

III. Physikalisches Institut B

Skript zur Vorlesung

Experimentalphysik II

(Elektromagnetismus)

Für Physiker und
Lehramtskandidaten

Gehalten von
Prof. Dr. G. Flügge
im SS 2001

Inhaltsverzeichnis

1	Elektrische Ladungen und Felder	1
1.1	Elektrische Ladungen	1
1.1.1	Positive und negative Ladungen	1
1.1.2	Ladungstrennung	3
1.1.3	Leiter und Isolatoren	4
1.1.4	Ladungsmessung	5
1.1.5	Ladungsverteilung in elektrischen Leitern	6
1.1.6	Die Influenz	8
1.1.7	Halbieren von Ladungsmengen	8
1.1.8	Ladungserhaltung	9
1.1.9	Elementarladung	11
1.1.10	Erzeugung hoher Ladungsmengen	13
1.2	Das COULOMBSche Gesetz	14
1.2.1	Die $1/r^2$ - Abhängigkeit	14
1.2.2	Experimentelle Überprüfung des COULOMBSchen Gesetzes	16
1.2.3	Dimension der Ladung	17
1.2.4	Vektorielle Schreibweise und Superposition	19
1.2.5	Vergleich von COULOMB- und Gravitationskraft	21
1.3	Das elektrische Feld	22
1.3.1	Das elektrische Feld	22
1.3.2	Beschreibung des elektrischen Feldes	24
1.3.3	Das homogene Feld	28
1.3.4	Beliebiges elektrisches Feld	30
1.4	Potenzielle Energie, elektrostatisches Potenzial und Spannung	31
1.4.1	Potenzial und Spannung	31
1.4.2	Potenzial einer Punktladung	35
1.4.3	Homogenes Feld eines Plattenkondensators	38
1.5	Potenzial einer beliebigen Ladungsverteilung	40
1.5.1	Der elektrische Dipol	40
1.5.2	Kontinuierliche Ladungsverteilung	41
1.6	Berechnung der Feldstärke aus dem Potenzial	43

1.7	Anwendung homogener elektrischer Felder	45
1.7.1	Der Dipol im homogenen Feld	45
1.7.2	Der Versuch von MILLIKAN zur Bestimmung der Elementarladung	48
1.7.3	Die BRAUNsche Röhre	50
1.8	Der elektrische Fluss und der Satz von GAUSS	51
1.8.1	Elektrischer Kraftfluss einer Punktladung	52
1.8.2	Kraftfluss durch eine beliebige geschlossene Fläche	53
1.8.3	Was folgt für elektrische Leiter aus dem GAUSSschen Satz?	59
1.8.4	Beweisskizze für den mathematischen Satz von GAUSS	61
2	Elektrostatik mit Leitern und Isolatoren	65
2.1	Leiter und Isolatoren	65
2.2	Leiter im elektrischen Feld und Influenz	65
2.2.1	Feld an einer Leiteroberfläche	66
2.3	Allgemeines elektrostatisches Problem	68
2.4	Elektrisches Feld einer geladenen Kugel	70
2.5	Definition der Kapazität	71
2.6	Kondensatoren	72
2.6.1	Der Plattenkondensator	72
2.6.2	Der Kugelkondensator	74
2.6.3	Der Zylinderkondensator	75
2.6.4	Schaltung von Kondensatoren	76
2.7	Energie des elektrischen Feldes	78
2.8	Isolatoren im elektrischen Feld	80
2.8.1	Zusammenhang von \vec{E} und \vec{D}	84
2.8.2	Polarisationseffekte	85
2.8.3	Energiedichte im Dielektrikum	89
3	Elektrische Stromstärke	91
3.1	Der elektrische Strom	91
3.2	Mechanismen der Stromleitung	92
3.3	Allgemeine Form des Ladungstransportes	94
3.4	Widerstand	95
3.4.1	Widerstand eines Metalldrahtes	96
3.5	Temperaturabhängigkeit von R	98
3.5.1	Zusammenhang zwischen elektrischer Leitfähigkeit und Wärmeleitfähigkeit	99
3.5.2	Supraleitung	100
3.5.3	Technische Widerstände	102
3.6	Stromkreise	103
3.6.1	Die KIRCHHOFFSchen Gesetze	103

3.6.2	Innenwiderstand	108
3.6.3	Strommessung	109
3.6.4	Spannungsmessung	109
3.6.5	Vorwiderstand und Potenziometerschaltung	111
3.6.6	Widerstandmessung	112
3.7	Beispiel für einen nicht stationären Vorgang: der RC- Kreis	113
3.7.1	Der Ladevorgang	113
3.7.2	Der Entladevorgang	114
3.8	Leitung in Flüssigkeiten	115
3.8.1	Elektrolytische Leitfähigkeit	115
3.8.2	GALVANISCHE Elemente	120
3.9	Leitung in Metallen	123
3.10	Leitung in Halbleitern	125
3.10.1	p,n- Halbleiter	125
3.10.2	Der pn- Übergang	128
3.10.3	Die Halbleiterdiode	129
3.10.4	Der Transistor	130
3.11	Ladungstransport im Hochvakuum	133
3.11.1	Glühemission	135
3.11.2	Photoemission	137
3.11.3	Sekundärelektronenemission	137
3.12	Leitung in Gasen	138
3.12.1	Die Gasentladung	138
3.12.2	Plasmaströme	143
4	Magnetostatik	145
4.1	Einleitung	145
4.1.1	Geschichte des Magnetismus	145
4.1.2	Ähnlichkeiten und Unterschiede zwischen Magnetismus und Elek- trizität	147
4.2	LORENTZ-Kraft	149
4.2.1	Magnetische Flasche	153
4.3	Kräfte auf Strom durchflossene Leiter	156
4.3.1	Feldkonstanten und Maßsysteme	158
4.4	Magnetisches Feld eines Strom durchflossenen Leiters	158
4.4.1	Experimentelle Überprüfung	160
4.4.2	Allgemeiner Zusammenhang zwischen \vec{B} und \vec{I}	162
4.4.3	Magnetfeld einer Spule (schematisch)	163
4.4.4	Das BIOT-SAVARTSche Gesetz	164
4.4.5	Permanentmagnete	168
4.4.6	Zusammenfassung	168

4.5	Relativität elektrischer und magnetischer Kräfte	170
4.6	Der HALL-Effekt	175
4.6.1	Klassischer HALL-Effekt	175
4.6.2	Quanten-HALL-Effekt	178
5	Magnetische Induktion	181
5.1	Experimentelle Tatsachen und deren Deutung	181
5.1.1	Quantitative Herleitung des Induktionsgesetzes	185
5.1.2	Leistungsbilanz der Induktion	187
5.2	Allgemeine Formulierung des Induktionsgesetzes	188
5.3	Differenzielle Schreibweise	190
5.3.1	Die Rotation	191
5.3.2	Satz von STOKES	192
5.4	Gegen- und Selbstinduktion	194
5.4.1	Gegeninduktion	194
5.4.2	Selbstinduktion	196
5.4.3	Ersatzschaltbild	197
5.4.4	Der Transformator	198
5.5	Ein- und Abschaltvorgänge	201
5.6	Wechselstrom	204
5.6.1	Erzeugung von Wechselspannung	205
5.6.2	Wechselstromwiderstände	205
5.7	Kräfte auf Strom durchflossene Leiterschleifen	209
5.7.1	Potenzielle Energie des magnetischen Momentes	211
5.7.2	Der magnetische Dipol im inhomogenen Magnetfeld	211
5.7.3	Drehspulinstrumente	213
6	Materie im Magnetfeld	215
6.1	Experimentelle Beobachtungen	215
6.2	Diamagnetismus und Paramagnetismus	217
6.2.1	Mikroskopische Erklärung	220
6.2.2	Gesamtfeld einer Spule mit Kern	228
6.2.3	\vec{B} - und \vec{H} -Feld eines Permanentmagneten	231
6.2.4	Vergleich zwischen Magnetismus und Elektrizität in Materie	232
6.3	Ferromagnetismus	233
6.3.1	Magnetisierungskurve (Hysteresis)	236
6.4	Temperaturabhängigkeit	237
6.5	Induktivität einer Spule mit Kern	239
6.6	Energie des magnetischen Feldes	239
7	Die MAXWELLSchen Gleichungen	241