Diskussion der Hysterese

Es gilt bekanntlich

$$\vec{B} = \mu_0 \vec{H} + \mu_0 \vec{M} \tag{6.69}$$

Ist der Eisenkern vor dem ersten Anlegen eines H-Feldes nicht magnetisiert worden (d.h. $M = 0$), sind sowohl B- als auch H-Feld zu Beginn gleich null. Unmagnetisierte Ferromagneten werden oft auch als „jungfräulich“ bezeichnet. Mit steigendem H-Feld nimmt auch die Magnetisierung M und damit auch das Magnetfeld B zu, da die WEISSschen Bezirke nach und nach ausgerichtet werden. Sind schließlich alle WEISSschen Bezirke ausgerichtet, ist eine Sättigungsmagnetisierung M_S erreicht. Dannach steigt das Magnetfeld B linear zur H-Feldstärke an mit

$$B(H) = \mu_0 H + \mu_0 M_S \tag{6.70}$$

Dieser Teil der Hysteresis, der das erste Magnetisieren des vorher jungfräulichen Materials darstellt, wird **Neukurve** genannt. Reduziert man H wieder, so erreicht das Magnetfeld B bei $H = 0$ einen Wert $B(0) = B_R \neq 0$, der Remanenz genannt wird. Das Material hat also eine Restmagnetisierung, die erst verschwindet, wenn die **Koerzitivfeldstärke** $H_C < 0$ angelegt wird. Legen wir jetzt ein negatives H-Feld an, wird wieder eine Sättigungsmagnetisierung $-M_S$ erreicht. Das von dem Ferromagneten ausgehende Magnetfeld ist jetzt das Sättigungsmagnetfeld $-B_S$. Von nun an verläuft die Magnetisierungskurve in umgekehrter Richtung bis zur positiven Sättigungsmagnetisierung usw...
Der Effekt der Remanenz kommt dadurch zustande, dass die WEISSschen Bezirke, einmal ausgerichtet, bevorzugt ihre gemeinsame Richtung beibehalten, ihre Magnetisierung also bei fehlendem H-Feld nicht komplett aufgeben. Für verschiedene ferromagnetische Materialien werden wir auch verschiedene Magnetisierungskurven ausmessen. Ferromagnetische Materialien, die eine schmale Hysteresisschleife haben, nennt man **magnetisch weiche Materialien**, Ferromagneten mit breiter Hysteresisschleife bezeichnet man als **magnetisch hart**. Magnetisch weiche Materialien (Weicheisen, μ-Metall ...) werden z.B. als Kerne in Transformatoren eingebaut, da in ihnen weniger Verlustleistung beim Ummagnetisieren anfällt (der Flächeninhalt der Hysteresis ist gleich der Verlustenergie). Magnetisch harte Materialien (Harteisen, Kobaltstahl...) werden wegen ihrer hohen Remanenz als Permanentmagneten eingesetzt.

6.4 Temperaturabhängigkeit

Die Effekte, die bei der Magnetisierung von para- und ferromagnetischen Stoffen auftreten, sind stark temperaturabhängig. Im folgenden wollen wir dieser Temperaturabhängigkeit auf den Grund gehen:

Temperaturabhängigkeit des Paramagnetismus:

In Abschnitt 6.2 haben wir bereits besprochen, dass die Atome paramagnetischer Stoffe ihre magnetischen Momente unter dem Einfluss eines äußeren Feldes nur teilweise ausrichten, da die thermische Energie $W_K = \frac{1}{2}k_B T$ (kinetische Energie der Gitteratome) wesentlich größer als die potenzielle magnetische Energie $W_p = 2\mu B$ ist. In der statistischen Physik (6. Semester) wird die daraus resultierende Magnetisierung M genau berechnet. Dieses Gesetz ist das

CURIE-Gesetz

$$M = \frac{N\mu^2 B}{k_B T} \qquad \Rightarrow \qquad \chi_m \sim \frac{1}{T} \tag{6.71}$$

Versuch 6.6

Wir geben flüssige Luft in ein sehr starkes Magnetfeld. Die Luft wird in dem Magnetfeld gehalten, und fließt nicht aus ihm heraus. Der Grund für diesen Sachverhalt ist, dass die Magnetisierung wegen der niedrigen Temperatur sehr hoch ist. Flüssige Luft ist deshalb stark paramagnetisch, was nach dem CURIE-Gesetz nicht anders zu erwarten ist.

Temperaturabhängigkeit des Ferromagnetismus:

Die Magnetisierung M ist in Ferromagneten unterhalb einer materialspezifischen Temperatur T_C, der sog. **CURIE-Temperatur**, nicht von der Temperatur abhängig. Oberhalb der CURIE-Temperatur ist die thermische Energie allerdings so groß, dass sie der potenziellen magnetischen Energie überwiegt; es brechen die WEISSschen Bezirke auf, und das Material wird paramagnetisch. Die Magnetisierung folgt für $T > T_C$ dem

CURIE-WEISS-Gesetz $$\boxed{M \sim \frac{H}{T - T_C}, \qquad T > T_C} \tag{6.72}$$

Je nach Sorte liegen die CURIE-Temperaturen von Eisen zwischen $T_C(\mathrm{Fe}) \approx 650\mathrm{K}$ bis $1100\mathrm{K}$.

Versuch 6.7

Ein Nagel wird von einem Permanentmagneten angezogen. Erhitzen wir den Permanentmagneten mit einem Bunsenbrenner bis zur Rotglut, fällt der Nagel herunter, da das Eisen paramagnetisch wird. Als Paramagnet kann das Eisen seine Remanenzmagnetisierung, die es zum Permanentmagneten macht, nicht mehr halten.

6.5 Induktivität einer Spule mit Kern

In Abschnitt 5.4.2 haben wir die Induktivität L von Zylinderspulen ohne Kern hergeleitet und sind auf den Ausdruck (5.66) gekommen:

$$L = \mu_0 \frac{N^2 A}{l} \tag{6.73}$$

Hier sind N die Windungszahl, A die Querschnittsfläche und l die Länge der Spule. Für Spulen mit Kern, gilt diese Beziehung allerdings nicht. Die Herleitung der Induktivität L einer Spule, die komplett von einem z.B. ferromagnetischen Kern mit Querschnittsfläche A und Länge l ausgefüllt ist, verläuft analog zu der einer Spule ohne Kern (vgl. Abschnitt 5.4.2). Wir müssen hier jedoch berücksichtigen, dass das Magnetfeld im Spuleninneren um die relative Permeabilität μ_r größer ist. Es gilt also anstelle von (5.63) die Beziehung:

$$B(t) = \mu_r \mu_0 \, I(t) \, \frac{N}{l} \tag{6.74}$$

Der magnetische Fluss durch die Spule ist deshalb

$$\Phi_M(t) = N \iint\limits_A \vec{B}(t) \mathrm{d}\vec{A} = N B(t) \, A = -\mu_r \mu_0 \, A \, I(t) \, \frac{N^2}{l}. \tag{6.75}$$

Da für die Induktionsspannung

$$U_i = -\frac{\mathrm{d}\Phi_m}{\mathrm{d}t} \tag{6.76}$$

gilt, folgt

$$U_i = -\frac{\mathrm{d}\Phi_m}{\mathrm{d}t} = -\mu_r \mu_0 \, A \, \frac{N^2}{l} \, \frac{\mathrm{d}I(t)}{\mathrm{d}t}. \tag{6.77}$$

Für die Induktivität einer Spule mit Kern folgt daraus

$$\Rightarrow \quad \boxed{L = \mu_r \mu_0 \, \frac{N^2 A}{l}} \tag{6.78}$$

6.6 Energie des magnetischen Feldes

Um die Energie des magnetischen Feldes zu berechnen, betrachten wir noch einmal den Abschaltvorgang des RL-Gliedes aus Abschnitt 5.5. Vor dem Abschalten ist die Gleichspannungsquelle U_0 eingeschaltet, so dass ein Strom $I_0 = U_0/R$ durch die Spule fließt. In der Spule wird ein Magnetfeld B erzeugt, für das

$$B = \mu_r \mu_0 \frac{N I_0}{l} \tag{6.79}$$