärenz dieses Überlagerungszustandes genügend lange erhalten bleibt, um genügend viele Operationen mit dem Zustand durchführen zu können. Spinbasierte Systeme scheinen hier besonders gut geeignet zu sein, da Spins weniger stark mit den zu Dekohärenz führenden Umgebungsfreiheitsgraden (z.B. Phononen, Ladungen) wechselwirken als z.B. Ladungen. Allerdings befinden wir uns zur Zeit erst ganz am Anfang des Weges zu einer Quanten-Spinelektronik und wir wissen noch nicht einmal, ob dieser Weg überhaupt gangbar ist (siehe hierzu Teil VI).

Teil I

Grundlagen

Teil II

Magnetoresistive Effekte

Teil III

Spininjektion und Spintransport

Teil IV

Materialien für die Spinelektronik

Teil V

Anwendungen

Teil VI

Quanten-Spinelektronik

Teil VII

Appendix

