
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	Ferromagnet/Isolator/Ferromagnet-Kontakte	240
7.5.1	Jullière – Modell	242
7.5.2	Vertiefungsthema: Weiterentwicklungen des Jullière-Modells	244
7.6	Experimente zu FM/I/FM-Tunnelkontakten	252
7.6.1	Untersuchung und Verbesserung der Barriereneigenschaften	254
7.6.2	Temperatur- und Spannungsabhängigkeit des JMR	255
7.6.3	Vertiefungsthema: Dotierung der Tunnelbarriere	258
7.6.4	Vertiefungsthema: FIF-Tunnelkontakte mit nichtmagnetischen Zwischenschichten	260
7.6.5	Vertiefungsthema: Grenzflächeneffekte und Vorzeichen der Spinpolarisation	261
7.6.6	Neue Materialsysteme	264
7.6.7	Vertiefungsthema: Rastertunnelmikroskopie	266
7.7	Inelastisches Tunneln	269
7.7.1	Inelastisches Tunneln mit Wechselwirkungsprozessen in der Barriere	269
7.7.2	Inelastisches Tunneln mit Wechselwirkungsprozessen in den Tunnelektroden	271
7.7.3	Tunneln über Zwischenzustände – Glazmann-Matveev Modell	271
7.8	Vertiefungsthema: Tunneln durch ferromagnetische Barrieren – Spinfilter	277

7.9	Vertiefungsthema: Austauscheffekte an Grenzflächen zu Ferromagneten	280
7.10	Spinpolarisation: Theorie vs. Experiment	283
7.10.1	Definition der Spinpolarisation	283
7.10.2	Bestimmung der Spinpolarisation mit Andreev-Streuung	289
7.10.3	Spinpolarisation – Nachbetrachtung	291
8	EMR- und BMR-Effekt	295
8.1	Der ballistische Magnetwiderstand	296
8.1.1	Punktkontakte	296
8.1.2	Ballistischer Magnetowiderstandseffekt in Nanokontakten	298
8.1.3	BMR-Effekt: Artefakte	301
III	Spininjektion und Spintransport	303
IV	Materialien für die Spinelektronik	305
V	Anwendungen	307
9	XMR-Effekte – Anwendungen	309
9.1	Sensoren	312
9.1.1	GMR Sensoren	315
9.1.2	Anwendungen von GMR-Sensoren	321
9.2	Magnetoresistive Leseköpfe	326
9.2.1	Design von Lese- und Schreibköpfen	328
9.3	Magnetic Random Access Memory – MRAM	333
9.3.1	Geschichtlicher Hintergrund	333
9.3.2	MRAM basierend auf AMR und GMR	336
9.3.3	MRAM basierend auf Spinventilen	338
9.3.4	MRAM basierend auf magnetischen Tunnelkontakten	338
9.3.5	Ansteuerkonzepte für MRAMs	340

VI	Quanten-Spinelektronik	345
VII	Appendix	347
A	Literatur	349
B	SI-Einheiten	350
B.1	Geschichte des SI Systems	350
B.2	Die SI Basiseinheiten	352
B.3	Einige von den SI Einheiten abgeleitete Einheiten	353
B.4	Vorsätze	355
B.5	Abgeleitete Einheiten und Umrechnungsfaktoren	356
C	Physikalische Konstanten	360

Teil I

Grundlagen

Teil II

Magnetoresistive Effekte

Teil III

Spininjektion und Spintransport

Teil IV

Materialien für die Spinelektronik

Teil V

Anwendungen

Kapitel 9

Anwendungen magnetoresistiver Effekte

Die Firma IBM verkaufte seit Frühjahr 1998 eine neue Generation von hochdichten 16.8 GByte Computerfestplatten. In diesem Produkt wird erstmals der neue GMR-Effekt verwendet, dessen Grundlagen in Deutschland mitentdeckt¹ und hier patentiert wurden². Der GMR-Effekt entwickelte sich in den Jahren nach seiner Entdeckung schnell von einem wissenschaftlich interessanten Phänomen zu einem möglichen Grundbaustein einer neuen Elektronikgeneration, der Magnetoelektronik. Die Zeitperiode von nur etwa 10 Jahren zwischen Entdeckung eines neuen physikalischen Phänomens und dessen Ausnutzung in Produkten ist sehr kurz. Die Magnetoelektronik wird in Deutschland bis heute mit hoher Priorität von verschiedenen Geldgebern gefördert, da das Gebiet (i) wissenschaftlich, (ii) technisch und (iii) wirtschaftlich interessant ist.

Die verschiedenen magnetoresistiven Effekte und ihre physikalischen Grundlagen wurden in den vorangegangenen Kapiteln bereits intensiv diskutiert. Wir wollen in diesem Kapitel jetzt potentielle und bereits etablierte Anwendungen dieser Effekte aufzeigen. Angestoßen wurde das neue Anwendungsfeld Magnetoelektronik sicherlich durch die Entdeckung des GMR-Effekts. Generell kann man festhalten, dass die neuen magnetoresistiven Effekte es möglich machen, den Stromfluß in Mikrosystemen erstmals mit magnetischen Feldern effektiv und gezielt zu steuern. Damit ergibt sich die Möglichkeit, neben den elektrischen Eigenschaften von Festkörpern auch ihre magnetischen Eigenschaften in Bauelementen auszunutzen und dadurch die Elektronik zur Magnetoelektronik oder Spinelektronik zu erweitern. In der Magnetoelektronik werden also Elektronen nicht nur als Träger einer elektrischen Ladung, sondern auch als Träger eines magnetischen Moments betrachtet. Wie bereits mehrfach erwähnt, müssen bei der Diskussion magnetoelektronischer Bauelemente beide Eigenschaften immer kombiniert betrachtet werden.

Der Magnetoelektronik wird zugetraut, für einige Grundelemente der heutigen Technik (z.B. Sensoren, Leseköpfe, Datenspeicherelemente, Logikbausteine) überlegene Lösungen zu liefern. Beispiele sind Fahrdynamiksensoren, Drehratensensoren, Leseköpfe für Festplatten, neuartige Speicherbauelemente (MRAMs) und Spin-Transistoren. Gegenüber den heutigen Halbleiterbauelementen besitzen magnetoelektronische Bauelemente oft eine erweiterte Funktionalität (z.B. Nichtflüchtigkeit von MRAMs im Vergleich zu DRAMs). Sie basieren zudem meist auf

¹G. Binasch, P. Grünberg, F. Saurenbach, W. Zinn, Phys. Rev. **B 39**, 4282 (1989).

²P. Grünberg, *Magnetfeldsensor mit ferromagnetischer dünner Schicht*, Patent-Nr.: P 3820475 (1988).

Metallen und sind deshalb weiter miniaturisierbar und deutlich robuster.³ Aufgrund dieser Eigenschaften hat die Magnetoelektronik sicherlich das Potenzial, eine Basistechnologie für die zukünftige Mikro- bzw. Nanoelektronik zu werden.

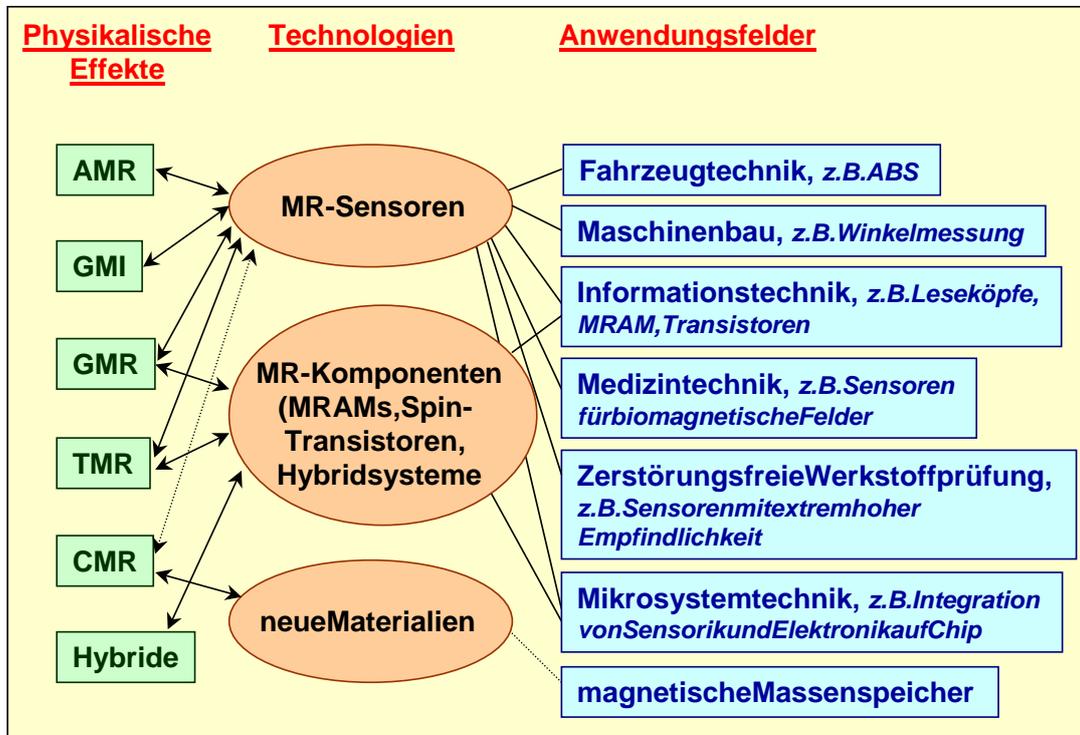


Abbildung 9.1: Schematische Darstellung der physikalischen Effekte, der daraus resultierenden Technologien und der möglichen Anwendungsfelder der Magnetoelektronik.

Legt man den heutigen Entwicklungsstand zugrunde, so kommen zunächst 4 Anwendungslinien für magnetoelektronische Bauelemente in Frage:

- Sensoren,
- Leseköpfe, die natürlich als spezielle Sensoren für magnetische Datenspeichersysteme betrachtet werden können,
- Magnetic Random Access Memory: MRAM
- und aktive magnetische Bauelemente: spinbasierte Dreitorbauelemente, Spin-Transistoren.

Eine schematische Darstellung der physikalischen Effekte, der daraus resultierenden Technologien und der möglichen Anwendungsfelder ist in Abb. 9.1 gezeigt.

Wir wollen an dieser Stelle auch kurz auf die *wirtschaftliche Bedeutung* der Magnetoelektronik eingehen. Da die Magnetoelektronik auf einen Bereich zielt, der bisher von der Halbleitertechnologie beherrscht wird, ist ein verschärfter Technologiewettbewerb zu erwarten. Falls sich

³Bei dotierten Halbleitern beträgt der Abstand von Dotieratomen bei einer Dotierung von $10^{18} / \text{cm}^3$ etwa 10 nm. Da die Dotieratome statistisch verteilt sind, ergeben sich deshalb Probleme, wenn die Abmessungen von Bauelementstrukturen in den Bereich des mittleren Abstands der Dotieratome kommen.

Anwendungs- linie	Weltmarkt- größe	technisches Risiko	wirtschaft- liches Risiko	erstes komm. Produkt	pot. Um- setzer in D
Sensoren	6 Mrd. DM	mittel	mittel	1996 (NVE), 1997 (Sie- mens)	Bosch, Daim- lerChrysler, Siemens, Philips, ITT
Leseköpfe	80 Mrd. DM	klein	klein	1998 (IBM)	IBM Mainz, Balzers, Exabyte, Bogen
MRAM	200 Mrd. DM	groß	groß	ca. 2005	Siemens, Aixtron, Wacker
Spin- Transistoren	???	sehr groß	sehr groß	< 2008	???

Tabelle 9.1: Das Potenzial der Magnetoelektronik ergibt sich aus der Marktgröße für Vorläufertechnologien (überwiegend Halbleitertechnik) und der erwarteten technischen Überlegenheit der magnetoelektronischen Produkte. Von letzterer hängt es ab, wie groß der erreichbare Marktanteil tatsächlich werden kann (Quellen: Sensormagazin (04/98), D. Harting, Marktbericht 1998 des ZVEI; W. Schulz, Wege aus dem Halbleitertal, VDI-Nachrichten 48 (1998)).

die erwarteten technologischen Vorteile der magnetoelektronischen Systeme als umsetzbar erweisen, wird der Erfolg dieser Technologie von der Bereitschaft großer Firmen abhängen, als Technologieführer in den Markt der Halbleiterbauelemente einzudringen.⁴ In diesem Fall ist mit einem erheblichen Umsatzvolumen durch die Magnetoelektronik zu rechnen (siehe Tabelle 9.1). Die Dynamik der Technologieentwicklung im Bereich der XMR-Techniken lässt sich aus dem starken Anwachsen der Zahl von Publikationen und Patenten ablesen, die sich zwischen 1990 und 1997 etwa verzehnfacht hat.

Die Magnetoelektronik ist natürlich nur eine unter vielen konkurrierenden Zukunftstechnologien (z.B. Advanced Semiconductor Technologies, RSFQ, SET, Molekularelektronik) für die Elektronik. Die Magnetoelektronik zeichnet sich im Feld anderer Konzepte durch ihren innovativen Charakter aus. Sie ist vergleichsweise neu und hat trotzdem nutzbare technische Systeme schon zu einem sehr frühen (im Vergleich zu den Konkurrenten) Zeitpunkt hervorgebracht. Viele der konkurrierenden Konzepte stecken dagegen selbst nach vielen Jahren seit ihrer Entdeckung immer noch in visionären Ansätzen.

⁴Im Herbst 2000 haben die Firmen IBM und Infineon angekündigt, eine Produktentwicklung für MRAMs zu machen.

9.1 Sensoren

Sensoren, die magnetische oder magnetisch kodierte Information in ein elektrisches Signal umwandeln, spielen in unserer heutigen Technik bereits eine große Rolle. Sie kommen in allen Bereichen zur Anwendung, in denen das magnetische Feld als Informationsträger dienen kann, also z.B. in der Fahrzeugtechnik, im Maschinenbau/Robotik, der Medizintechnik, der zerstörungsfreien Werkstoffprüfung und in der Mikrosystemtechnik. Mit Hilfe solcher Sensoren werden eine Vielzahl von unterschiedlichen mechanischen Parametern erfasst, wie z.B. Position, Geschwindigkeit, Winkelstellung, Drehzahl, Beschleunigung etc., aber auch Stromfluss, Verschleiß oder Korrosion gemessen. Natürlich wird mit solchen Sensoren auch direkt magnetisch kodierte Information ausgelesen. Zu dieser Information gehören Datenbits auf Festplatten oder Bändern aber auch geologisch oder biologisch basierte Informationen. Als typisches Beispiel für ein magnetisches Sensorsystem ist in Abb. 9.2 das Prinzip eines magneto-resistiven ABS-Sensors gezeigt.

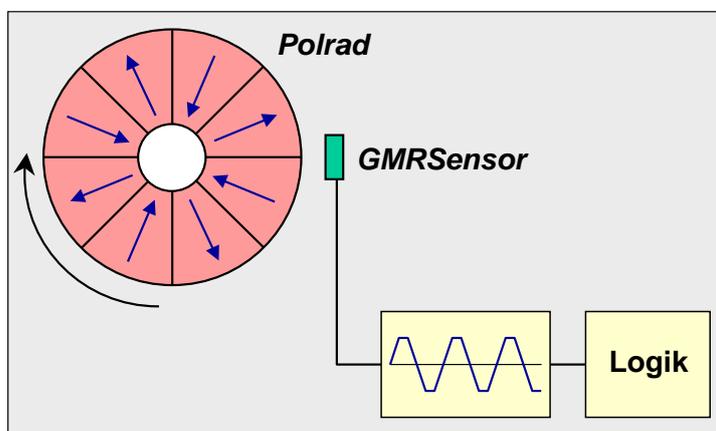


Abbildung 9.2: Prinzip eines magneto-resistiven Sensorsystems für ein Antiblockiersystem. Der Sensor wandelt die magnetisch kodierte Information in ein elektrisches Signal, das von einer Logik weiterverwertet wird.

Eigenschaft	GMR	AMR	Hall	induktiv
Temperaturstabilität	++	++	+	++
Ausgangssignal	+++	++	+	größenabh.
Empfindlichkeit	+++	+++	++	++
Leistungsverbrauch	+++	+	++	größenabh.
Größe	+++	+	+++	+
DC-Betrieb	ja	ja	ja	nein
Kosten	+++	+	+++	

Tabelle 9.2: Eigenschaften von GMR- und AMR-Sensoren im Vergleich zu Hall- und induktiven Magnetfeldsensoren (Quelle: Firma Hy-Line Sensor-Tec, Unterhaching).

Sensoren und die dazugehörige Elektronik finden sehr stark im Bereich der Automatisierungstechnik bzw. der Robotik Anwendung, die bei vielen Produkten einen immer größeren Anteil besitzt. Im Bereich der Automobiltechnik hat die Wertschöpfung elektronischer Komponenten bereits etwa 30% erreicht und nimmt stetig weiter zu. Bezüglich Anwendungen stellt sich natürlich immer die Frage, inwieweit magneto-elektronische Sensorsysteme die technischen und wirtschaftlichen Anforderungen besser erfüllen als bereits etablierte Technologien. Dies

muss sich im Einzelfall zeigen. Klar ist, dass magnetoelektronische Sensorsysteme in den Bereichen, in denen sie Vorteile oder gar neue Funktionalität bieten, nicht nur vorhandene Systeme ersetzen sondern auch neue Einsatzfelder erschließen können. In Tabelle 9.2 wird eine Einschätzung für das Anwendungspotenzial von XMR-Effekten für Sensoren gegeben. Abb. 9.3 gibt einen Einblick in das erwartete Marktpotenzial für magnetische Sensoren.

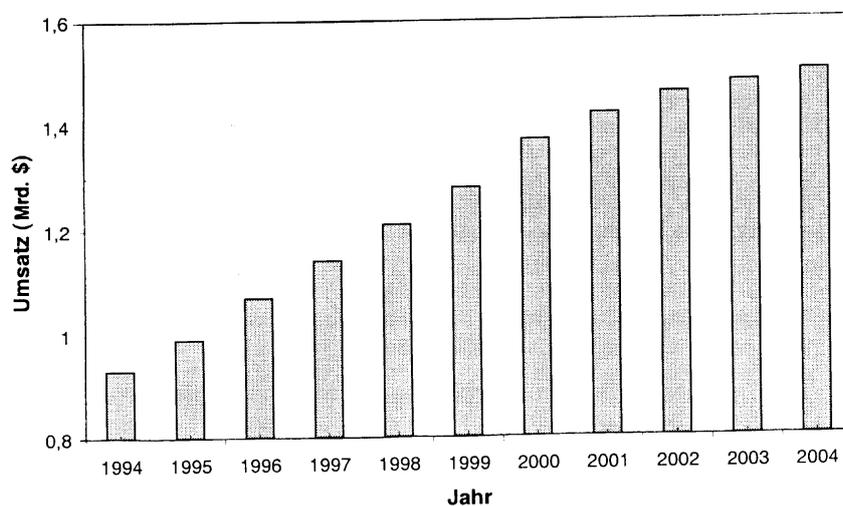


Abbildung 9.3: Erwartete Umsätze für Sensoren im europäischen Automobilbereich in Mrd. US \$ nach Frost & Sullivan, 1998.

AMR-Sensoren sind in ihrer Entwicklung bereits weit fortgeschritten, da der AMR-Effekt schon länger bekannt ist. In der industriellen F&E geht es bei diesen Sensoren hauptsächlich darum, mit bestimmten Herstellungsverfahren integrierte Sensorsysteme herzustellen, welche für bestimmte Anwendungen maßgeschneiderte Eigenschaften besitzen. Zuerst hat der AMR-Effekt in Festplattenleseköpfen Einzug gehalten. Dies hat zu einem Sprung in der Steigerung der Speicherdichte geführt (siehe Abb. 9.4). Leseköpfe erfordern vor allem ein hohes Miniaturisierungspotenzial, stellen ansonsten aber keine hohen Ansprüche, da diese Sensoren im Prinzip nur zwischen "Null" und "Eins" unterscheiden müssen. Dies ist bei Sensoren für mechanische Parameter völlig anders. Dort müssen oft kontinuierliche Werte mit genügender Auflösung ausgelesen werden. Dies bringt umfangreiche technische Anforderungen hinsichtlich Temperaturstabilität, Kennlinienverlauf, Langzeitstabilität, Designflexibilität, autarke Energieversorgung, etc. mit sich.

Der AMR-Sensor erfüllt heute für viele Anwendungsfelder die Öffnungsfunktion für die Verbreitung der GMR-Technologie, die unter Wahrung der Vorteile der AMR-Sensortechnik diese bezüglich der Leistungsdaten übertrifft. So löst zur Zeit der GMR-Sensor den erst im Jahr 1990 eingeführten AMR-Lesekopf ab. Was den Bereich der Sensoren (außer Leseköpfe) angeht, so geht die Entwicklung ebenso, wenn auch langsamer in Richtung GMR. Während der AMR-Sensor bereits vielfach eingesetzt wird, gibt es von GMR-Sensoren erst seit kurzem kommerziell erhältliche Produkte zur Messung der Position (Firma NVE, 1996) und des Winkels (Firma Siemens, 1997). Für den großen Marktbereich Automobiltechnik sind noch deutliche Fortschritte erforderlich, insbesondere um die dort hohen Anforderungen an Einsatztemperaturen und Langzeitstabilität zu erfüllen. Da bei GMR-Sensoren viele unterschiedliche Materialsysteme und Konzepte in Frage kommen, gibt es hier bei der Technologieentwicklung noch viele Fragestellungen, die direkt in den Bereich der Grundlagenforschung bzw. der zugrundeliegenden Physik gehen. Welche Rolle spielen Schichtrauigkeiten? Welche Materialsysteme sind für welche Anwendungen optimal? Soll man Spin-Valve-Strukturen oder Zwischenschichtkopplung verwenden? Wie vermeidet man Hystereseeffekte? Welche Bias- und Schutzschichten sol-

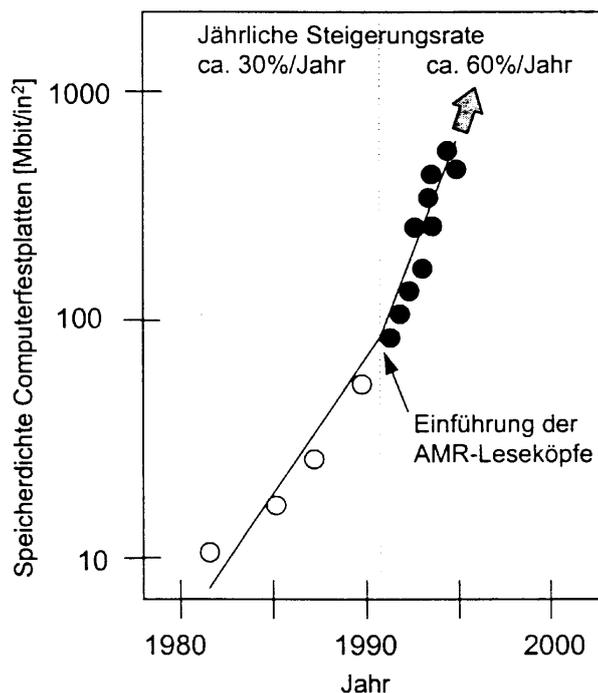


Abbildung 9.4: Erhöhung der Speicherdichte von Computerfestplatten: Die Einführung von AMR-Sensoren im Jahr 1990 hat zu einem steileren Anstieg der Speicherdichte geführt.

len verwendet werden? Hinsichtlich der Produktvorbereitung spielt auch die Integration mit CMOS-Schaltungen eine große Rolle. In diesem Zusammenhang muss überprüft werden, ob beide Prozesstechnologien kompatibel sind.

Für *TMR-Sensoren* ist das Anwendungsspektrum demjenigen von GMR-Sensoren sehr ähnlich. TMR-Elemente erfordern sehr dünne Isolatorschichten, wobei der Widerstand der TMR-Elemente exponentiell von der Dicke dieser Schichten abhängt. Dies bringt hohe Anforderungen an den Herstellungsprozess mit sich, um eine genügend gute Reproduzierbarkeit zu gewährleisten. Diese Probleme sind denjenigen bei der Herstellung supraleitender Tunnelkontakte (Josephson-Kontakte) sehr ähnlich, weshalb die im Bereich der Supraleitungselektronik gemachten Erfahrungen direkt in die TMR-Technologie einfließen können. Prinzipbedingt sind TMR-Elemente hochohmiger als GMR-Elemente. Das heißt, dort wo der hohe elektrische Widerstand der TMR-Elemente Vorteile bringt, werden TMR-Elemente sich wahrscheinlich gegenüber GMR-Elementen durchsetzen. Der höhere Widerstand von TMR-Elementen kann auch deshalb von Vorteil sein, weil schon bei kleineren Strömen höhere Spannungspegel erreicht werden können und deshalb z.B. für einen Ausleseprozess ein höheres Signal-Rausch-Verhältnis erzielt werden kann.

Die *CMR-Sensoren* stecken noch weitgehend in der Grundlagenentwicklung. Nach dem gegenwärtigen Forschungsstand sprechen zwei Eigenschaften der CMR-Materialien gegen eine technische Anwendung. Zum einen werden hohe Magnetfelder von einigen Tesla benötigt, um den großen CMR-Effekt zu erzielen. Zum anderen tritt der CMR-Effekt nur in einem schmalen Temperaturfenster um die Curie-Temperatur der Materialien auf, was den Anwendungsbebereich stark einschränkt. Hinzu kommen große Temperaturkoeffizienten in dem für Anwendungen geeigneten Temperaturfenster.

Jeder magnetische Sensor hat bestimmte Eigenschaften, die ihn für bestimmte Anwendungen besonders auszeichnen. In Tabelle 9.4 sind die zur Zeit wichtigsten magnetischen Sensoren mit ihren grundlegenden Eigenschaften zusammengestellt. Die heute am häufigsten an-

	AMR	GMR	HTS-SQUID	LTS-SQUID
Empfindlichkeit in $T/\sqrt{\text{Hz}}$	10^{-10} bei Raumtempe- ratur, 10^{-12} im Labor bei Raumtempe- ratur	$10^{-12} - 10^{-13}$	10^{-12} bei 77 K, 10^{-14} im La- bor bei 77 K	10^{-15} bei 4.2 K
Empfindlichkeit in Bruchteilen des Erdma- gnetfeldes	$10^{-5} - 10^{-7}$	$10^{-7} - 10^{-8}$	$10^{-7} - 10^{-9}$	10^{-10}

Tabelle 9.3: Vergleich der Empfindlichkeit von magnetoresistiven Sensoren mit supraleitenden Quanteninterferenzdetektoren (SQUIDs) auf der Basis von Hochtemperatur-Supraleitern (HTS) und Tieftemperatur-Supraleitern (LTS).

gewendeten Sensorprinzipien sind induktive und Hall-Sensoren. Die induktiven Sensoren bestehen durch ihre Einfachheit, die Hall-Sensoren haben meistens die Elektronik bereits integriert (Hall-ICs) und sind deswegen sehr kostengünstig. Die Hall-ICs enthalten jedoch Si-Hallelemente, die nicht besonders empfindlich sind, wodurch der Einsatzbereich von Hall-ICs beschränkt wird. Hall-Elemente können, entsprechend optimiert, auch als Feldplatten eingesetzt werden. Hier zeigen sie einen magnetoresistiven Effekt, der quadratisch von der angelegten Feldstärke abhängt. Diese Sensoren können sehr empfindlich sein, besitzen aber starke Temperaturabhängigkeiten, was ihren Anwendungsbereich stark einschränkt. Anisotrop magnetoresistive (AMR) Sensoren zeigen in Permalloy (NiFe) Verbindungen einen magnetoresistiven Effekt von ca 2 - 3% und sind sowohl als Feldstärke- als auch als Richtungssensoren einsetzbar. Als Richtungssensoren können sie jedoch aufgrund ihrer $\cos(2\alpha)$ -Abhängigkeit eine volle Umdrehung nicht eindeutig darstellen.

GMR-Sensoren zeichnen sich durch die hohen erzielbaren Widerstandsänderungen aus. Prinzipiell können Widerstandsänderungen von über 100% erreicht werden. Es hat sich jedoch gezeigt, dass so große Effekte nur in Systemen erzielt werden, die für die industrielle Anwendung nicht geeignet sind (z.B. weil zu große Felder angelegt werden müssen). Es haben sich Sensorsysteme durchgesetzt, die bei magnetischen Feldstärken im kA/m-Bereich⁵ eingesetzt werden können. Diese Systeme haben dann typischerweise Effekte von 5 bis 10%, die immer noch wesentlich größer als die von vergleichbaren Sensoren sind. In der industriellen Fertigung werden im allgemeinen alle Systeme, die auf Schichtsystemen mit alternierenden magnetischen und nicht-magnetischen Schichten basieren und bei denen der elektrische Widerstand von der relativen Magnetisierungsrichtung benachbarter Schichten abhängt, als GMR-Systeme bezeichnet.

9.1.1 GMR Sensoren

Wir werden im Folgenden nur GMR-Sensoren diskutieren. Diese werden zwar zur Zeit weniger eingesetzt als die AMR-Sensoren, besitzen aber gegenüber diesen klar Vorteile und werden sich deshalb wohl langfristig bei der kommerziellen Anwendung durchsetzen. GMR-Sensoren werden fast immer in der Current in Plane (CIP) Konfiguration betrieben, das heißt, der angelegte Strom fließt parallel zu Lagenstruktur. Da die GMR-Schichtsysteme aus Metallen bestehen, würde man in der Current Perpendicular to Plane (CPP) Konfiguration zu geringe

⁵1 kA/m entspricht etwa 1.2 mT.

Sensor	Prinzip	typische Eigenschaft
induktiv	Spannungsinduktion in Leiterschleifen durch Magnetfeldänderung	Signal $\propto dH/dt$
Hall	Elektr. Querspannung in stromdurchflossenem Halbleiterelement durch magn. Feld	Signal $\propto H$ Signal $\propto \cos \alpha$
Feldplatte	Änderung des elektrischen Widerstands von Halbleiterelement durch angelegtes Feld, magnetoresistiv	Signal $\propto H^2$
AMR	Änderung des elektrischen Widerstands in magnetischem Material durch angelegtes Magnetfeld, anisotrop magnetoresistiv	Signal $\propto H$ bis Sättigung Signal $\propto \cos 2\alpha$ $\Delta R/R \sim 2 - 3\%$
GMR	Änderung des elektrischen Widerstands von magnetischen Schichtsystem durch angelegtes Magnetfeld, giant magnetoresistiv	Signal $\propto H$ bis Sättigung $\Delta R/R \sim 10\%$ Signal $\propto \cos \alpha$ für ungekoppelte Systeme

Tabelle 9.4: Magnetische Sensoren und ihre typischen Eigenschaften.

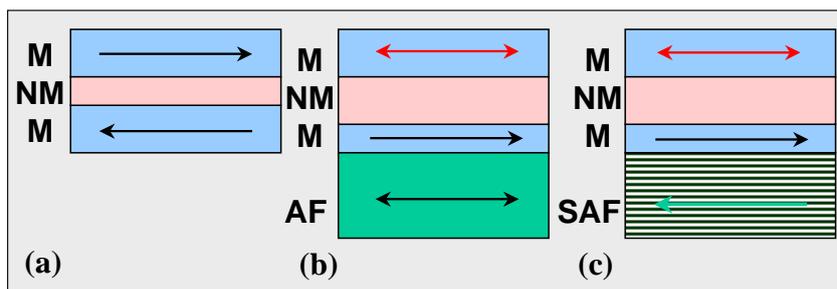


Abbildung 9.5: Verschiedene, in der Praxis relevante Typen von GMR-Sensoren. M: magnetische Schicht, NM: nichtmagnetische Schicht, AF: Antiferromagnet, SAF: Synthetic Antiferromagnet.

Widerstände erhalten. Das Problem des geringen Widerstands ergibt sich sogar bei der CPP-Konfiguration, wenn man den Sensor extrem miniaturisieren will, wie dies z.B. für Leseköpfe erforderlich sein kann. Deshalb ist man unter Umständen dazu gezwungen, zu TMR-Sensoren überzugehen (diese werden natürlich nur in CPP-Konfiguration betrieben), die man aufgrund des hohen Widerstands der Tunnelbarriere ohne Probleme stark miniaturisieren kann. Hier tritt eher umgekehrt das Problem auf, dass bei sehr kleinen Tunnelflächen die Absolutwiderstände zu groß werden. TMR-Sensoren allerdings sind schwieriger herzustellen. Sie sind heute noch nicht weit genug entwickelt und werden noch nicht eingesetzt. Sie sollen an dieser Stelle ebenso wie die AMR-Sensoren nicht diskutiert werden.

Bei den GMR-Sensoren gibt es einige grundlegenden Typen, die sich in der Praxis durchgesetzt haben. In der Praxis (z.B. beim Einsatz in der Automobiltechnik) sind vor allem große Temperaturfenster (-40 bis +150°C) und kleine Feldstärken von wenigen kA/m für einen optimalen und sicheren Betrieb notwendig. Manche Sensortypen würden zwar einen höheren magnetoresistiven Effekt liefern (hierzu gehören die granularen Systeme und natürlich die CMR-Systeme), benötigen aber zu hohe Felder und niedrige Temperaturen. Die für den praktischen Einsatz wichtigsten Typen sind in Abb. 9.5 dargestellt. Typ (a) zeigt den klassischen Fall eines gekoppelten GMR-Systems, bei dem zwei magnetische Schichten (z.B. Co) durch eine nicht-

magnetische Schicht (z.B. Cu) getrennt sind. Die Dicke der nichtmagnetischen Schicht wird dabei so gewählt, dass sich ohne Magnetfeld eine antiferromagnetische Kopplung einstellt. Ein äußeres Feld erzwingt die parallele Ausrichtung der Magnetisierung, wodurch der Widerstand abnimmt.

Der Typ (b) zeigt ein klassisches Spin-Valve-System, bei dem die nichtmagnetische Schicht so dick gewählt wurde, dass keine Kopplung der magnetischen Schichten mehr zustandekommt. Die untere magnetische Schicht ist stark an eine antiferromagnetische Schicht gekoppelt, so dass sie magnetisch hart (vergleichbar zu einem Permanentmagneten) ist. Die obere magnetische Schicht ist weichmagnetisch und dient als Messschicht. Sie kann bereits durch ein kleines äußeres Magnetfeld ummagnetisiert werden, wodurch sich der Widerstand ändert. Spin-Valve-Systeme kommen heute bei Festplattenleseköpfen zum Einsatz.

Der Typ (c) ist sehr ähnlich zu Typ (b), jedoch wird hier die untere antiferromagnetische Schicht durch einen künstlichen Antiferromagneten (Synthetic Antiferromagnet: SAF) ersetzt, der wiederum die Magnetisierungsrichtung der unteren magnetischen Schicht festhält. Die obere, weichmagnetische Schicht dient wiederum als Messschicht, deren Magnetisierungsrichtung leicht durch ein äußeres Feld gedreht werden kann. Der Vorteil des SAF im Vergleich zu einem natürlichen Antiferromagneten wie z.B. NiO ist dabei die größere Temperaturstabilität des SAF.

Um den praktischen Betrieb von GMR-Sensoren und einige Anwendungsfelder zu diskutieren, betrachten wir im Folgenden den Sensortyp (c), der z.B. von der Firma Siemens hergestellt wird.⁶ Die Struktur des Sensors ist weiter unten in Abb. 9.6 gezeigt.

Der Siemens GMR-Sensor

Bei der Firma Siemens wurde ein GMR-Sensor entwickelt, der dem Typ (c) in Abb. 9.5 entspricht. Dieser Sensor ist seit 1997 kommerziell erhältlich. Der Sensor enthält im Prinzip eine hartmagnetische Bezugsschicht und eine weichmagnetische Sensorschicht. Die hartmagnetische Schicht besteht aus einem synthetischen Antiferromagneten (SAF), der ein GMR-Subsystem aus Co/Cu mit starker antiparalleler Kopplung und kleinem verbleibenden Nettomoment darstellt. Die Richtung dieses Nettomoments wird im Produktionsprozess vorgegeben und dient als Bezugsrichtung des Sensors. Durch eine relativ dicke Cu-Schicht vom SAF entkoppelt schließt eine weichmagnetische Fe/Co-Messschicht an, die durch ein äußeres Feld in der Sensorebene beliebig gedreht werden kann. Dazu muss die Feldstärke allerdings groß genug sein, um die Sensorschicht zu sättigen (ca. 5 kA/m). Wenn dies der Fall ist, so ist der Widerstand des Sensors unabhängig von der anliegenden Feldstärke und wird nur durch die relative Orientierung (Winkel α) des externen Feldes zur Bezugsrichtung des AAF bestimmt. Man erhält eine Winkelabhängigkeit $\Delta R/R \propto \cos \alpha$. Der Sensoraufbau ist in Abb. 9.6 schematisch dargestellt. Zur Erhöhung des magnetoresistiven Effekts sind zwei Messschichten symmetrisch um den AAF angeordnet.

Ein typische Anwendung eines GMR-Sensors ist in Abb. 9.7 gezeigt. Ein Permanentmagnet wird über dem Sensor gedreht und aus der Widerstandsänderung kann der Drehwinkel bestimmt werden. Die Messschicht richtet sich dabei nach der Richtung des magnetischen Streufeldes aus. Solange das Streufeld die Messschicht sättigt, hängt das Sensorsignal nur von Winkel ab. In Abb. 9.8 ist die typische kosinusförmige Kennlinie des Sensors gezeigt.

Wie Abb. 9.8 zeigt beträgt die Amplitude des Sensorsignals etwa 5%. Außerdem lässt sich eine leichte Hysterese für gegenläufige Winkeländerungen im Kurvenverlauf feststellen. Die Hy-

⁶W. Clemens et al., J. Appl. Phys. **81**, 4310 (1997).

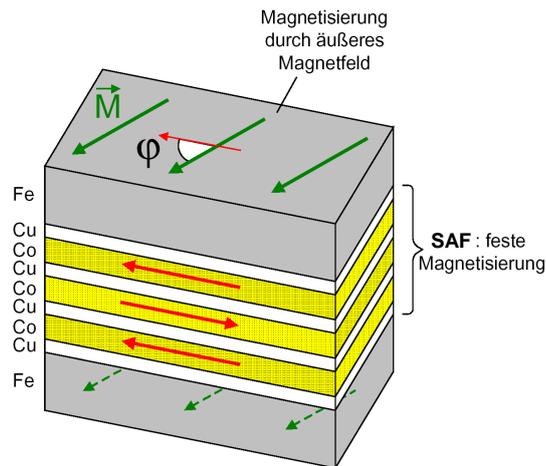


Abbildung 9.6: Schematische Darstellung des Aufbaus eines Siemens GMR-Sensors (aus Siemens Application Notes 10.98).

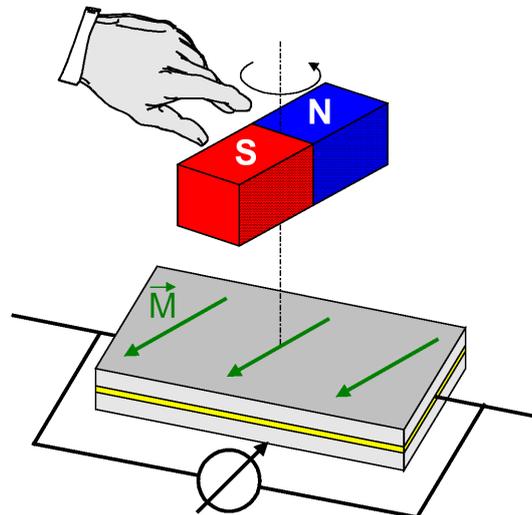


Abbildung 9.7: Typische Anwendung eines GMR-Winkelsensors (aus Siemens Application Notes 10.98).

sterese entsteht durch magnetische Drehreibung und beträgt bei den Siemens GMR-Sensoren etwa 2° . Diese Hysterese begrenzt die Winkelauflösung des Sensors, da das Signal ja nicht nur vom Winkel sondern auch von der Vorgeschichte abhängt. Interessant ist, dass die Hysterese des Sensors nur etwa 0.1° beträgt, wenn man nicht eine volle Umdrehung durchfährt, sondern nur einen Winkelquadranten, also z.B. von 0 bis 90° .

Der Widerstand eines GMR-Sensors hängt auch von der Temperatur ab. Da es sich im allgemeinen um metallische Schichten handelt, nimmt der Widerstand mit sinkender Temperatur ab und zwar beim Siemens GMR-Sensor um etwa $0.1\%/K$. Dieser Zuwachs ist linear über den gesamten Temperaturbereich zwischen -40 bis $150^\circ C$. Dieser Temperatureffekt lässt sich durch den Aufbau des Sensors in Form einer *Wheatstone'schen Brücke* (siehe Abb. 9.9) einfach eliminieren.

Der magnetoresistive Effekt des Sensors nimmt leicht mit zunehmender Temperatur mit einem Koeffizienten von etwa $0.1\%/K$ ab. Dieser Effekt lässt sich elektronisch mit einem *Negativen Immittanz-Konverter: NIC* kompensieren. Eine entsprechende Schaltung ist in Abb. 9.10a ge-

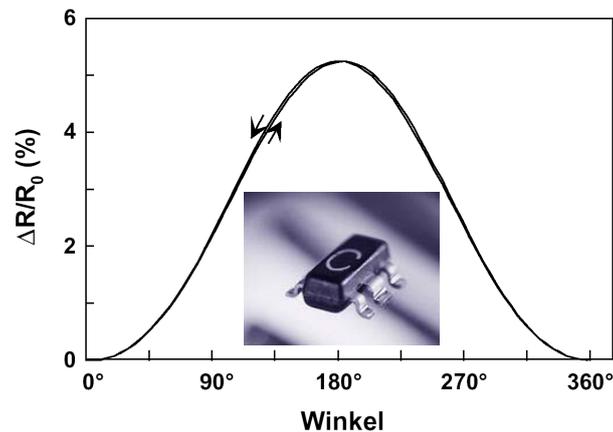


Abbildung 9.8: Widerstandsänderung als Funktion des Winkels bei Drehung eines Permanentmagneten über einem GMR-Sensor. Das Inset zeigt den Siemens-Sensor GMR-C6.

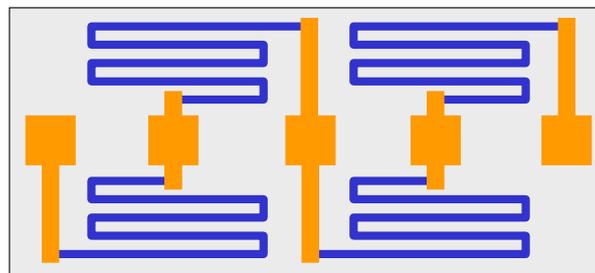


Abbildung 9.9: Schematische Darstellung der Struktur eines GMR-Sensorelements in Brückenschaltung. Die mäanderförmigen Strukturen bilden die Widerstandselemente, die rechteckigen Flächen in der Mitte stellen die Kontaktpads dar.

zeigt. Mit Hilfe eines Operationsverstärkers, der als negativer Immittanzkonverter geschaltet ist, wird der Strom über die Messbrücke als Funktion des Gesamtwidestands der Brücke, also als Funktion der Temperatur, so geregelt, dass das Brückensignal unabhängig von der Temperatur wird. Der Nulldurchgang der Signal-Winkel Kurve bildet dabei unabhängig von der Temperatur einen festen Schaltpunkt. Anwendungen, die nur den Nulldurchgang auswerten, können deshalb ohne Temperaturkompensation aufgebaut werden. Die notwendige Elektronik wird dadurch sehr billig. Für die Signalauswertung benötigt man lediglich einen einfachen Differenzverstärker, wie er in Abb. 9.10b gezeigt ist.

Die Sensorstruktur eines GMR-Sensors in Brückenschaltung ist schematisch in Abb. 9.9 gezeigt. Man erkennt die 4 Widerstandselemente mit mäanderförmigen Strukturen, die eine Wheatstone-Brücke bilden. Die Mäanderstruktur ist notwendig, um einen genügend hohen Widerstand im Bereich 1 k Ω zu erhalten. Die rechteckigen Strukturen in der Mitte des Sensors bilden die Kontaktflächen für Bonddrähte. Die Schichten werden üblicherweise durch Sputtern auf einem Si-Wafer hergestellt und mit optischer Lithographie mikrostrukturiert. Die Größe eines Sensorelements beträgt $500 \times 1000 \mu\text{m}^2$ (Siemens-Sensor), wodurch sich etwa 20.000 Sensoren auf einem 5-Zoll Wafer unterbringen lassen.

Bei den Siemens GMR-Sensoren gibt es z.Z. zwei unterschiedliche Typen (GMR B6 und GMR C6), deren prinzipieller Aufbau in Abb. 9.11 dargestellt ist. Zum Aufbau einer Brücke benötigt man Widerstandselemente mit positiven und negativen Signalen bei gleichem äußeren Feld. Dies erreicht man durch unterschiedliche Ausrichtung der Bezugsrichtung der einzelnen Widerstandselemente. Die Bezugsrichtung des AAF ist in Abb. 9.11 durch Pfeile

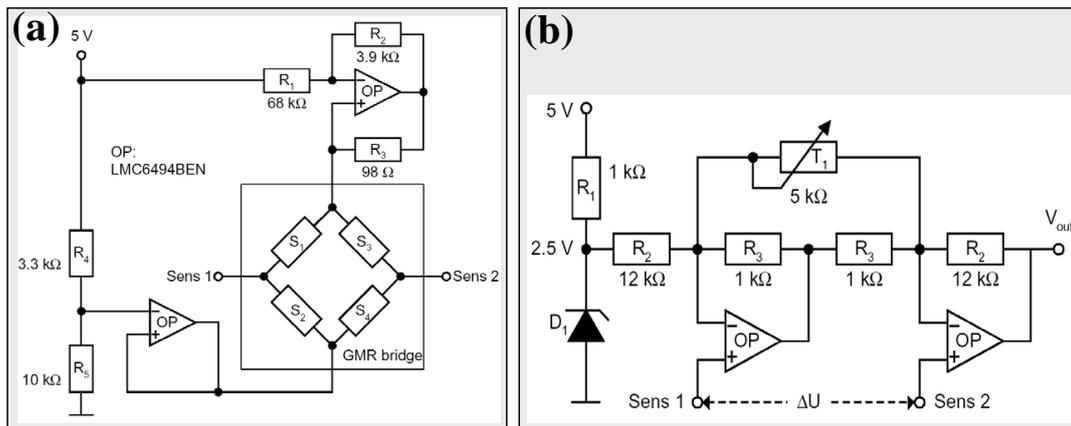


Abbildung 9.10: (a) Temperaturkompensation für einen GMR-Sensor mit Negativem Immittanz Converter (NIC). (b) Einfache Verstärkerschaltung für die Brückenspannung, die zwischen Sens 1 und Sens 2 anliegt.

angedeutet. Beim Sensortyp B6 kann man durch eine Kurzschlussbrücke zwischen den oberen Kontakten zwischen 2 Halbbrücken und einer Vollbrücke umschalten. Bei Drehung des äußeren Feldes erhält man die ebenfalls in Abb. 9.11 gezeigten Signale. Der Sensor B6 liefert eine kosinusförmige Winkelabhängigkeit, während der Sensortyp C6 eine sinusförmige und eine kosinusförmige Kennlinie für die beiden Halbbrücken liefert. Dies wird durch eine zueinander senkrechte Ausrichtung der Bezugsschicht in den beiden Halbbrücken erreicht. Man kann mit dem Sensortyp C6 durch eine arctan-Auswertung sofort eindeutig den Drehwinkel bestimmen.

Ein wesentlicher Vorteil von magnetoresistiven Winkelsensoren ist die Möglichkeit, einen relativ großen Abstand zwischen Sensor und sich drehendem Permanentmagneten zu halten. Der volle Signalhub wird allerdings erst dann erreicht, wenn die Stärke des äußeren Feldes ausreicht, die weichmagnetische Schicht des Sensors zu sättigen. Der Arbeitsbereich endet, wenn das Magnetfeld so groß wird, dass der AAF beeinflusst wird und damit die Empfindlichkeit des Sensors irreparabel reduziert wird. Dadurch ergibt sich für die Anwendung eines GMR-Sensors ein magnetisches Fenster, das für die Anwendung natürlich möglichst groß sein sollte. Innerhalb des nutzbaren magnetischen Fensters bleibt die Signalamplitude des Sensors nahezu konstant. Da das Magnetfeld eines Permanentmagneten mit wachsendem Abstand vom Magneten abnimmt, ergibt sich bezüglich des Abstandsverhaltens ebenfalls ein nutzbares Fenster. In Abb. 9.12a ist schematisch die Signalamplitude eines GMR-Sensors als Funktion der anliegenden Feldstärke gezeigt. Diese Abhängigkeit kann für einen bestimmten Permanentmagneten leicht in ein Abstandsverhalten umgerechnet werden. Man erkennt, dass innerhalb eines Fensters von etwa 5 bis 15 kA/m die Signalamplitude des Sensors fast unabhängig von der anliegenden Feldstärke ist. Der GMR-Sensor ist in diesem Bereich also nur auf die Winkellage des anliegenden Feldes und nicht auf seine absolute Größe empfindlich. Dies ist für Winkelsensoren von großem Vorteil.

Abb. 9.12b zeigt, dass der Abstand zwischen einem GMR-Winkelsensor und dem Gebermagneten völlig irrelevant ist, solange die Feldstärke innerhalb des notwendigen Fensters bleibt. In Abb. 9.12b ist beispielhaft für einen CoSm-Magneten der Größe $20 \times 10 \times 5 \text{ mm}^3$ gezeigt, bei welchem axialen und radialen Abstand 100%, 75% und 50% des maximalen Signalhubs erreicht werden können. Man erkennt, dass innerhalb mehrerer mm die Amplitude konstant bleibt. Dies erlaubt für magnetische Sensoren einen großen Luftspalt und eine große räumliche Aufbautoleranz.

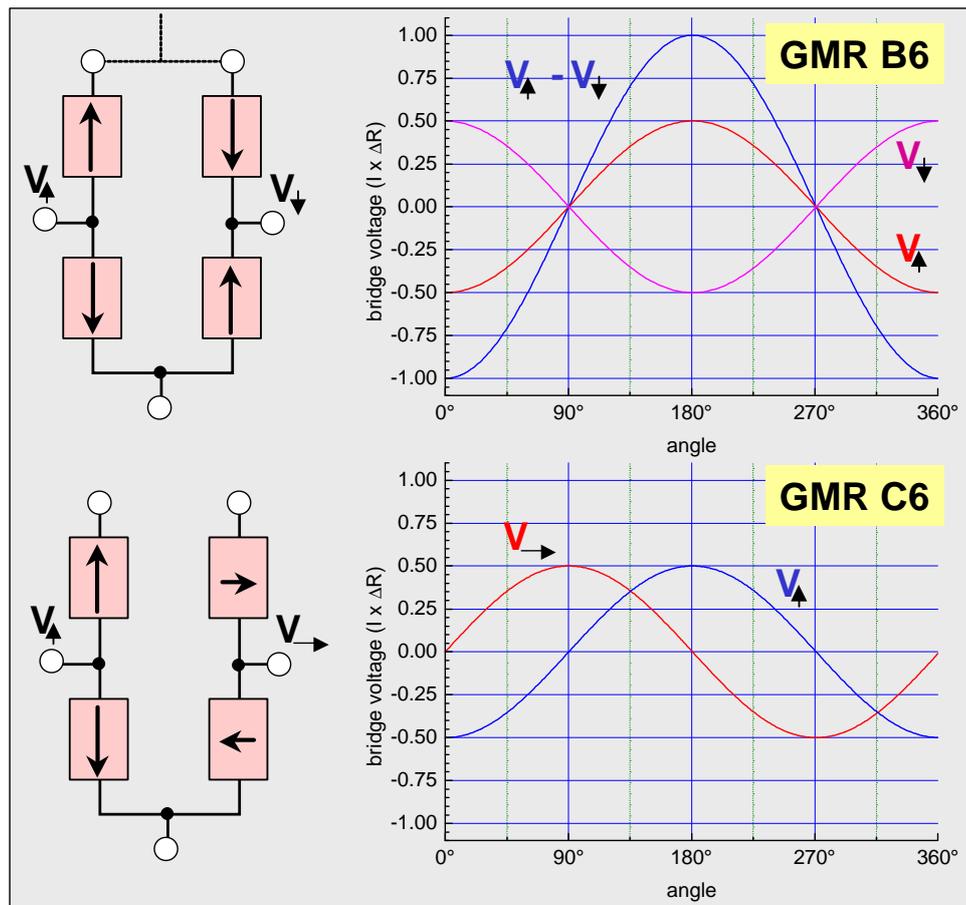


Abbildung 9.11: Anordnung der Sensorelemente in den Brückenschaltungen der Siemens GMR-Sensoren GMR B6 und GMR C6. Ferner sind die zugehörigen Brückenspannungen der Halbbrücken und der Vollbrücke als Funktion des Drehwinkels eines äußeren Magnetfeldes gezeigt.

9.1.2 Anwendungen von GMR-Sensoren

GMR-Sensoren wie die oben diskutierten Siemens GMR-Sensoren GMR B6 und GMR C6 eignen sich für eine Vielzahl von Anwendungen im Bereich der Positionssensorik von Linear- und Drehbewegungen. Diese Sensoren messen in einem weiten Fenster der magnetischen Feldstärke nur die Richtung des anliegenden Feldes, was sehr große Abstände und ausreichende Justagetoleranzen erlaubt. Als Stellmagnete kommen Permanentmagnete in Dipolform oder Polräder zum Einsatz. Bei der Anwendung muss jedoch ein minimaler Abstand zwischen starken Permanentmagneten und dem Sensor eingehalten werden, damit eine Beschädigung der hartmagnetischen Schicht vermieden wird. Beim Siemens GMR-Sensor mit einem AAF darf die anliegende Magnetfeldstärke 15 kA/m nicht übersteigen.

Absoluter Winkelgeber

Da ein GMR-Sensor seinen Widerstand als Funktion der Richtung eines angelegten äußeren Feldes ändert, realisiert er einen absoluten Winkelgeber. Der erfasste Winkelbereich und die erreichbare Winkelauflösung hängen von Gebermagneten (z.B. einfacher Dipolmagnet oder Polrad mit bestimmter Anzahl von Polen), von der Art des Sensors (gekreuzte Halbbrücken, Vollbrücke) und der Auswertung ab. Dreht man einen einfachen Dipolmagneten über einem

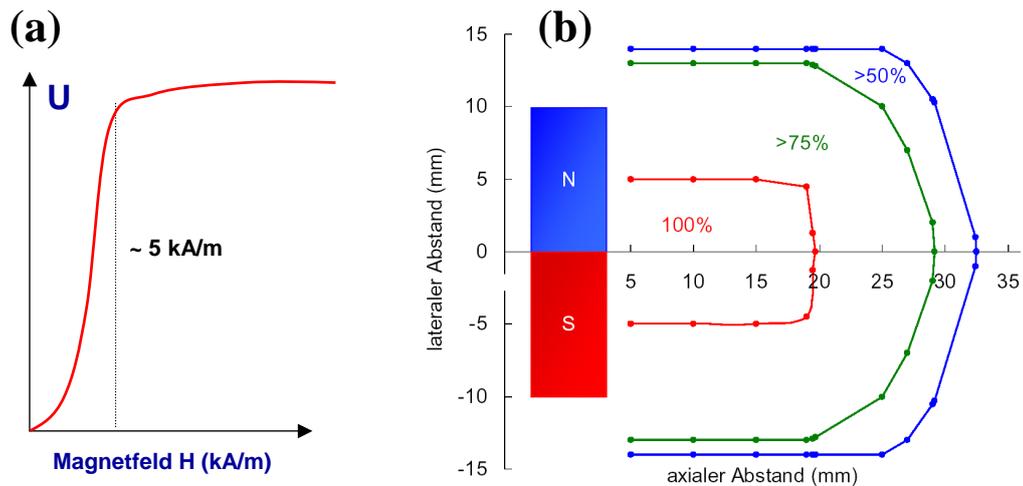


Abbildung 9.12: (a) Schematischer Verlauf des Sensorsignals als Funktion der anliegenden Feldstärke. (b) Relative Stärke des Sensorsignals in Prozent als Funktion des axialen und radialen Abstandes zu einem CoSm-Magneten der Größe $20 \times 10 \times 5 \text{ mm}^3$.

aus zwei gekreuzten Halbbrücken bestehenden GMR-Sensor (z.B. Siemens Typ GMR C6), so erfasst der GMR-Sensor die Drehung des Magneten eindeutig über 360° . Die erhaltenen Signale sind in Abb. 9.13 gezeigt. Die beiden Halbbrückensignale sind um 90° versetzt und lassen sich durch einfache Vergleiche den 4 Quadranten zuordnen. Innerhalb eines Quadranten bestimmt das Signal mit der größeren Winkelabhängigkeit den Winkel.

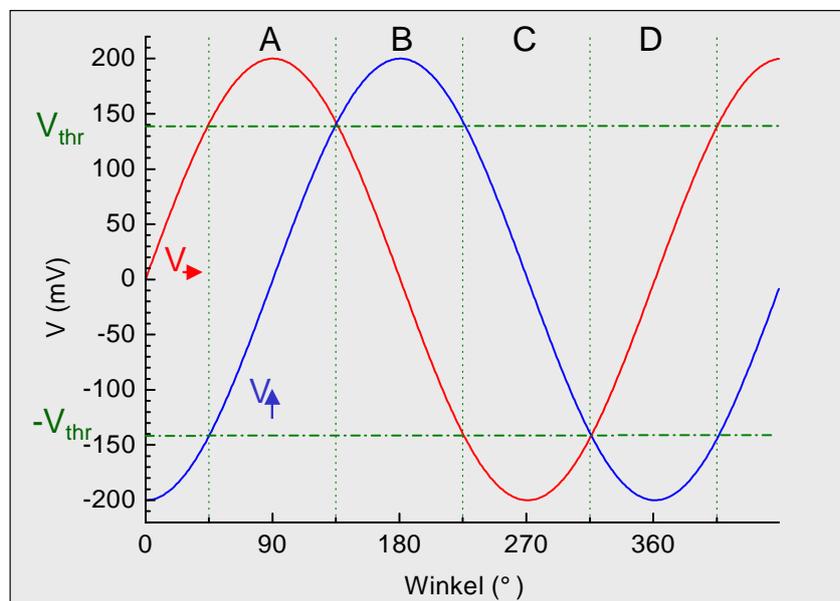


Abbildung 9.13: Sensorsignale von zwei gekreuzten Halbbrücken eines GMR-Sensors (Typ Siemens GMR C6) als Funktion des Winkels. Durch Vergleich der Sensorsignale ist die Zuordnung des Winkels in einen der vier Quadranten A, B, C und D möglich.

Bei einer Versorgungsspannung der Messbrücke von $V_0 = 5 \text{ V}$ und einem magnetoresistiven Effekt von $\Delta R/R = 5\%$ beträgt der Signalhub (ohne jegliche Verstärkung) 250 mV . Der Schnittpunkt der beiden Messkurven bestimmt den Grenzwert $V_{\text{thr}} = 250/\sqrt{2} \text{ mV}$. Eine Winkelgenauigkeit von 2° (begrenzt durch die Hysterese) entspricht 180 Punkten im Voll-

kreis bzw. 45 Punkten in einem Quadranten. Dies erfordert eine Spannungsauflösung von $250/45\sqrt{2} \simeq 4 \text{ mV}$. Diese Spannungsauflösung kann bereits mit einer sehr einfachen Elektronik erreicht werden.

Durch den Einsatz eines Polrades mit N Polpaaren erhöht sich die Winkelauflösung um den Faktor N , beschränkt aber den eindeutig erfassbaren Winkelbereich auf $360^\circ/N$. Es sei noch darauf hingewiesen, dass eine Vollbrücke (z.B. Siemens GMR B6) nur den Winkelbereich von 180° eindeutig auflösen kann. Dafür liefert die Vollbrücke aber die doppelte Signalstärke.

Inkrementaler Winkelgeber

Durch die Verwendung eines Polrades (siehe Abb. 9.14 lässt sich mit Hilfe eines GMR-Sensors (z.B. Siemens Typ GMR B6) einfach ein inkrementaler Drehschalter mit Richtungserkennung realisieren. Ein magnetisches Polrad übersetzt dabei die Drehbewegung und steigert die Winkelauflösung des Systems. Jedes Polpaar erzeugt einen negativen und einen positiven Signalpuls. Der Aufbau des Gesamtsystems besteht aus einem drehbaren Polrad und einer Vollbrücke. Der GMR-Sensor wird so positioniert, dass das magnetische Streufeld des Polrades in der Sensorebene liegt und beim Drehen des Polrades periodisch seine Richtung ändert. Wichtig ist dabei, dass sich die beiden Signale V_\uparrow und V_\downarrow der beiden Halbbrücken der Vollbrücke aufgrund der unterschiedlichen Distanz zum Polrad unterscheiden.

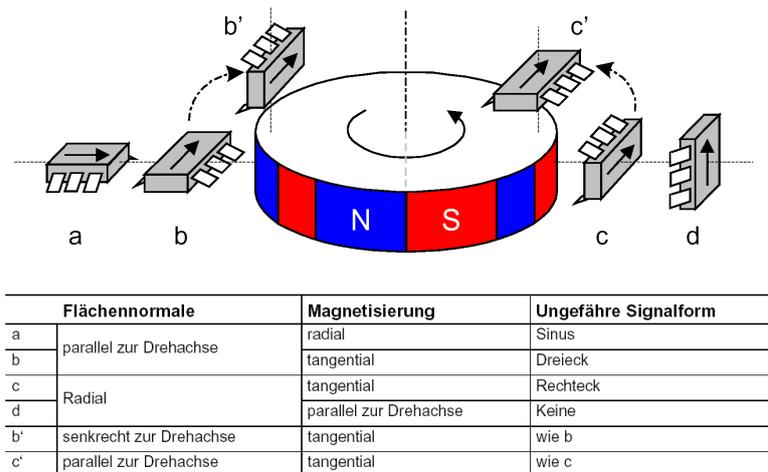


Abbildung 9.14: GMR-Sensor mit magnetischem Polrad zur Realisierung eines inkrementalen Winkelgebers. Die Tabelle zeigt die verschiedenen Signalformen bei unterschiedlicher Positionierung des GMR-Sensors.

Die Ausleseelektronik besteht aus einer Doppelkomparatorschaltung. Die resultierenden Signale sind in Abb. 9.15 dargestellt. Aus der Phasenlage bzw. den Signalflanken lässt sich die Drehrichtung bestimmen. Inkrementale Drehschalter finden im Bereich der Drehzahlmessung und Drehsinnerkennung in automobilen und industriellen Anwendungen sowie als inkrementale Potentiometer oder im Bereich der Durchflussmessung Anwendung.

Kontaktlose Drehwahlschalter

Viele Geräte benötigen aufwendige Drehschalter zur Einstellung verschiedener Gerätefunktionen (z.B. Audiogeräte, Waschmaschinen, Haushaltsgeräte, etc.). Die einzelnen Schalterstellungen stehen z.B. für unterschiedliche Radiokanäle, Waschprogramme,

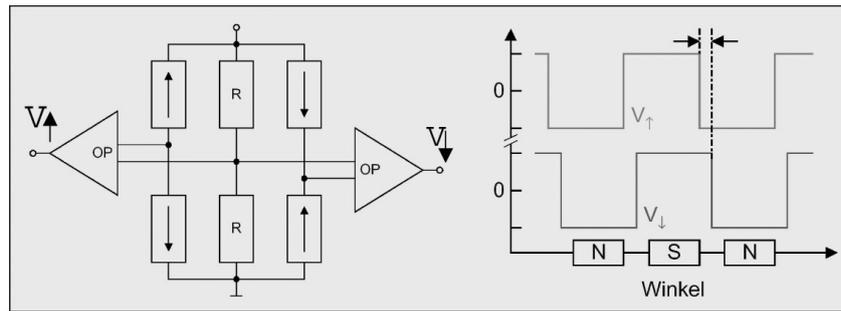


Abbildung 9.15: (a) Doppelkomparatorschaltung für inkrementalen Winkelgeber. (b) Die Komparator-signale der beiden Halbbrücken besitzen aufgrund des unterschiedlichen Abstandes der beiden Halbbrücken von Polrad eine Phasenschiebung, aus der der Drehsinn bestimmt werden kann.

Einstellungen von Herdplatten, etc.. Der Vorteil von kontaktlosen Drehwahlschaltern besteht in ihrer hohen Lebensdauer aufgrund von Verschleißfreiheit und geringerem Montageaufwand. Zudem lässt sich ein und derselbe Drehwahlschalter für ganz unterschiedliche Gerätetypen benutzen. Die unterschiedliche Funktion des Schalters wird von Gerät zu Gerät durch unterschiedliche Software eines Mikrokontrollers realisiert. Dadurch vereinfacht sich die Logistik erheblich.

Im Prinzip sind Drehschalter ein Spezialfall der absoluten Winkelmessung mit einer festen Anzahl von Schaltpunkten. Interessante Anwendungsbeispiele sind Bedienungsfelder für Waschmaschine, Wäschetrockner, Elektroherde oder die verschiedenen Geräte der Unterhaltungselektronik.

Linearsensor

Da ein GMR-Sensor in einem bestimmten Magnetfeldfenster nur auf die Richtung, nicht aber die Amplitude des Feldes reagiert, ändert sich seine Signalamplitude bei der geradlinigen Bewegung des Sensors durch die gekrümmten Feldlinien eines Dipolmagneten (siehe Abb. 9.16). Dadurch kann ein Linearsensor realisiert werden. Durch die Wahl des Magneten und des Weges kann die Auflösung und die Form des Signals variiert werden. Der räumliche Messbereich reicht so weit, wie sich die Feldstärke des Magneten im magnetischen Fenster des Sensors befindet. Der Linearsensor kann für die lineare Positionsbestimmung, die Längenmessung in industriellen Anwendungen, als Füllstandssensor etc. verwendet werden.

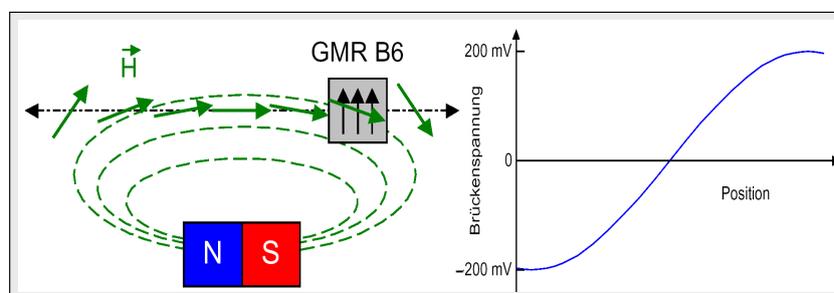


Abbildung 9.16: Zur Bestimmung der Linearbewegung mit Hilfe eines GMR-Sensors. Rechts ist der Verlauf des Sensorsignals als Funktion der Ortskoordinaten entlang der Linearbewegung gezeigt.

Durch Verwendung einer Komparatorschaltung zum Auslesen des Sensors kann mit einem Linearsensor leicht ein Näherungsschalter oder allgemeiner, ein kontaktloser Schalter realisiert

werden. Dabei schaltet die Komparatorschaltung von $-V$ auf $+V$ um, wenn das Sensorsignal einen bestimmten Wert erreicht hat.

Positionssensor für Druckkopf

Für viele Druckgeräte ist die Bestimmung der genauen Position des Druckkopfes erforderlich, um eine hohe Auflösung beim Drucken zu erreichen. Wie in Abb. 9.17 gezeigt ist, lässt sich die Positionsbestimmung mit Hilfe eines GMR-Sensors und einer auf der Führungsschiene des Druckkopfes angebrachten fortlaufenden Magnetisierung aus wechselnden Magnetpolen realisieren. Im Prinzip handelt es sich hierbei um eine Linearmessung unter Verwendung einer Vielzahl von Magnetpolen. Der GMR-Sensor gewährleistet hierbei Langlebigkeit und Zuverlässigkeit, insbesondere ist die Messung kontaktfrei und unempfindlich gegenüber Verschmutzungen z.B. durch Tintenebel.

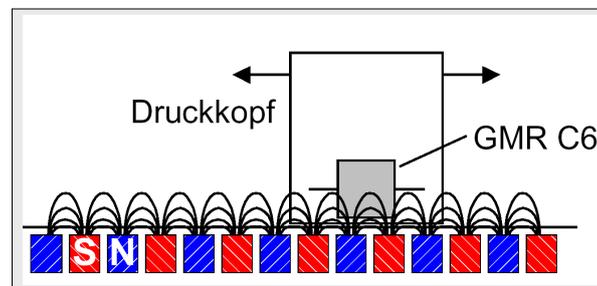


Abbildung 9.17: Zur Positionierung eines Druckkopfes mit Hilfe eines GMR-Sensors.

Schlussbemerkung

Die oben aufgezeigten Anwendungsbereiche zeigen bereits das breite Anwendungsspektrum von GMR-Sensoren. Zusätzlich zu den oben diskutierten Anwendungen aus dem Bereich der Positions- und Drehratenmessung kommen aber auch andere Bereiche wie die Strommessung und die Signalübertragung (galvanische Trennung durch magnetische Koppler) hinzu. Wichtig für den gezielten Einsatz von GMR-Sensoren in verschiedenen Anwendungsfeldern ist sicherlich die Optimierung der Schichtstruktur der GMR-Systeme für die jeweilige Anwendung (Spin-Engineering). Hier besteht noch viel Entwicklungspotenzial. Durch das Aufbringen der magnetischen Schichtstrukturen auf Si-Wafern ist auch eine direkte Integration der Auswertelektronik möglich, wodurch die Herstellungskosten gesenkt werden können. Insgesamt ist zu erwarten, dass sich das neue Feld der GMR-Sensoren weiter schnell entwickeln wird und auch in Anwendungsbereiche vordringen wird, in denen magnetische Sensoren bisher noch nicht etabliert sind.

9.2 Magneto-resistive Leseköpfe

Die wachsende Nachfrage nach Speicherkapazität durch neue PC-Systeme oder Internet-Anwendungen sowie der vorhersehbare Anstieg durch die Unterhaltungselektronik (digitales Fernsehen, Video, digitale Kameras, etc.) erfordert eine ständige Verbesserung der heutigen Speichermedien. Die wichtigsten Massenspeicher basieren dabei heute auf magnetischen Systemen, insbesondere so genannten Festplattenspeichern. Die Entwicklung begann in den 50er Jahren, als IBM im Jahr 1956 mit dem RAMAC 305 das erste *Direct Access Storage Device – DASD* vorgestellt hat. Bei diesem Speicher wurden 5 MB auf 50 Platten mit je 24 Inch Durchmesser bei einer Speicherdichte von etwa 5.000 bits/inch² und einem Preis von etwa US \$ 10.000,- pro MB gespeichert. Bei den magnetischen Festplattenspeichern wird in eine auf einer rotierenden Platte aufgetragene magnetische Schicht mit Hilfe eines Lese-/Schreibkopfes Information eingeschrieben und ausgelesen. Wichtige Kenngrößen sind die Dichte der Spuren die nebeneinander geschrieben werden (Tracks per Inch: TPI) und die lineare Dichte der in einer Spur aufeinanderfolgenden Bits (Bits per Inch: BPI). Die Speicherdichte ergibt sich damit sofort aus dem Produkt TPI x BPI. Die Größe BPI ist durch die Physik der magnetischen Schichtsysteme limitiert, während die Größe TPI meist durch die Dimensionen der Schreib- und Leseköpfe begrenzt wird.

In den letzten Jahrzehnten wurde die Speicherdichte von magnetischen Festplattensystemen enorm erhöht. Im Bereich der magnetischen Festplatten ist der heutige Stand der Technologie (Juli 2003) eine Speicherdichte von etwa 100 bit/ μm^2 . Bei diesen Speicherdichten beträgt die Länge eines Bits weniger als 40 nm bei einer Spurbreite von etwa 0.2 μm .

Abb. 9.18a zeigt die Entwicklung der Speicherdichte in MBits/in² der von der Firma IBM entwickelten Festplattenlaufwerke seit etwa 1960. Man sieht, dass die Speicherdichte in den letzten 40 Jahren um etwa 7 Größenordnungen verbessert wurde. In Abb. 9.18b ist die Entwicklung der Spurbreite und der Bitlänge seit 1990 gezeigt. In nur 10 Jahren wurde die Spurbreite um den Faktor 20, die Bitlänge um den Faktor 10 reduziert.

Bemerkenswert ist auch, dass die Speicherdichte in kommerziellen Festplattenlaufwerken zur Zeit um etwa 100% pro Jahr zunimmt und Speicherdichten von 60 bit/ μm^2 bereits im Jahr 2002 kommerziell erhältlich sein sollten. In den 60er und 70er Jahren betrug die Wachstumsrate der Speicherdichte nur etwa 25%/Jahr und ist dann Anfang der 90er Jahre mit Einführung der magneto-resistiven Leseköpfe (zunächst basierend auf dem AMR-Effekt) auf etwa 60% angestiegen (siehe Abb. 9.18a). Ende der 90er Jahre wurde durch die Einführung der GMR-Leseköpfe die Steigerungsrate nochmals auf etwa 100% pro Jahr vergrößert. Insgesamt ist dieser enorme Fortschritt nur durch eine Fülle von technologischen Entwicklungen bei den Speichermedien,⁷ den Schreibköpfen,⁸ den Leseköpfen⁹ und der Systemelektronik ermöglicht worden. In diesem Abschnitt wollen wir hauptsächlich auf die Entwicklung von Leseköpfen eingehen, in denen seit 1998 auf GMR-Sensoren eingesetzt werden und die erheblich zu dem eben beschriebenen Fortschritt beigetragen haben.

Es ist instruktiv, die heute erreichbare Speicherdichte von Festplattenlaufwerken mit derjenigen eines Telefonbuches zu vergleichen. Legt man die heutige (Jahr 2000) Speicherdichte von 10 bit/ μm^2 zugrunde, so kann man auf einer Plattenfläche von 1 in² etwa 700 Telefonseiten speichern. Eine moderne Festplatte (z.B. 75 GB Deskstar von IBM) mit einer Bauhöhe von nur 25 mm kann den Inhalt von etwa 4.600 Telefonbüchern speichern, die aufeinandergelegt eine Stapelhöhe von etwa 50 m besitzen.

⁷D. Weller et al., IEEE Trans. Magn. **36**, 10 (2000).

⁸S. K. Khizroev et al., IEEE Trans. Magn. **25**, 2544 (1999).

⁹H. C. Tong et al., IEEE Trans. Magn. **35**, 2574 (1999).

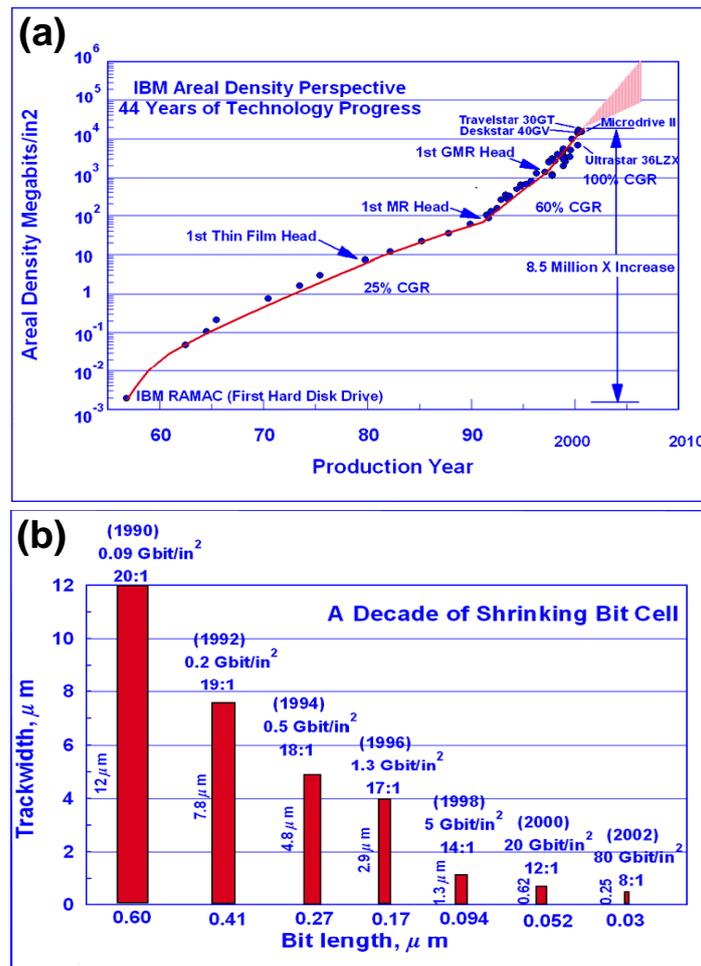


Abbildung 9.18: (a) Entwicklung der Speicherdichte von Festplattenlaufwerken über die letzten etwa 40 Jahre. (b) Verkleinerung der Spurbreite und der Bitlänge in Festplattenlaufwerken seit 1990 (Quelle: IBM Deutschland Speichersysteme GmbH).

Seit Anfang der 90er Jahre und damit für Speicherdichten $> 1.5 \text{ bit}/\mu\text{m}^2$ haben magnetoresistive (MR) Leseköpfe kontinuierlich induktive Verfahren verdrängt. Abb. 9.20 zeigt die Entwicklung der Schreib- und Lesekopftechnologie. Anfangs wurden induktive Systeme verwendet, die sowohl für den Schreib- als auch für den Lesevorgang eingesetzt werden konnten. In den 90er Jahren ging man dann dazu über, magnetoresistive Leseköpfe einzusetzen, während für den Schreibvorgang nach wie vor induktive Elemente verwendet werden.

Das Schreib- und Leseprinzip eines heutigen Schreib-/Lesekopfsystems mit induktivem Schreib- und magnetoresistiven Lesevorgang ist schematisch in Abb. 9.21 dargestellt. Bei einem magnetoresistiven Lesekopf durchsetzt das Streufeld des Bitmusters auf der Platte den magnetoresistiven Sensor und führt damit aufgrund der Rotation der Platte zu einem zeitlich veränderlichen Spannungssignals entsprechend dem abgerasterten Bitmuster. Der Schreibkopf prägt der magnetischen Beschichtung eines rotierenden Platte durch das Streufeld in einem schmalen Spalt eines Hufeisenmagneten lokal eine bestimmte Magnetisierungsrichtung ein. Es ist klar, dass die Breite des Spalts und die Tiefe des Schreibkopfes sehr klein sein müssen, um eine hohe BPI und TPI Rate zu erreichen.

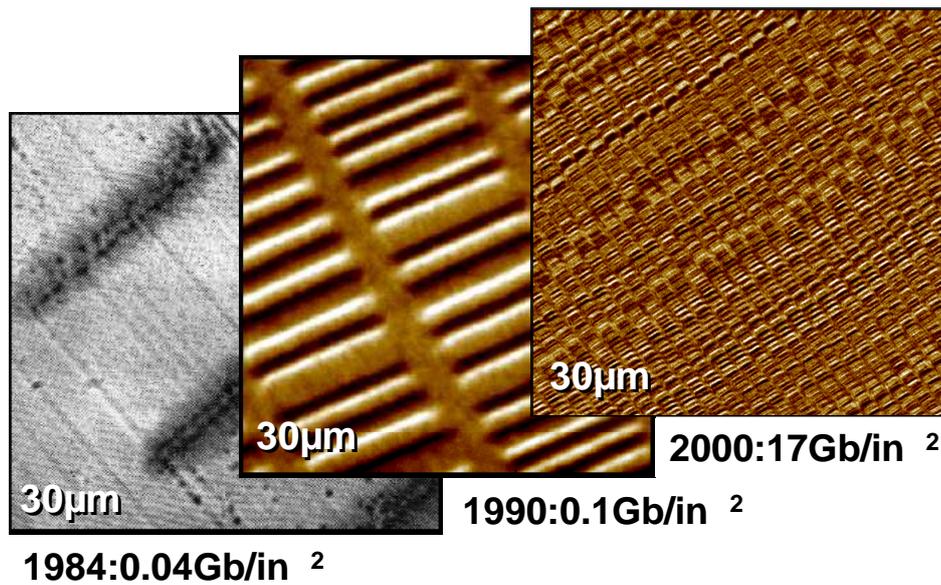


Abbildung 9.19: Visualisierung der Entwicklung der Speicherdichte in Festplattenlaufwerken. Gezeigt sind die Bitmuster in einer Fläche von $30 \times 30 \mu\text{m}^2$. Die Aufnahmen wurden mit magnetooptischen Methoden bzw. mit einem Magnetischen Kraftmikroskop erhalten (Quelle: IBM Deutschland Speichersysteme GmbH).

9.2.1 Design von Lese- und Schreibköpfen

Der Aufbau eines magnetoresistiven Schreib-/Lesekopfes ist schematisch in Abb. 9.22 gezeigt. Der Kopf besteht aus zwei Elementen, dem magnetoresistiven Leseelement und dem induktiven Schreibelement. Die Querschnittsabbildung in Abb. 9.22 zeigt, dass die heutigen induktiven Schreibelemente auch in Dünnschichttechnik gefertigt werden. Das magnetoresistive Element im Lesekopf besteht üblicherweise aus einem streifenförmigen magnetoresistiven Film, der mit zwei Kontakten mit Strom versorgt wird. Über diese Kontakte wird gleichzeitig die Spannung gemessen. Abhängig von der Anwendung können verschiedene Designs verwendet werden. In Abb. 9.22 ist der so genannte "Shielded Head" gezeigt, nicht diskutiert werden soll hier der "Yoke-Type Head".¹⁰ Der magnetoresistive Sensor des Schreibelements ist üblicherweise abgeschirmt (Schirm 1 und 2), wobei Schirm 2 auch als Poltip für die planare Dünnschichtspulenkonfiguration dient.

Durch die Abschirmung des magnetoresistiven Sensors wird einerseits die lineare Auflösung des Lesekopfes verbessert und das Hochfrequenzverhalten optimiert. Andererseits werden in der abgeschirmten Konfiguration die Entmagnetisierungsfelder stark reduziert. Dadurch benötigt allerdings die freie Schicht eine zusätzliche longitudinale Stabilisierung durch ein hartmagnetisches Material ("Hard Bias"), durch die die Magnetisierungsrichtung parallel zur Stromrichtung ausgerichtet wird (siehe Abb. 9.23). Bei Anwesenheit eines Signalfeldes rotiert die Magnetisierung der freien Schicht dann aus dieser longitudinalen Ausrichtung heraus.

MR-Leseköpfe für Speicherdichten bis zu etwa $8 \text{ bit}/\mu\text{m}^2$ basierten zunächst auf dem anisotropen Magnetowiderstandseffekt, bei dem das Sensorsignal proportional zum Kosinus des Winkels zwischen der Magnetisierung und des Sensorstroms ist. Für höhere Speicherdichten wurde es zunehmend schwierig, mit diesen Leseköpfen die erforderliche Bitfehlerrate zu er-

¹⁰siehe hierzu z.B. R. Coehoorn, in *Magnetic Multilayers and Giant Magnetoresistance*, U. Hartmann ed., Springer Berlin (2000).

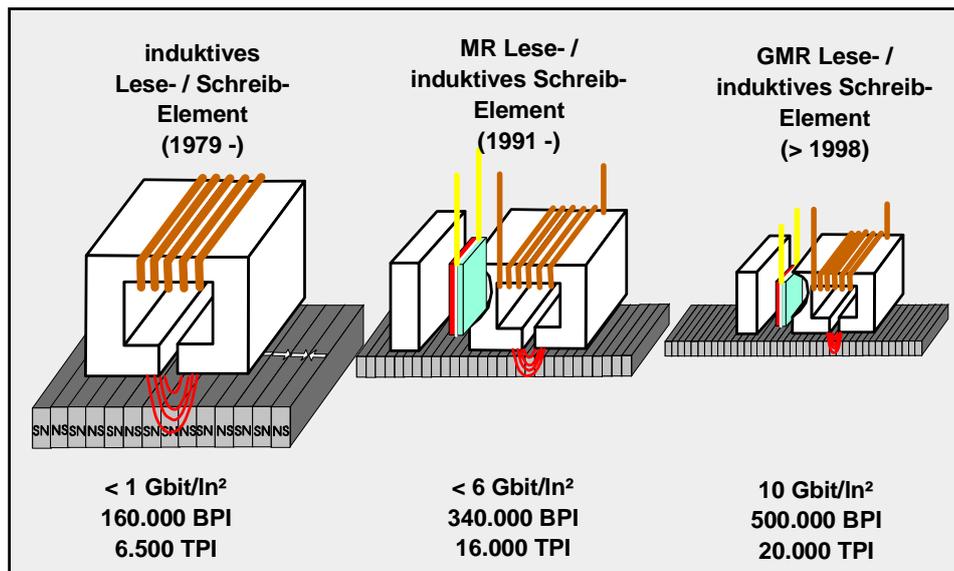


Abbildung 9.20: Entwicklung der Technologie für Schreib-/Lesekopfsysteme für Festplattenlaufwerke seit etwa 1980. In den 90er Jahren wurden die induktiven Leseköpfe durch magnetoresistive Leseköpfe ersetzt (Quelle: IBM Deutschland Speichersysteme GmbH).

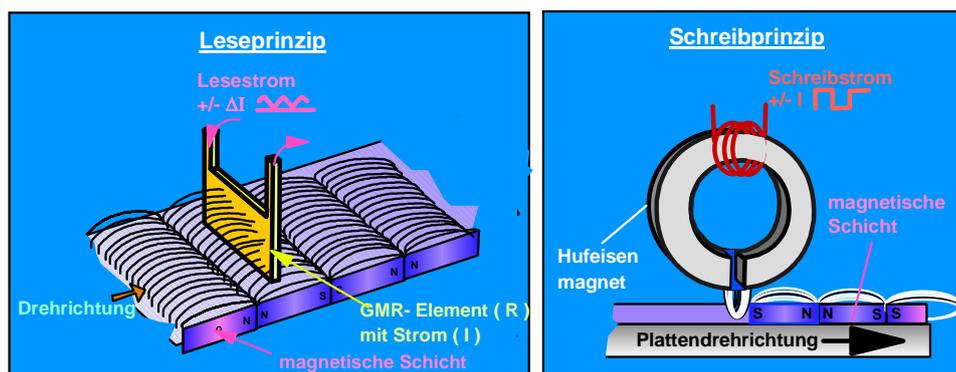


Abbildung 9.21: Schematische Darstellung des Lese- und Schreibprinzips in einem magnetoresistiven Lese-/Schreibkopf (Quelle: IBM Deutschland Speichersysteme GmbH).

zielen. Ende 1997 führte deshalb zuerst IBM magnetoresistive Leseköpfe ein, die auf Spinventilen basierten. Diese hatten einen MR-Effekt von 6 bis 8%. Abb. 9.24 zeigt drei verschiedene Spinventilkonfigurationen. Die Spinventile der ersten Generation waren entweder "top"- oder "bottom-pinned" Spinventile mit einem maximalen MR-Effekt von etwa 8%. Für Lesekopfanwendungen ist neben der Größe des MR-Effekts aber auch das Austauschfeld durch die Austausch-Anisotropie an der Grenzfläche zwischen gepinnter Lage und dem Antiferromagneten von entscheidender Bedeutung. Die Blocking-Temperatur sollte oberhalb von 300°C liegen, um ein zufälliges Umorientieren der gepinnten Lage während des Produktionsprozesses oder im Betrieb zu vermeiden. Ferner sollte die Austauschenergie groß sein ($> 0.2 \text{ mJ/m}^2$), damit das Austauschfeld gegen Entmagnetisierungsfelder im Bereich des Kopfes schützt. Schließlich sollte die Korrosionsbeständigkeit des antiferromagnetischen Materials gut sein (mindestens so gut wie die der freien Schicht aus $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$). Ein weiterer wichtiger Aspekt ist die unvermeidbare magnetische Kopplung zwischen freier und gepinnter Schicht. Diese sollte möglichst klein sein. Eine endliche Kopplung wird durch eine ferromagnetische Néel-Kopplung aufgrund von Schichttraugigkeiten, eine indirekte Austauschkopplung über die Cu-

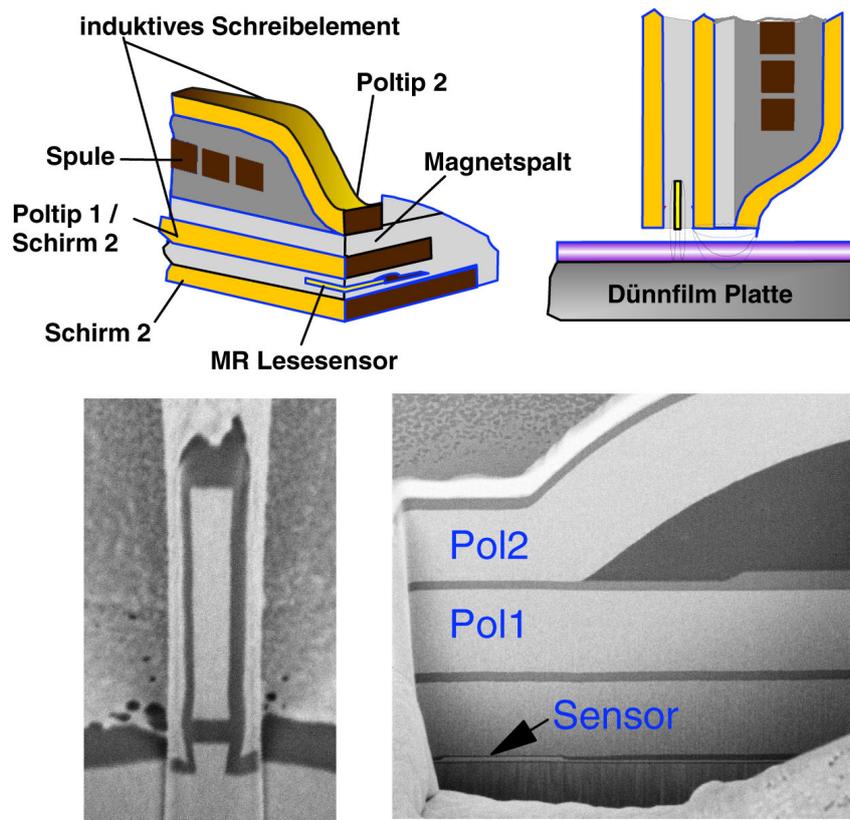


Abbildung 9.22: Aufbau eines Lese-/Schreibkopfsystems für Festplattenspeicher mit magnetoresistivem Lese- und induktivem Schreibelement. Die unteren Bilder zeigen Rasterelektronenmikroskop-Bilder von Querschnittsflächen, die mit Hilfe eines fokussierten Ionenstrahls präpariert wurden. (Quelle: IBM Deutschland Speichersysteme GmbH).

Zwischenschicht oder über die Entmagnetisierungsfelder erzeugt.

Die Größe des MR-Effekts der Spinventile der ersten Generation muss erhöht werden, um die Speicherdichten noch weiter zu vergrößern. Man schätzt, dass für eine Speicherdichte oberhalb von etwa $100 \text{ bits}/\mu\text{m}^2$ der MR-Effekt der Spinventile der ersten Generation zu niedrig wird. Für Spinventile der zweiten Generation wird ein MR-Effekt von 20% angepeilt. Dies kann eventuell mit symmetrischen Spinventilen ("Dual Spin Valves") mit optimierter Schichtfolge erreicht werden. Vielleicht werden aber auch magnetische Tunnelkontakte als magnetoresistive Bauelemente eingesetzt.

Im Fall von abgeschirmten Leseköpfen (siehe Abb. 9.22) ist die minimale Bitlänge, die noch aufgelöst werden kann, durch zwei charakteristische Abmessungen gegeben: zum einen durch den Abstand der beiden relativ dicken Schilde aus weichmagnetischem Material, zum anderen durch den Abstand des magnetoresistiven Materials vom Speichermedium auf der Platte. Für Platten mit Speicherdichten oberhalb von $100 \text{ bits}/\mu\text{m}^2$ muss die Dicke der freien Schicht auf nur wenige nm reduziert werden, der Abstand zwischen freier Schicht und den Schilden ("Read Gap") auf einige 10 nm. Der Abstand zwischen magnetischem Speichermedium und magnetoresistivem Element muss durch eine Verringerung der Flughöhe des Lesekopfs über der Plattenoberfläche erreicht werden. Es werden Flughöhen von weit unterhalb 100 nm notwendig (aktueller Wert für die Flughöhe im Juli 2003: 20-30 nm).¹¹ Die Kopfhalterung muss für

¹¹Setzt man die Flughöhe von 100 nm eines 1 mm dicken Lesekopfes in Relation zu einer fiktiven Flughöhe eines 10 m hohen Jumbojets, so sieht man, dass die Flughöhe des Lesekopfes einer Flughöhe des Jumbojets von nur 1 mm

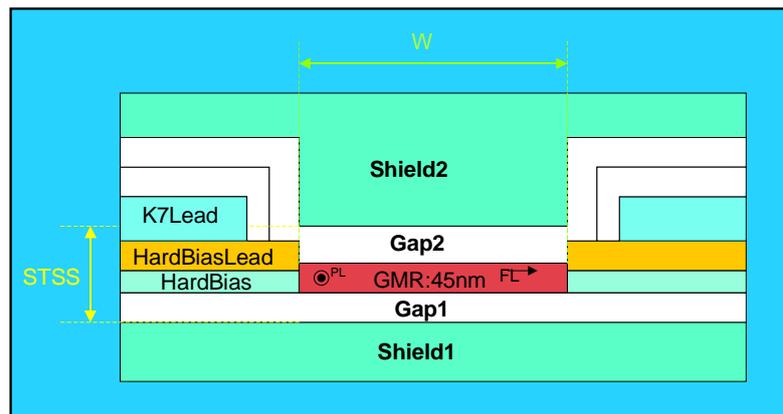


Abbildung 9.23: Querschnittsansicht des Schichtaufbaus eines GMR Schreib-/Lesekopfes. W definiert die Spurbreite und damit den erreichbaren TPI-Wert. Der Abstand $STSS$ bestimmt die lineare Auflösung des Sensors und damit den erreichbaren BPI-Wert.

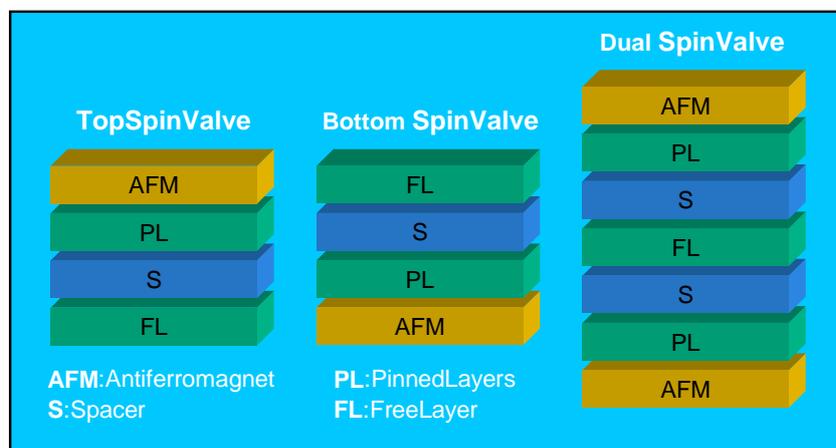


Abbildung 9.24: Schematische Darstellung des Schichtaufbaus verschiedener Arten von Spinventilsystemen. Der linke und mittlere Aufbau stellen asymmetrische (top- and bottom-pinned) Spinventile, der rechte ein symmetrisches Spinventil dar.

die Realisierung sehr niedriger Flughöhen aerodynamisch geformt sein. Abb. 9.25 zeigt ein Rasterelektronenmikroskopbild eines Schreib-/Lesekopf-Systems auf seiner aerodynamisch geformten Halterung. Man erkennt die elektrischen Zuleitungen und den Schreib-/Lesekopf. Der GMR-Kopf besitzt eine Luftleitoberfläche, um seine aerodynamischen Eigenschaften zu optimieren.

Wir diskutieren abschließend kurz das Ausgangssignal eines Spinventilsensors. Es kann folgendermaßen ausgedrückt werden¹²

$$\Delta V = \frac{\Delta R}{R} R_{\square} I \frac{W}{h} \frac{1}{2} \langle \cos(\theta_{\text{free}} - \theta_{\text{pinned}}) \rangle . \tag{9.2.1}$$

Hierbei ist $\Delta R/R$ der maximale MR-Effekt des Spinventils, R_{\square} der Flächenwiderstand des Sensorschichtsystems, W die Spurbreite (entspricht Sensorbreite), h die Höhe des Sensors und

entsprechen würde.

¹²H. N. Bertram, IEEE Trans. Magn. **31**, 2573 (1995).

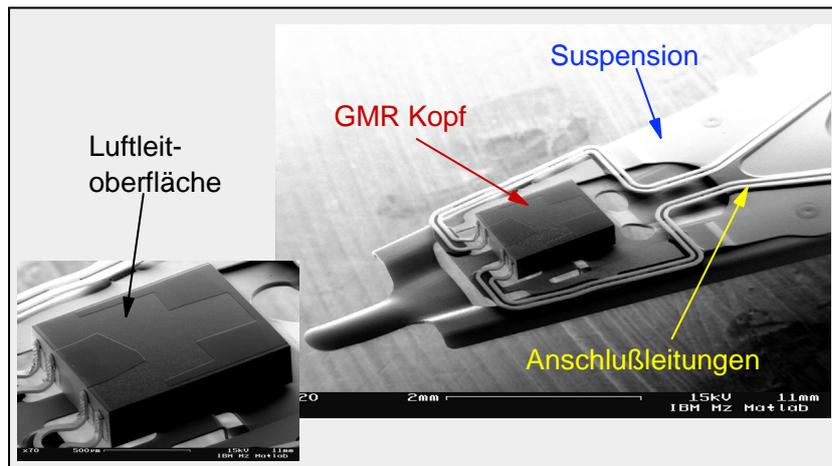


Abbildung 9.25: Rasterelektronenmikroskopbild eines Schreib-/Lesekopfs auf seiner aerodynamisch geformten Halterung (Quelle: IBM Deutschland Speichersysteme GmbH).

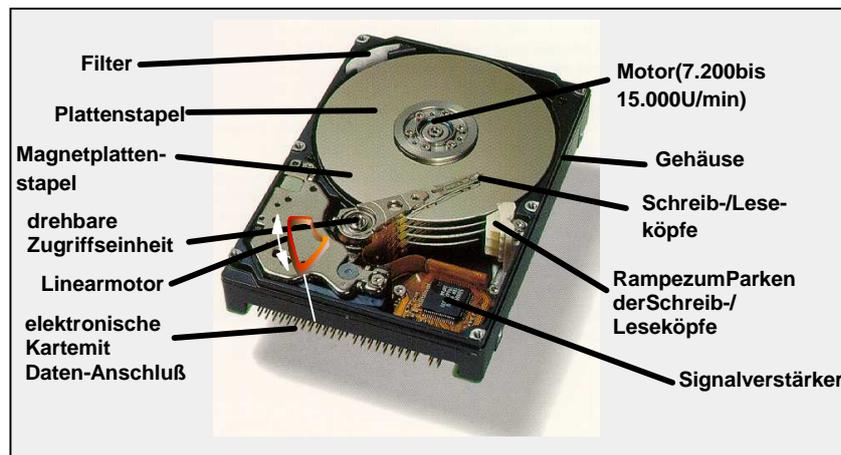


Abbildung 9.26: Bestandteile einer Festplatte (Quelle: IBM Deutschland Speichersysteme GmbH).

I der Sensorstrom. θ_{free} und θ_{pinned} sind die Winkel, die die Magnetisierung der freien und der gepinnten Schicht mit der Stromrichtung einschließen. Der Mittelwert $\langle \dots \rangle$ wird über die Höhe des Sensorelements genommen. Er hängt von dem in das Sensorelement eingekoppelten Fluss Φ , der Dicke d_{free} der freien Schicht sowie dem Abstand zwischen freier Schicht und den weichmagnetischen Schilden ab. Er variiert etwa wie $\langle \dots \rangle \propto \Phi/d_{\text{free}}$, d.h. man kann eine Vergrößerung des Sensorsignals durch eine Verkleinerung von d_{free} erhalten. Man erkennt ferner, das man bei gleichem Strom eine Vergrößerung des Ausgangssignals erhält, wenn man das Verhältnis W/h verbessert.

In Abb. 9.26 sind die wichtigsten Bestandteile einer Festplatte gezeigt. Alle wesentlichen Teile müssen kontinuierlich verbessert werden, um die enormen Steigerungsraten bei der Speicherdichte zu ermöglichen.

9.3 Magnetic Random Access Memory – MRAM

Magnetische Schichtstrukturen aus ferromagnetischen Lagen und nicht-magnetischen Zwischenschichten (metallisch oder isolierend) werden als potentielle Kandidaten für die Realisierung magnetischer Random Access Memories (MRAM) betrachtet, die in Zukunft die heute in Computern eingesetzten dynamischen Random Access Memories (DRAM) auf Halbleiterbasis ersetzen bzw. teilweise verdrängen können. Der große Vorteil von MRAMs ist die Tatsache, dass sie im Gegensatz zu den DRAMs nicht-flüchtig sind. Das heißt, sie behalten die in ihnen gespeicherte Information auch dann, wenn die elektrische Versorgung abgeschaltet wird. Diese Vorteile von MRAMs gegenüber DRAMs und die großen Fortschritte bei der Herstellung von magnetischen Schichtstrukturen mit hohem MR-Effekt haben ein enormes Interesse (auch der Industrie) an MRAMs geweckt. In diesem Abschnitt soll ein kurzer Einblick in die geschichtliche Entwicklung, die Funktionsweise und Basiskonzepte für MRAMs sowie der Stand bei den Herstellungstechniken gegeben werden.

9.3.1 Geschichtlicher Hintergrund

Es ist historisch sehr interessant, dass für eine lange Periode (bis in die 70er Jahre) magnetische RAMs verwendet wurden, die auf winzigen Ferritringen mit einem Durchmesser von etwa 0.5 mm basierten. Man bezeichnete diese Speichersysteme als *Ringkernspeicher*. Diese Systeme wurden verwendet, obwohl bereits 1955 vorgeschlagen wurde, dass man strukturierte dünne Filme anstelle der Ringe verwenden sollte. Erste experimentelle Realisierungen von Dünnschichtsystemen wurden bereits 1959 vorgestellt.¹³ Obwohl die Dünnschichtsysteme enorme Vorteile bezüglich der Speicherdichte und des Leistungsverbrauchs boten, haben sie sich damals nicht durchgesetzt. Der Grund dafür war die erfolgreiche Entwicklung der DRAMs, die alle anderen Konkurrenten aus dem Felde geschlagen haben. Heute, fast ein halbes Jahrhundert später, machen magnetische Systeme einen neuen Anlauf, das vorlorengegangene Terrain zurückzuerobern.

Es stellt sich die Frage, was ist heute anders als vor 50 Jahren. Die einfache Antwort lautet: es gibt heute neue magnetoresistive Effekte wie den GMR- oder den TMR-Effekt. Diese neuen magnetoresistiven Effekte zusammen mit anderen Effekten wie der Austausch-Anisotropie und der Zwischenschichtkopplung machen die heutige Situation grundsätzlich besser. Insbesondere können die Speicherelemente durch Ausnutzen der MR-Effekte ausgelesen werden.¹⁴ MRAMs haben nach Auffassung vieler Experten das Potenzial, die Speicherlandschaft von heute zu revolutionieren, da sie, wie bereits erwähnt, nicht-flüchtig sind. Somit können MRAMs gleichzeitig als Arbeits- und Massenspeicher auf dem gleichen Modul eingesetzt werden, was wiederum zu Vereinfachungen bei der Architektur, zu kleineren Abmessungen und letztendlich zur Produktion billigerer Geräte führen kann. Außer für Desktop-Computer eignen sich MRAMs vor allem für mobile Systeme wie Handys und PDAs und können dort Speichermedien wie DRAM, Festplatte und Flash-Memory ersetzen. Da MRAM die Unterscheidung zwischen Arbeits- und Massenspeicher überflüssig macht, würden vor allem die lästigen Ladezeiten beim Hochfahren eines Computers oder Einschalten eines Mobiltelefons wegfallen. Da außerdem die für DRAMs notwendigen Auffrischungszyklen wegfallen würden, erwartet man auch eine längere Betriebszeit für Akku-Systeme.

Frühe magnetische RAMs benutzen im Unterschied zu den seriellen Speichersystemen wie Bänder und Festplatten die natürliche Hysterese von ferromagnetischen Materialien, um ei-

¹³J. I. Rafael, J. Appl. Phys. **30**, 608 (1959).

¹⁴Man benutzt heute die Abkürzung MRAM auch meist für magnetoresistive Random Access Memories.

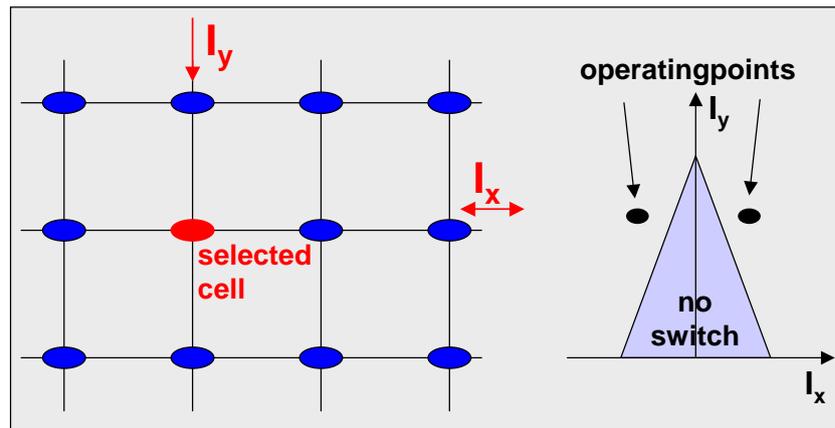


Abbildung 9.27: Zweidimensionales magnetisches Speicherzellen-Array (links) und Auswahl der Zelle (rechts).

ne logische "0" oder "1" zu speichern. Hierzu wurden zwei oder mehr stromführende Drähte verwendet. Magnetische Elemente wurden dabei so in einem Array angeordnet, dass nur ein bestimmtes Element eine Kombination von Magnetfeldern erhielt, deren Summe oberhalb eines Schwellenfeldes lag. Alle anderen Elemente des Arrays behalten ihren Speicherzustand bei. Eine einfache Version eines Schreibvorgangs in einem 2D-System diesen Typs ist in Abb. 9.27 gezeigt. Die meisten der heutigen MRAM-Konzepte verwenden prinzipiell immer noch diese Schreibtechnik.

Die ersten Speicherzellen (meist magnetische Ringkernspeicher) benutzen induktive Signale, um den Speicherzustand zu bestimmen. Es werden dabei magnetische Felder (mittels eines Stroms) verwendet, um die Speicherzelle auszulesen. Dabei kann aus der Polarität der induzierten Spannung im Lesekreis abgelesen werden, ob eine "0" oder eine "1" in der Zelle gespeichert ist. Die Funktionsweise eines Ringkernspeichers sowie 2 Beispiele für industriell hergestellte Speichersysteme sind in Abb. 9.28 gezeigt. Die Schemazeichnung zeigt, dass 3 Drahtsysteme für den Schreib- und Leseprozess verwendet werden. Der Schreibprozess wird durch gleichzeitige Strompulse entlang der Zeilen- ("Word-Lines") und Spaltenauswahldrähte ("Bit-Lines") realisiert. Beim Leseprozess werden ebenfalls Strompulse durch diese Drähte geschickt. Aus dem im Lesedraht, der durch alle Ringkerne geht, induktiv erzeugten Spannungssignal kann abgelesen werden, ob die Magnetisierungsrichtung der Speicherzelle durch die Strompulse umgeschaltet wurde oder nicht. Daraus kann dann die vorher eingespeicherte Magnetisierungsrichtung bestimmt werden.

Der Vorschlag, magnetoresistive Auslesemethoden zu verwenden, stammt ursprünglich von J. Raffel¹⁵ Er schlug ein System vor, bei dem Daten in einem magnetischen Körper gespeichert wurden, der ein Streufeld erzeugt, das dann von einem separaten magnetoresistiven Sensorelement detektiert werden kann. Mit diesem Konzept konnten aber keine hohen Speicherdichten erzielt werden, da es schwierig war, genügend große Streufelder von einem kleinen magnetischen Körper zu erhalten.

Die erste Technologie, bei der ein magnetisches Element sowohl für die Speicherung als auch für das magnetoresistive Auslese-Element verwendet wurde, war die so genannte *Cross-Tie-Cell*. Man spricht dann von einem CRAM¹⁶ Das Problem der Cross-Tie-Cell, die hier nicht im

¹⁵J. Raffel, T. Crowder, IEEE Trans. El. Comp. **13**, 611 (1964).

¹⁶siehe M. Johnson, B. Bennett, M. Yang, IEEE Trans. Magn. **34**, 1054 (1998); US Patent No.: 5197025, L. Schwee und P. Hunter (1993).

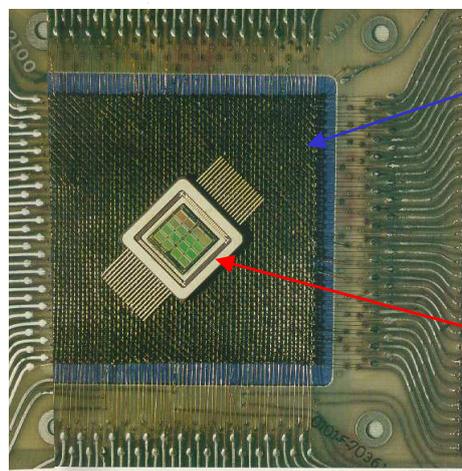
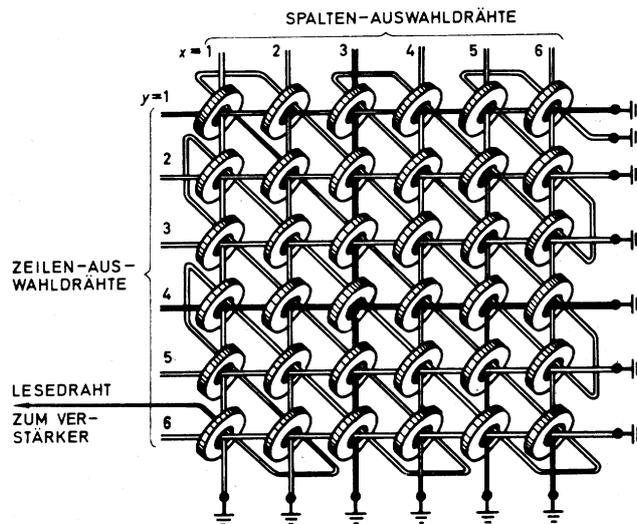


Abbildung 9.28: Prinzip eines Ringkernspeichers (oben) und herstellungstechnische Realisierung eines 1 kBit Ringkernspeichers. Zum Vergleich ist ein 16 kBit Ringkernspeicher in Dünnschichttechnologie der Firma Honeywell gezeigt, der in wesentlich kleinerer Bauform hergestellt werden kann.

Detail beschrieben werden soll, war der geringe Unterschied des Widerstands (nur etwa 0.1%) zwischen einer "0" und einer "1", das heißt, man erhielt für die Praxis zu geringe Signalamplituden.

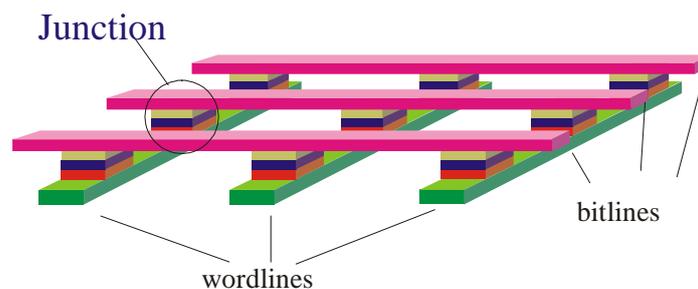


Abbildung 9.29: Schematische Darstellung einer MRAM-Speicherzellenarrays auf der Basis von magnetischen Tunnelkontakten.

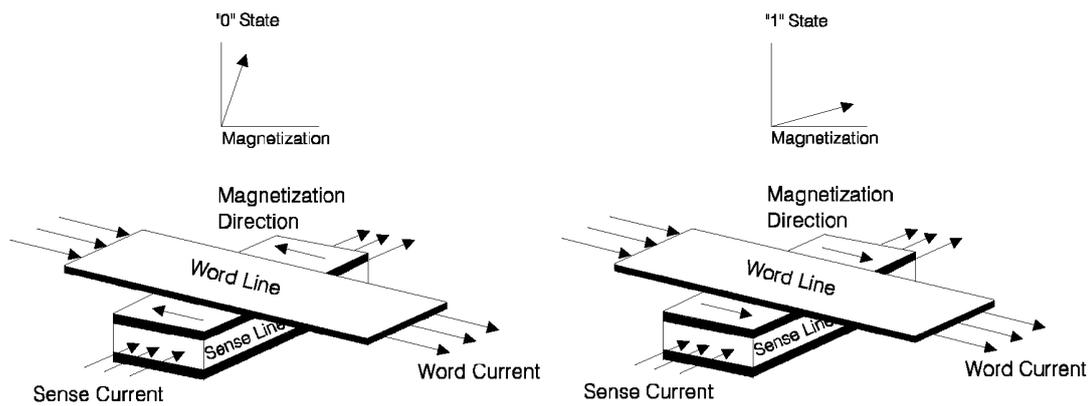


Abbildung 9.30: Frühes Konzept für ein magnetisches Random Access Memory basierend auf dem AMR-Effekt.

Heute werden fast ausschließlich die auf magnetischen Tunnelkontakten beruhenden MRAMs untersucht und entwickelt. Der Schreibvorgang und die Auswahl der Zelle wird wie beim ursprünglichen Ringkernspeicher durch Strompulse über die Zeilen- und Spaltenauswahldrähte erzielt, wie dies in Abb. 9.29 schematisch gezeigt ist. Die Information ist über die Richtung der Magnetisierung in den ferromagnetischen Tunnelelektroden gespeichert. Ein Umschalten der Magnetisierung ist nur dann möglich, wenn gleichzeitig über die Zeilen- und Spaltenauswahldrähte ein Strompuls fließt. Allerdings erfolgt der Leseprozess nicht über einen zusätzlichen Lesedraht wie beim oben gezeigten Ringkernspeicher, sondern magnetoresistiv über das zwischen Zeilen- und Spaltenauswahldräht liegende Tunnelelement. Wie weiter unten näher diskutiert wird, kann die in Abb. 9.29 gezeigte sehr einfache Struktur aus technischen Gründen nicht verwendet werden.

9.3.2 MRAM basierend auf AMR und GMR

Mitte der 80er Jahre wurde von der Firma Honeywell ein MRAM-Konzept entwickelt, das mit den heutigen Versionen bereits einige Gemeinsamkeiten besitzt:

- Schreiben unter Benutzung der magnetischen Hysterese
- Lesen unter Benutzung desselben Elements, in dem die Daten gespeichert sind, und
- Speicherzellen, die auf einem Chip integriert sind.

Abb. 9.30 illustriert, wie in einer solchen MRAM-Zelle Daten gespeichert werden können. Die Zelle besteht aus zwei ferromagnetischen Filmen (z.B. NiFe), die durch ein nicht-magnetisches Metall mit schlechter elektrischer Leitfähigkeit (z.B. TaN) getrennt sind. Die einander gegenüberliegenden ferromagnetischen Filme werden in Streifen strukturiert. Ein Strom durch den Streifen magnetisiert die ferromagnetische Schicht je nach Stromrichtung im oder gegen den Uhrzeigersinn, wenn gleichzeitig ein Strom durch den dazu senkrechten Streifen fließt. Fließt ein Strom nur in einem Streifen, so wird die vorhandene Magnetisierungsrichtung und damit der Speicherzustand nicht geändert. Dadurch kann eine einzelne Speicherzelle in einem zweidimensionalen Array selektiv beschrieben werden.

Der Auslesevorgang für diese Zelle beruht auf der Widerstandsänderung der Zelle, die erhalten wird, wenn ein Meßstrom durch sie geschickt wird. Da der Meßstrom ein magnetisches

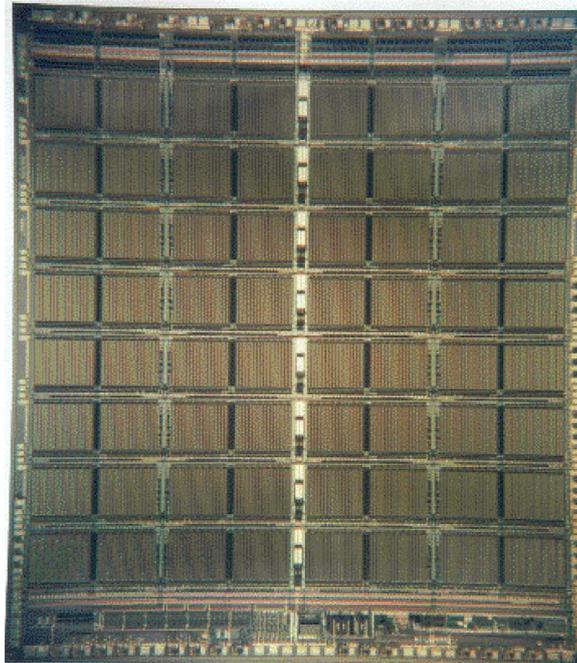


Abbildung 9.31: 256 kbit MRAM Chip (Quelle: Honeywell Inc.)

Feld erzeugt, das z.B. für eine gespeicherte "0" entgegengesetzt zur Magnetisierung, für eine gespeicherte "1" dagegen parallel zur Magnetisierung ist, erhält man eine unterschiedliche Winkeländerung für die Magnetisierungsrichtung. Das benutzte magnetische Material hatte einen anisotropen Magnetwiderstandseffekt von etwa 2%, die erhaltene Widerstandsänderung betrug aber nur etwa 0.5%. Mit praktikablen Meßströmen wurden Spannungssignale im Bereich von 1 mV erhalten. Damit konnten integrierte 16 kbit MRAM Chips realisiert werden, die eine Zugriffszeit von 250 nsec besaßen.¹⁷ Die Schreibzeiten lagen bei nur 100 nsec. Ein Bild eines solchen Speichers in Abb. 9.31 gezeigt.

Die Entdeckung des Riesenmagnetowiderstandseffekts im Jahr 1989 gab Anlass zur Hoffnung auf größere Signalhübe und schneller Zugriffszeiten. Im Jahr 1991 wurden für ferromagnetische Schichten, die durch eine dünne Cu-Schicht gekoppelt waren, ein GMR-Effekt von 6% erreicht. Die magnetische Konfiguration des Schichtsystems passt zu der oben diskutierten Speicherzelle mit nur wenigen Modifikationen. Da die Lese-Zugriffszeit üblicherweise etwa mit dem Quadrat des Signalhubes ansteigt, erwartete man, dass eine Verbesserung im MR-Effekt um einen Faktor 3 eine Verbesserung der Zugriffszeit um den Faktor 9 ergeben würde. In der Tat wurden Zugriffszeiten unter 50 nsec für MRAMs auf der Basis von GMR-Materialien erreicht.¹⁸ Allerdings hatte das Zellenkonzept auch mit GMR-Materialien erhebliche Einschränkungen. Die Signalamplitude war immer noch klein und vor allem hatten die konkurrierenden, wohletablierten Halbleiterspeicherelemente kürzere Zugriffszeiten. Außerdem gab es eine untere Grenze für die Verkleinerung der Zellengröße. Aus physikalischen Gründen (starkes Pinning der Magnetisierung entlang des Streifen) arbeitet die Speicherzelle nicht für Linienbreiten unterhalb von 1 μm .

¹⁷A. Pohm, C. Comstock, A. Hurst, J. Appl. Phys. 67, 4881 (1990).

¹⁸G. Panning, D. Erstad, W. Heikkila, A. Hurst, H. Kaakani, 1999 GOMAC Conference, Monterey, USA (1999).

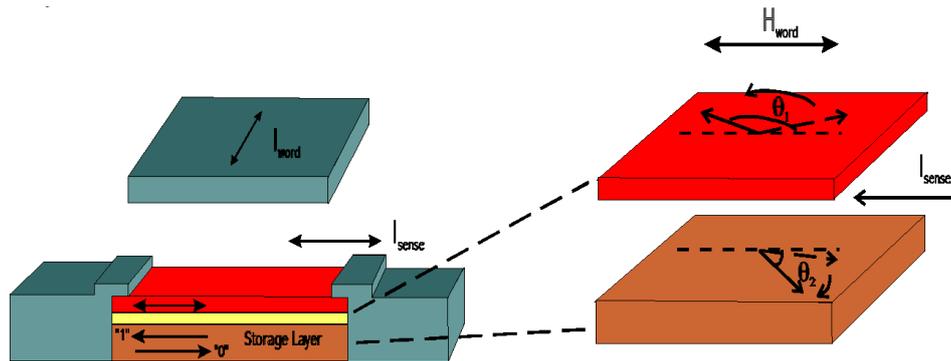


Abbildung 9.32: Schematische Darstellung einer MRAM-Speicherzelle basierend auf einem Spinventil.

9.3.3 MRAM basierend auf Spinventilen

Mit der Erfindung der Spinventil-Zelle wurden die Signalhübe und damit die Zugriffszeiten von MRAMs weiter verbessert, wobei die erreichbaren Dichten mit denen anderer festkörperbasierter Speicherbausteine konkurrieren konnten.¹⁹ Abb. 9.32 zeigt schematisch die Struktur einer Spinventil-Zelle. Sie besteht aus zwei ferromagnetischen Schichten mit unterschiedlichen Koerzitivfeldern, so dass eine Schicht bei einem kleineren Feld (weiche Schicht) schaltet als die andere (harte Schicht). Dies kann z.B. durch unterschiedliche Schichtdicken bei gleichem Material erreicht werden. Der Widerstand ist niedrig für parallele und hoch für antiparallele Magnetisierungsorientierung. Die weiche Schicht dient zum Auslesen des Speicherzustands, der in Form der Magnetisierungsrichtung der harten Schicht vorliegt. Ohne die harte Schicht umzuschalten, kann die Magnetisierungsrichtung des weichen Films parallel oder antiparallel zu der des harten Films gedreht werden. Mit einer Sequenz von mit der Wortleitung erzeugten Feldern kann der Speicherzustand bestimmt werden. Startet man z.B. mit einem negativen Feld und vergrößert das Feld sukzessive zu positiven Werten, so nimmt der Widerstand zu oder ab, je nachdem ob in der harten Schicht eine "0" oder eine "1" eingepreßt ist. Auf diese Weise kann der Speicherinhalt eindeutig bestimmt werden.

Spinventil-Speicherzellen können mit lateralen Abmessungen bis herunter zu etwa $0.2 \mu\text{m}$ realisiert werden.²⁰ Dabei kann eine zweidimensionale Speicherorganisation verwendet werden. Allerdings sind die Ströme (Magnetfelder), die zum Schalten der harten Schicht benötigt werden, heute noch zu hoch, um eine sehr hohe Integrationsdichte zu erlauben (Stromtragfähigkeit der metallischen Leitungen, Heizeffekte). Dieser Speichertyp stellt daher keine Konkurrenz für DRAMs dar, kann aber eventuell EEPROMs oder Flash-Speicher ersetzen, wenn es auf hohe Speicherdichte und schnelles Schreiben ankommt.

9.3.4 MRAM basierend auf magnetischen Tunnelkontakten

Wie bereits in Kapitel 7 diskutiert, können magnetische Tunnelkontakte (MTJ: magnetic tunnel junction) einen größeren magnetoresistiven Effekt als Spinventile bieten. TMR-Werte oberhalb von 40% wurden bereits berichtet.²¹ Die Ähnlichkeiten bezüglich der relevanten physikalischen Eigenschaften von Spinventilen (mit nicht-magnetischen metallischen Zwischenschichten) und magnetischen Tunnelkontakten (mit nicht-magnetischen isolierenden Zwi-

¹⁹A. Pohm, B. Everitt, R. Beech, J. Daughton, IEEE Trans. Magn. **33**, 3280 (1997).

²⁰B. Everitt, A. Pohm, R. Beech, A. Fink, J. Daughton, IEEE Trans. Magn. **34**, 1060 (1998).

²¹siehe z.B. S. Parkin, Proceedings of INTERMAG 1999, Kyongju, Korea (1999).

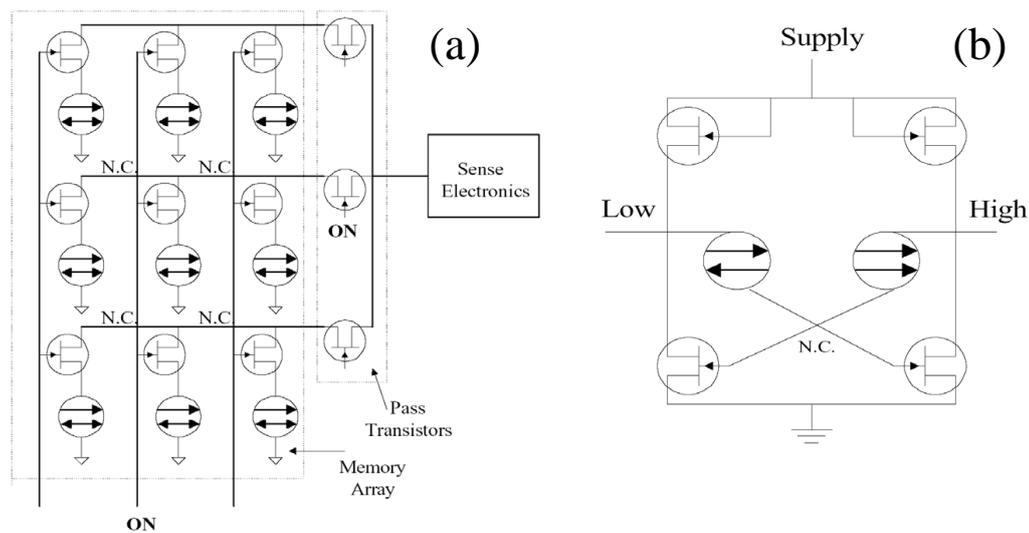


Abbildung 9.33: (a) 3x3 Array einer MTJ-Speicherzelle. (b) Statische RAM-Zelle basierend auf MTJs.

schenschichten) lassen vermuten, dass MTJ-Speicherzellen in ähnlicher Weise aufgebaut werden können wie Spinventil-Zellen. Dies stimmt mit einigen Einschränkungen. Zum einen ist der Widerstand von sehr kleinen MTJs meist sehr hoch (typischerweise einige $k\Omega$ bei einer Fläche von $1 \mu\text{m}^2$). Andererseits führen Spannungen von mehr als etwa 1-2 V zu elektrischen Durchschlägen in der isolierenden Tunnelbarriere und damit zu einer Zerstörung von MTJs. Dadurch können keine Ströme oberhalb von etwa 1 mA verwendet werden. Daraus folgt, dass die Ströme, die zum Auslesen der Zelle verwendet werden, keinen großen Beitrag zum Umschalten der Zelle liefern können. Dies macht unter Umständen zusätzliche Kontakte notwendig, was wiederum die erreichbare Speicherdichte limitiert.

Obwohl die hohen Kontaktwiderstände von MTJs prinzipiell auch die intrinsische Geschwindigkeit über RC -Zeitkonstanten limitieren können, haben kürzliche Untersuchungen an relativ niederohmigen MTJ gezeigt, dass dieses Problem gelöst werden kann. Die typische Signalamplitude von MTJ-Zellen sollte im Bereich von 30 bis 40 mV liegen. Dieser Spannungspegel ist ähnlich zu dem von Halbleiter-Speicherzellen. Man erwartet deshalb ähnliche Werte für die Geschwindigkeit von MTJ-Zellen. Abb. 9.33 zeigt MTJ-Speicherzellenelemente in einer DRAM-artigen und einer flip-flop-artigen Zellenkonfiguration. Hier werden bereits zusätzliche Transistoren zur Ansteuerung verwendet, deren Notwendigkeit weiter unten noch diskutiert wird. In Abb. 9.34 ist zum Vergleich die Ansteuerung einer DRAM-Speicherzelle gezeigt, die von der Struktur her der oben für das 3x3 Array gezeigten Ansteuerung entspricht.

Mehrere große Firmen (u.a. Motorola, Honeywell, IBM/Infineon) haben zur Zeit umfangreiche Forschungsprogramme zur Entwicklung von MRAMs basierend auf MTJs. In der Entwicklungsabteilung von Motorola laufen bereits MRAMs von 256 kBit Größe (Stand Anfang 2001). Erste Muster fertiger Chips werden aber frühestens bis 2003 erwartet, die Serienproduktion soll 2004 beginnen. Bei dem von Motorola verwendeten Design handelt es sich um einen 256 kBit Baustein, bei dem jede einzelne Speicherzelle aus einem Transistor (1T) und einem MTJ besteht. Der Schreib-/Lesezyklus liegt unterhalb von 50 nsec. Organisiert ist der Chip in Untereinheiten von 16 Bänken mit je 16 kBit. Bei einer Spannung von 3 Volt verbraucht der 256 Kbit MRAM-Chip nur 24 mWatt.

Es ist insgesamt klar, dass MRAMs das Potenzial für einen Speicher haben, der genauso dicht und schnell ist wie DRAM und zusätzlich den Vorteil der Nicht-Flüchtigkeit hat. Im Vergleich

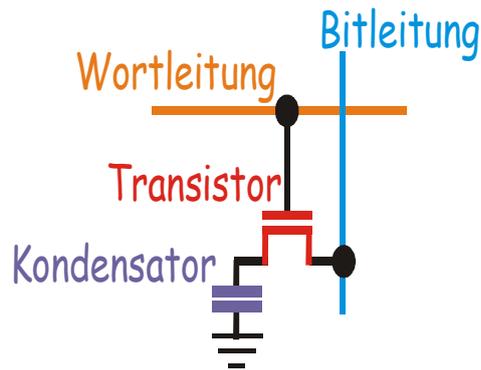


Abbildung 9.34: Elementare Zelle eines Dynamic Random Access Memories (DRAM).

Tabelle 9.5: Speichertechnologien im Vergleich mit MRAMs basierend auf magnetischen Tunnelkontakten (Quelle: Robert Sietmann, C'T 6/1999).

	DRAM	EEPROM	Flash	FeRAM	MRAM
Lesezyklen	$> 10^{15}$	$> 10^{15}$	$> 10^{15}$	$10^{12} - 10^{15}$	$> 10^{15}$
Schreibzyklen	$> 10^{15}$	$10^4 - 10^6$	$10^5 - 10^6$	$10^{10} - 10^{15}$	$> 10^{15}$
Schreibspannung	2.5 - 5 V	12 - 18 V	10 - 18 V	0.8 - 5 V	—
Schreibzeit	\sim ns	1 - 10 ms	1 μ s - 1 ms	\sim ns	\sim ns
Zugriffszeit	40 - 70 ns	40 - 70 ns	40 - 70 ns	40 - 70 ns	40 - 70 ns
Zellfläche	$8f^2$	$40f^2$	$8 - 12f^2$	$9 - 13f^2$	$4f^2$
Fläche für $f=0.25\mu\text{m}$	$0.5 \mu\text{m}^2$	$2.5 \mu\text{m}^2$	$0.5 - 0.7 \mu\text{m}^2$	$0.6 - 0.8 \mu\text{m}^2$	$0.25 \mu\text{m}^2$
Datenhaltung	flüchtig	> 10 Jahre	> 10 Jahre	> 10 Jahre	> 10 Jahre
Leistungsaufnahme	1x	1 - 1.5x	1 - 1.5x	0.5 - 1x	0.5 - 1x

mit Flash-Speichern und EEPROMs besitzen MRAMs eine höhere Schreibgeschwindigkeit und es gibt keine Anzeichen dafür, dass eine Limitierung der Schreibzyklen besteht. Ferroelektrische RAMs (FeRAMs) sind wie MRAMs nicht-flüchtig und besitzen eine hohe Schreibgeschwindigkeit. Für FeRAMs gibt es zur Zeit bereits Nischenanwendungen. FeRAM ist sicherlich ein wichtiger Konkurrent zu MRAM, auf den vor allem japanische und koreanische Firmen setzen und in diesem Bereich einen mehrjährigen Entwicklungsvorsprung besitzen (Stand: Anfang 2001). Es wird allerdings erwartet, dass MRAM dichter und damit billiger hergestellt werden kann. In Tabelle 9.5 ist ein Vergleich der wichtigsten Parameter von verschiedenen Speicherkonzepten (Stand Mitte 1999) gegeben.

9.3.5 Ansteuerkonzepte für MRAMs

Eine wichtige Hürde bei der Herstellung von MRAMs ist mit der Methode für die Auswahl der Zelle beim Schreibprozess verknüpft. Bei der in Abb. 9.27 gezeigten Methode müssen zwei orthogonale Ströme in Koinzidenz sein, um einen Schreibprozess zu erzeugen. Jeder Strom für sich allein muss klein genug sein, um die gespeicherten Daten nicht zu beeinflussen. Diese *zweidimensionale Auswahlmethode* stellt hohe Anforderungen an die Homogenität des Speicherzellen-Arrays. Falls man einen sehr hohen Summenstrom verwendet, um auch noch einen sicheren Schreibvorgang der unempfindlichsten Zellen zu gewährleisten, läuft man Gefahr, dass einer der beiden Teilströme bereits ausreicht, um die empfindlichsten Zellen bereits

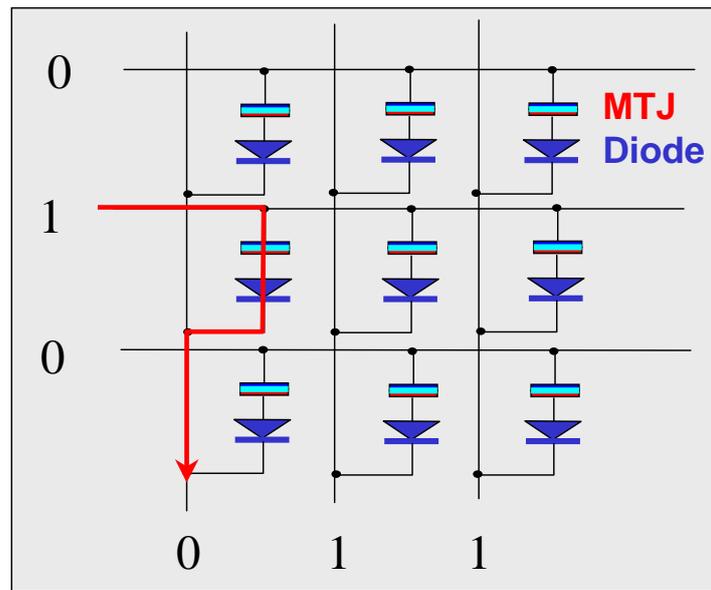


Abbildung 9.35: MRAM Speicherzellen-Array mit zusätzlichen Dioden zur Vermeidung von Störeffekten beim Lesevorgang.

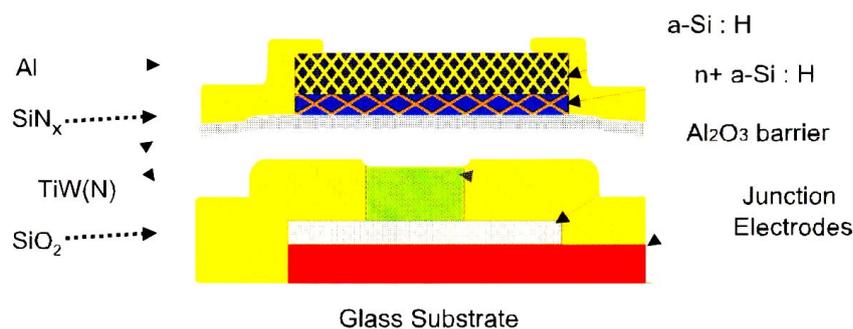


Abbildung 9.36: Vertikale Integration eines magnetischen Tunnelkontakts mit einer amorphen Si-Diode (Quelle: P. P. Freitas, in *Spin Electronics*, M. Ziese and M. J. Thornton eds., Springer Berlin (2001)).

zu stören. Man sieht daraus, dass die Anforderungen an die Homogenität der Zellen und die Toleranzen bei der Herstellung für die zweidimensionale Auswahlmethode hoch werden. Viele ursprünglichen Konzepte für magnetische RAMs benutzten ein 2D Auswahlschema für das Lesen der Daten.

Neuere MRAMs basieren auf MTJs benutzen Schemata, in denen Dioden oder ein/aus Transistoren für die Auswahl der Zelle beim Lesevorgang eingesetzt werden.²² Ein solches Auswahlschema ist in Abb. 9.35 für ein Array gezeigt, in dem Dioden eingesetzt werden. Aufgrund der Sperrrichtung der Dioden kann der Strom nur von "1" nach "0" fließen. Man sieht, dass man immer eine Situation einstellen kann, in der der Strom genau über eine MTJ fließt und alle anderen nicht beeinflusst. Es darf nur die auszuwählende Zeile eine "1" (alle anderen eine "0") sehen, bei den Spalten ist es genau umgekehrt.

Herstellungstechnisch wird im einfachsten Fall eine Diode in Reihe mit einem MTJ geschaltet. Ein entsprechender Schichtaufbau ist schematisch in in Abb. 9.36 für eine MTJ mit einer

²²siehe z.B. S. Tehrani et al., J. Appl. Phys. **85**, 5822 (1999); R. Scheuerlein, B. Gallagher, Proceedings of MMM 1999 (1999); S.S.P. Parkin et al., J. Appl. Phys. **85**, 5828 (1999); J. Daughton, J. Appl. Phys. **81**, 3758 (1997).

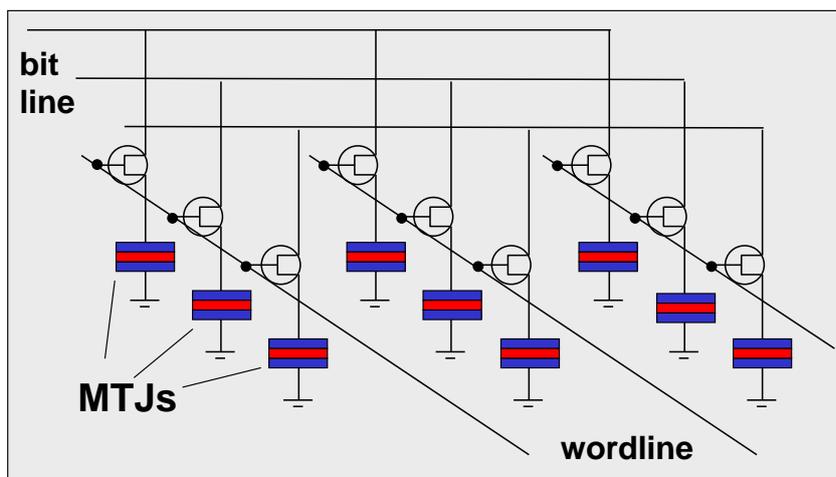


Abbildung 9.37: Eindimensionales magnetisches Auswahlschema (Lesen und Schreiben) für magnetoresistive Speicherzellen.

amorphen Si-Diode gezeigt. Für ein solches Bauelement wurden Änderungen des Stromes von bis zu 20% beim Schalten der freien Schicht erhalten. Das Problem bei dieser Konfiguration ist der hohe Widerstand der Dioden bei der erforderlichen niedrigen Arbeitsspannung von typischerweise unter 1 V. Eine Verringerung des Diodenwiderstands kann zwar prinzipiell immer durch eine Vergrößerung der Diodenfläche erreicht werden, dies ist aber für hochdichte Speicher nicht sinnvoll. Für hochdichte Speicher werden deshalb wohl Transistoren verwendet werden müssen.

Man hat, wie in Abb. 9.35 gezeigt, durch die Verwendung von Dioden oder Transistoren keine Probleme beim Lesen, es gibt aber immer noch Einschränkungen durch die 2D Auswahl beim Schreiben. Um Selektivität auch beim Schreibprozess zu erhalten gibt es mehrere Möglichkeiten. Zum einen können vergrabene Drähte verwendet werden, mit denen zwei orthogonale Felder an jeder MTJ erzeugt werden können, mit deren Hilfe die freie Schicht umgeschaltet werden kann.²³ Einen anderen Ausweg bieten eindimensionale Auswahlmethoden. Dabei benutzt man einen Transistor pro Zelle für die Zellenwahl beim Schreibprozess. Dies reduziert die oben genannten Anforderungen und erlaubt die Benutzung kleinerer Ströme. Abb. 9.37 zeigt ein einfaches 1D-Auswahlschema für den Lese- und Schreibvorgang in einer magnetischen Speicherzelle. Ein hoher Strom beider Polarität (positive Stromrichtung für eine "1" und negative Stromrichtung für eine "0") wird durch den Auswahltransistor und die Speicherzelle geschickt, um zu schreiben. Ein niedriger Strom wird verwendet, um eine Spannung über die Zelle zu erzeugen. Diese Spannung wird je nach eingeschriebener Information hoch oder niedrig sein, diese Spannung wird detektiert und mit einem Referenzwert verglichen, um den Inhalt der Speicherzelle zu bestimmen. Entscheidend ist, dass der Transistor die Auswahl der Zelle macht und nicht die 2D Schalteigenschaften der Zelle. Es kann ein sehr großer Strom zum Schreiben und ein kleiner zum Lesen verwendet werden, um so vorhandene Parameterfluktuationen zu kompensieren. Natürlich sollte der Schreibstrom insgesamt möglichst klein gehalten werden, um die Größe des Transistors klein zu halten. Es sei darauf hingewiesen, dass nach wie vor ein 2D-Array von Speicherzellen vorhanden ist, dass aber der Transistor die Last der Zellenauswahl trägt. Deshalb wird die Konfiguration auch als eindimensionale magnetische Selektion bezeichnet. Dieses Schema ist ähnlich zu dem in DRAMs verwendeten Verfahren, wo ein Transistor dazu benutzt wird, die Ladung auf einen Kondensator zu schrei-

²³R. C. Sousa et al., J. Appl. Phys. **87**, 6387 (2000).

ben bzw. von diesem auszulesen.

Bezüglich der Herstellungstechnik von MRAMs basierend auf MTJs sind vor allem folgende Aspekte/Probleme wichtig. Da die RC -Zeitkonstante der MTJs die obere Grenze für die Geschwindigkeit setzt, mit der auf ein Datenbit zugegriffen werden kann, sollte der Kontaktwiderstand möglichst klein sein. Es kann ganz grob abgeschätzt werden, dass man bei einer Fläche von $1 \mu\text{m}^2$ und einer Zeitkonstante von 1 nsec einen Tunnelwiderstand im Bereich von etwa $10 \text{ k}\Omega$ benötigt.²⁴ Man hat mittlerweile mit Al_2O_3 -Barrieren Flächenwiderstände von RA bis herunter zu $100 \Omega\mu\text{m}^2$ erreichen können. Allerdings stellt man häufig fest, dass mit abnehmender Barrierendicke auch die TMR-Werte absinken. Die Anforderungen an den Herstellungsprozess sind hier sehr groß. Ein zweites Problem betrifft die Kompatibilität des Herstellungsprozesses der MTJs mit der CMOS-Technologie, die notwendig ist, wenn man Dioden oder Transistoren integrieren will. Heute stellt man MTJs auf planarisierten CMOS Wafern her, die bereits die Transistoren und Dioden sowie die Word-Linien enthalten. Danach ist ein so genannter "backend" Metallisierungsschritt notwendig, um die MTJs in der Matrix zu verbinden. Die übliche backend-Technologie für Metallisierung erfordert Temperaturen bis zu $400\text{-}450^\circ\text{C}$. Deshalb sollten die MTJs auch diese hohen Temperaturen ohne Schaden überstehen. Dies ist leider nicht der Fall. Oberhalb von Temperaturen von 300°C nimmt der TMR-Effekt meist sehr stark ab.

²⁴Es ist hierbei wichtig, dass sich die Kapazität eines Tunnelkontakts linear mit der Barrierendicke, der Widerstand dagegen exponentiell mit der Barrierendicke ändert. Deshalb muss man zu sehr kleinen Dicken der Oxidbarriere gehen.

Teil VI

Quanten-Spinelektronik

Teil VII

Appendix

