RHEINISCH-
WESTFÄLISCHE
TECHNISCHE
HOCHSCHULE
AACHEN

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 Elektrizität . . . 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 $\vec{\mathbf{B}}$ und $\vec{\mathbf{I}}$ . . . 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