

---

# 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>Magneto-resistive 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 . . . . .	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
<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	Vertiefungsthema: Elastisches Tunneln durch eine eindimensionale rechteckförmige Barriere – zeitabhängiger Ansatz . . . . .	202
7.1.3	Vertiefungsthema: Elastisches Tunneln durch eine eindimensionale Barriere beliebiger Form – WKB-Näherung . . . . .	203

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

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

**Teil I**

**Grundlagen**



# Kapitel 1

## Grundbegriffe und Messmethoden

In diesem Kapitel werden zunächst wichtige Grundbegriffe und einige für das Verständnis des Magnetismus relevanten Konzepte eingeführt. Danach werden verschiedene Messmethoden zur Charakterisierung der magnetischen Eigenschaften von Materialien vorgestellt.

## 1.1 Grundbegriffe des Magnetismus

## 1.2 Messmethoden



## **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**

