

---

# 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

<b>Vorwort</b>	<b>9</b>
<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>I Grundlagen</b>	<b>9</b>
<b>1 Grundbegriffe und Messmethoden</b>	<b>11</b>
1.1 Grundbegriffe des Magnetismus . . . . .	12
1.2 Messmethoden . . . . .	13
<b>2 Spinabhängiger Transport</b>	<b>15</b>
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
<b>II</b>	<b>Magnetoresistive Effekte</b>	<b>83</b>
<b>3</b>	<b>AMR-Effekt</b>	<b>85</b>
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
<b>4</b>	<b>CMR-Effekt</b>	<b>95</b>
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 . . . . .	117
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
<b>5</b>	<b>GMR-Effekt</b>	<b>137</b>
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
<b>6</b>	<b>Spinventile</b>	<b>169</b>
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
<b>7</b>	<b>TMR-Effekt</b>	<b>195</b>
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	Elastisches Tunneln durch eine eindimensionale rechteckförmige Barriere – zeitabhängiger Ansatz . . . . .	202
7.1.3	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	Tunneln unter Berücksichtigung des Bildpotenzials . . . . .	208
7.1.6	Bandstruktureffekte beim elastischen Tunneln . . . . .	209
7.1.7	Resonantes Tunneln . . . . .	210
7.2	NIN- und NIS-Kontakte . . . . .	213
7.3	Ferromagnet/Isolator/Supraleiter-Kontakte . . . . .	217
7.3.1	Zeemann-Aufspaltung der Quasiteilchen-Zustandsdichte in Supraleitern	217
7.3.2	Zustandsdichte und Spinpolarisation in Ferromagneten . . . . .	219
7.4	FM/S-Kontakte – Andreev-Reflexion . . . . .	227
7.4.1	Andreev-Streuung an Metall/Supraleiter-Grenzflächen . . . . .	227
7.4.2	Andreev-Streuung an Ferromagnet/Supraleiter-Grenzflächen . . . . .	234
7.5	FM/I/FM-Tunnelkontakte . . . . .	239
7.5.1	Jullière – Modell . . . . .	241
7.5.2	Weiterentwicklungen des Jullière-Modells . . . . .	242
7.6	Experimente zu FM/I/FM-Tunnelkontakten . . . . .	249
7.6.1	Untersuchung und Verbesserung der Barriereneigenschaften . . . . .	251
7.6.2	Temperatur- und Spannungsabhängigkeit des JMR . . . . .	253
7.6.3	Dotierung der Tunnelbarriere . . . . .	256
7.6.4	FM/I/FM Tunnelkontakte mit nichtmagnetischen Zwischenschichten . .	258
7.6.5	Grenzflächeneffekte und Vorzeichen der Spinpolarisation . . . . .	259
7.6.6	Neue Materialsysteme . . . . .	261
7.6.7	Rastertunnelmikroskopie . . . . .	263
7.7	Inelastisches Tunneln . . . . .	266
7.7.1	Inelastisches Tunneln mit Wechselwirkungsprozessen in der Barriere . . .	266
7.7.2	Inelastisches Tunneln mit Wechselwirkungsprozessen in den Tunnelek- troden . . . . .	269
7.7.3	Tunneln über Zwischenzustände – Glazmann-Matveev Modell . . . . .	269
7.8	Tunneln durch ferromagnetische Barrieren – Spinfilter . . . . .	275
7.9	Austauscheffekte an Grenzflächen zu Ferromagneten . . . . .	278
<b>8</b>	<b>EMR- und BMR-Effekt</b>	<b>281</b>

<b>III</b>	<b>Spininjektion und Spintransport</b>	<b>283</b>
<b>IV</b>	<b>Materialien für die Spinelektronik</b>	<b>285</b>
<b>V</b>	<b>Anwendungen</b>	<b>287</b>
<b>9</b>	<b>XMR-Effekte – Anwendungen</b>	<b>289</b>
9.1	Sensoren . . . . .	292
9.1.1	GMR Sensoren . . . . .	295
9.1.2	Anwendungen von GMR-Sensoren . . . . .	301
9.2	Magnetoresistive Leseköpfe . . . . .	306
9.2.1	Design von Lese- und Schreibköpfen . . . . .	308
9.3	Magnetic Random Access Memory – MRAM . . . . .	313
9.3.1	Geschichtlicher Hintergrund . . . . .	313
9.3.2	MRAM basierend auf AMR und GMR . . . . .	316
9.3.3	MRAM basierend auf Spinventilen . . . . .	318
9.3.4	MRAM basierend auf magnetischen Tunnelkontakten . . . . .	318
9.3.5	Ansteuerkonzepte für MRAMs . . . . .	320
<b>VI</b>	<b>Quanten-Spinelektronik</b>	<b>325</b>
<b>VII</b>	<b>Appendix</b>	<b>327</b>
A	Literatur . . . . .	329
B	SI-Einheiten . . . . .	330
B.1	Geschichte des SI Systems . . . . .	330
B.2	Die SI Basiseinheiten . . . . .	332
B.3	Einige von den SI Einheiten abgeleitete Einheiten . . . . .	333
B.4	Vorsätze . . . . .	335
B.5	Abgeleitete Einheiten und Umrechnungsfaktoren . . . . .	336
C	Physikalische Konstanten . . . . .	340

**Teil I**

**Grundlagen**







## **Teil II**

# **Magnetoresistive Effekte**





## **Teil III**

# **Spininjektion und Spintransport**



## **Teil IV**

# **Materialien für die Spinelektronik**





**Teil V**

**Anwendungen**





## **Teil VI**

# **Quanten-Spinelektronik**



**Teil VII**

**Appendix**





## A Literatur

1. *Introduction to Solid State Physics*, Charles Kittel, John Wiley & Sons, New York (1996).
2. *Solid State Physics*, N. W. Ashcroft, N. D. Mermin, CBS Publishing Asia Ltd. (1976)
3. *Fundamentals of the Theory of Metals*, A.A. Abrikosov, North-Holland, Amsterdam (1988).
4. *Electrons and Phonons*, edited by J. M. Ziman, Clarendon Press, London (1963).
5. *Prinzipien der Festkörpertheorie*, J. M. Ziman, Verlag Harry Deutsch, Zürich (1975).
6. *Festkörpertheorie*, O. Madelung, Springer Verlag, Berlin (1972).
7. *Magnetoresistance in Metals*, edited by A. B. Pippard, Cambridge University Press, Cambridge (1989).
8. *Electronic Properties of Metals and Alloys*, A. Dugdale, Edward Arnold Publishers, London (1982).
9. *Magnetische Schichtsysteme*, 30. Ferienkurs des Instituts für Festkörperforschung, FZ-Jülich GmbH, Schriften des Forschungszentrums Jülich (1999).
10. *Transport Properties of Ferromagnetic Metals*, Ferromagnets Materials Vol. 3, I. A. Campbell, A. Fert editors, North Holland Publishers (1982).
11. *Physics of Ferromagnetism*, S. Chikazumi, Clarendon Press, Oxford (1997).
12. *Ferromagnetic Materials*, E. P. Wohlfarth ed., North Holland Publ. Comp., Amsterdam (1980).
13. *Modern Magnetic Materials – Principles and Applications*, Robert C. O’Handley, John Wiley & Sons, Inc., New York (1999).
14. *Principles of Electron Tunneling Spectroscopy*, E. L. Wolf, Oxford Science Publications, Oxford University Press, New York (1989).
15. *Spin Electronis*, M. Ziese and M. J. Thornton eds., Springer Berlin (2001).
16. *Semiconductor Spintronics and Quantum Computation*, D.D. Awschalom, D. Loss, N. Samarth eds., Springer Verlag, Berlin (2002).
17. *Magnetic Multilayers and Giant Magnetoresistance*, U. Hartmann ed., Springer Berlin (2000).