

# Kapitel 6

## Materie im Magnetfeld

### 6.1 Experimentelle Beobachtungen

In Kapitel 2 „Elektrostatik mit Leitern und Isolatoren“ (siehe Seiten 65 ff.) haben wir gesehen, dass das elektrische Feld durch die Anwesenheit von Materie stark verändert wird. Dielektrika können das elektrische Feld beträchtlich abschwächen, elektrische Leiter vermögen es sogar komplett abzuschirmen. Diese experimentellen Tatsachen konnten wir uns durch Effekte wie Ladungsverschiebung und Polarisation erklären, die sich auf atomarer Ebene im Festkörperkristall abspielen.

Nun stellt sich die Frage, ob das Magnetfeld ein ähnliches Verhalten in Anwesenheit von Materie zeigt. In den vorangegangenen beiden Kapiteln ist bereits mehrfach erwähnt worden, dass Eisen Magnetfelder verstärken und ihre Feldlinien umlenken kann (siehe „Transformator“ auf Seite 198 ff.). Dieses Phänomen wollen wir nun näher analysieren:

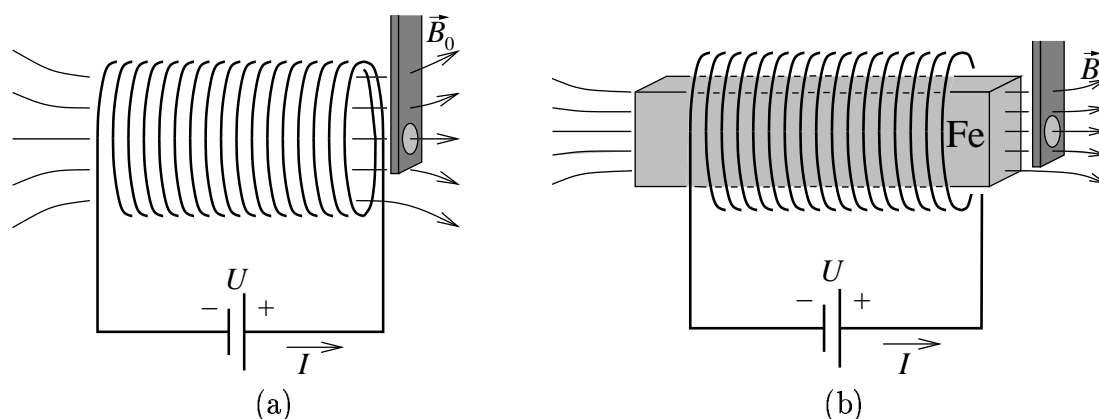


Abbildung 6.1: Das magnetische Feld einer Spule wird unmittelbar an ihrer Öffnung mit einer HALL-Sonde (a) einmal ohne und (b) einmal mit Eisenkern ausgemessen.

## Versuch 6.1

Wir lassen durch eine Zylinderspule einen konstanten Strom  $I$  fließen und messen mit einer HALL-Sonde an den Enden der Spule, so wie in Abb. 6.1 (a) abgebildet, das Magnetfeld  $B_0$ . Wir stellen fest, dass, wie erwartet, die in Abschnitt 4.4.3 hergeleitete Beziehung (4.64)

$$B_0 = \frac{N}{l} \mu_0 I \quad (6.1)$$

das Magnetfeld  $B_0$  innerhalb des Spulenquerschnitts recht gut beschreibt. Wenn wir verschiedene Stromstärken  $I$  durch die Spule fließen lassen, messen wir entsprechend (6.1) verschiedene Werte für  $B_0$ .

Nun schieben wir einen Eisenkern in das Spuleninnere und führen die gleiche Messung durch (siehe Abb. 6.1 (b)). Das Magnetfeld  $B$  an der Stirnfläche des Eisenkerns ist bei gleichem Strom  $I$  um die Größenordnung 1000 größer als das Magnetfeld  $B_0$  ohne Kern. Wir können den Spulenstrom  $I$  stufenweise erhöhen, wobei das Magnetfeld  $B_0$  ebenfalls stufenweise ansteigt. Für kleine Ströme können wir in guter Näherung eine Proportionalität zwischen den Magnetfeldern  $B$  und  $B_0$  feststellen.

Nicht nur Eisen verändert das magnetische Feld, eigentlich alle Stoffe haben einen, wenn auch viel schwächeren Einfluss auf Magnetfelder. Einige Materialien verstärken das Magnetfeld um das hundert- bis tausendfache. Diesen Effekt bezeichnet man als Ferromagnetismus, der in Abschnitt 6.3 (Seite 233) näher besprochen wird. Führen wir Versuch 6.1 für verschiedene Stoffe durch, dann messen wir auch bei diesen eine Abweichung des Magnetfeldes  $B$  gegenüber des Magnetfeldes  $B_0$  der leeren Spule. Bei den meisten Materialien weicht das Magnetfeld  $B$  vom vorgegeben Magnetfeld  $B_0$  allerdings nur geringfügig ab. Dafür gilt hier eine strengere Proportionalität zwischen gemessenem Magnetfeld  $B$  und dem Magnetfeld  $B_0$  mit leerer Spule. Die Proportionalität lässt sich allgemein schreiben als

$$\boxed{B = \mu_r B_0} \quad (6.2)$$

wobei der Proportionalitätsfaktor  $\mu_r$

**relative magnetische  
Permeabilitätszahl, relative  
Permeabilitätszahl oder einfach nur  
relative Permeabilität**

$$\mu_r := \frac{B}{B_0}$$

(6.3)

genannt wird. Die relative magnetische Permeabilitätszahl  $\mu_r$  ist eine dimensionslose Materialkonstante. Nach der Größe der relativen Permeabilität  $\mu_r$  unterscheidet man drei Klassen von Materialien:

- a)  $\mu_r < 1$     **diamagnetische** Materialien     $B < B_0$
- b)  $\mu_r > 1$     **paramagnetische** Materialien     $B > B_0$
- c)  $\mu_r \gg 1$     **ferromagnetische** Materialien     $B \gg B_0$

Man nennt solche Materialien auch kurz Diamagneten, Paramagneten bzw. Ferromagneten. In Versuch 6.1 haben wir gesehen, dass Eisen das Magnetfeld um ganze Größenordnungen verstärken kann, womit wir Eisen den ferromagnetischen Stoffen zuordnen können. Die ferromagnetischen Eigenschaften von Eisen waren sogar schon im Altertum bekannt, weshalb man den Effekt des Ferromagnetismus nach Eisen (= Ferrum) benannte. Wie präzise Messungen gezeigt haben, liegen die relativen Permeabilitätszahlen der verschiedenen Eisensorten zwischen  $\mu_r \approx 600$  für Gusseisen und  $\mu_r \approx 5500$  für gehärtetes Eisen. Die relativen Permeabilitätszahlen von Eisen und anderen ferromagnetischen Materialien sind stark temperaturabhängig und hängen außerdem von der Vorgeschichte des Materials ab, weshalb sie keine festen Materialkonstanten sind. Wir werden darauf im Abschnitt 6.3 noch näher eingehen.

## 6.2 Diamagnetismus und Paramagnetismus

Dia- und paramagnetische Stoffe verursachen nur kleine Abweichungen des Magnetfeldes. Die relativen Permeabilitätszahlen dia- und paramagnetischer Stoffe unterscheiden sich daher in der Regel nur geringfügig von der relativen Permeabilitätszahl  $\mu_{r_{\text{Vakuum}}} = 1$  des Vakuums. Man definiert in Analogie zur dielektrischen Suszeptibilität  $\chi_e = \epsilon_r - 1$  die **magnetische Suszeptibilität**  $\chi_m$  durch

$$\boxed{\chi_m = \mu_r - 1.} \tag{6.4}$$

Hier einige Werte für die magnetischen Suszeptibilitäten  $\chi_m$  dia- und paramagnetischer Stoffe: