

Zusammenfassung:

	Magnetismus	Elektrizität
Bestimmen die Kraft auf eine Ladung q	Magnetfeld \vec{B} $\vec{F} = q\vec{v} \times \vec{B}$	Elektrisches Feld \vec{E} $\vec{F} = q\vec{E}$
Materieunabhängige Größen	Magnetfeldstärke \vec{H} $\oint \vec{H} d\vec{r} = I_{\text{frei}}$ $\Leftrightarrow \text{rot}\vec{H} = j_{\text{frei}}$	Dielektrische Verschiebung \vec{D} $\oint \vec{D} d\vec{A} = Q_{\text{frei}}$ $\Leftrightarrow \text{div}\vec{D} = \rho_{\text{frei}}$
Dipolmomente pro Volumen	Magnetisierung \vec{M} $\vec{M} = \frac{\sum \vec{\mu}_i}{V}$	Polarisation \vec{P} $\vec{P} = \frac{\sum \vec{p}_i}{V}$

6.3 Ferromagnetismus

Im Gegensatz zu paramagnetischen Stoffen gibt es viele Substanzen, wie z.B. Eisen, Cobalt, Nickel sowie viele Legierungen, die das Magnetfeld \vec{B}_0 nicht nur geringfügig, sondern um das hundert- bis tausendfache verstärken. Die relativen Permeabilitäten dieser Stoffe liegen demnach in der Größenordnung

$$\mu_r \approx 10^2 - 10^5 \quad (6.65)$$

$$\Rightarrow B = \mu_r \mu_0 H \quad \Rightarrow \quad B \gg B_0 = \mu_0 H. \quad (6.66)$$

Es macht wegen $\mu_r \approx \chi_m = \mu_r - 1$ bei ferromagnetischen Materialien keinen Sinn, zusätzlich zur relativen Permeabilität μ_r über die magnetische Suszeptibilität χ_m zu sprechen. Ähnlich wie Paramagneten bestehen ferromagnetische Substanzen aus Atomen, die schon vor dem Magnetisieren permanente magnetische Momente enthalten. Paramagneten können unter Einfluss eines äußeren Magnetfeldes ihre Dipole allerdings nur teilweise ausrichten, da die Wärmebewegung der Ausrichtung entgegenwirkt. In Ferromagneten treten dagegen kollektive Eigenschaften auf: Es überwiegt hier die Wechselwirkung der atomaren magnetischen Momente $\vec{\mu}$ untereinander dem Einfluss der Wärmebewegung. Schon ohne ein äußeres Magnetfeld \vec{B}_0 richtet ein Atom sein magnetisches Moment $\vec{\mu}_i$ bevorzugt so aus, dass es parallel zum magnetischen Moment $\vec{\mu}_{i-1}$ bzw. zu dem davon

ausgehenden Magnetfeld \vec{B}_{i-1} des Nachbaratoms steht. Dieser Effekt führt dazu, dass sich die magnetischen Dipole über Bereiche der Größenordnung $1\ \mu\text{m}$ hinweg entlang einer Richtung ausrichten können. Diese Bereiche nennt man **WEISSsche Bezirke**. Die

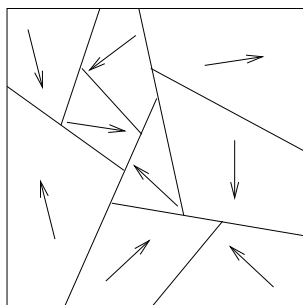


Abbildung 6.10: WEISSsche Bezirke

magnetischen Felder \vec{B}_i der einzelnen Dipole überlagern sich zu einem, je nach Größe des WEISSschen Bezirks, starken Magnetfeld \vec{B}_W . Ein Ferromagnet enthält i.d.R. eine Vielzahl solcher WEISSscher Bezirke, die statistisch gleichverteilt ausgerichtet sind, so dass das resultierende Magnetfeld, das von ihm ausgeht, verschwindet. Legt man ein äußeres Magnetfeld \vec{B}_0 an einen ferromagnetischen Körper, richten sich die magnetischen Dipole nicht unbedingt sofort entlang der Feldlinien von \vec{B}_0 aus; ein magnetischer Dipol klappt erst dann um, wenn das äußere Feld \vec{B}_0 stärker ist als das von dem WEISSschen Bezirk ausgehende Magnetfeld \vec{B}_W . Dadurch, dass der abtrünnige Dipol nicht mehr zum Feld \vec{B}_W beiträgt, wird \vec{B}_W kleiner, so dass noch mehr Dipole umklappen. Es entsteht eine Kettenreaktion. In Ferromagneten richten nicht nur einzelne Atome, sondern ganze WEISSsche Bezirke ihre Dipole entlang des äußeren Magnetfeldes aus. Diesen Effekt bezeichnet man als **BARKHAUSEN-Effekt**. Das Umklappen eines WEISSschen Bezirks wird BARKHAUSEN-Sprung genannt. Dazu folgender Versuch:

Versuch 6.3

An eine Spule, die mit einem Weicheisenkern gefüllt ist, wird ein Lautsprecher angeschlossen (siehe Abb. 6.11). Bringen wir langsam einen Permanentmagneten in die Nähe des Weicheisenkerns, richten sich nach und nach die WEISSschen Bezirke aus. Dadurch werden impulsartige Ströme induziert, so dass ein Rauschen im Lautsprecher zu hören ist.

Man kann sich das Prinzip der WEISSschen Bezirke recht gut an folgendem Modellversuch veranschaulichen:

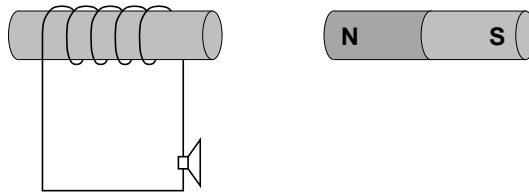


Abbildung 6.11: Versuch zum BARKHAUSEN-Effekt

Versuch 6.4

Auf einer Platte sind lauter kleine, frei drehbar gelagerte Kompassnadeln regelmäßig angeordnet. Wir können beobachten, dass die Kompassnadeln in gewissen Bereichen die gleiche Richtung annehmen. Diese Bereiche sind makroskopische WEISSschen Bezirke (siehe Abb. 6.12). Bringen wir einen Permanentmagneten in die Nähe des Versuchsaufbaus, können wir beobachten, wie die WEISSschen Bezirke BARKHAUSEN-Sprünge durchführen. Ist das äußere Magnetfeld sehr stark, richten sich alle Kompassnadeln entlang der Magnetfeldlinien aus.

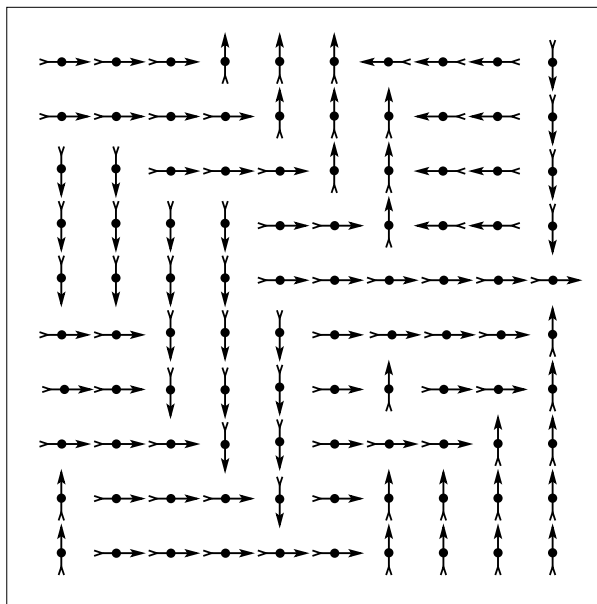


Abbildung 6.12: Versuchsaufbau zur Veranschaulichung der WEISSschen Bezirke: Auf einer Platte sind lauter Kompassnadeln angebracht, die aufgrund der gegenseitigen Wechselwirkung innerhalb von WEISSschen Bezirken ihre Richtungen aneinander angleichen.

6.3.1 Magnetisierungskurve (Hysteresis)

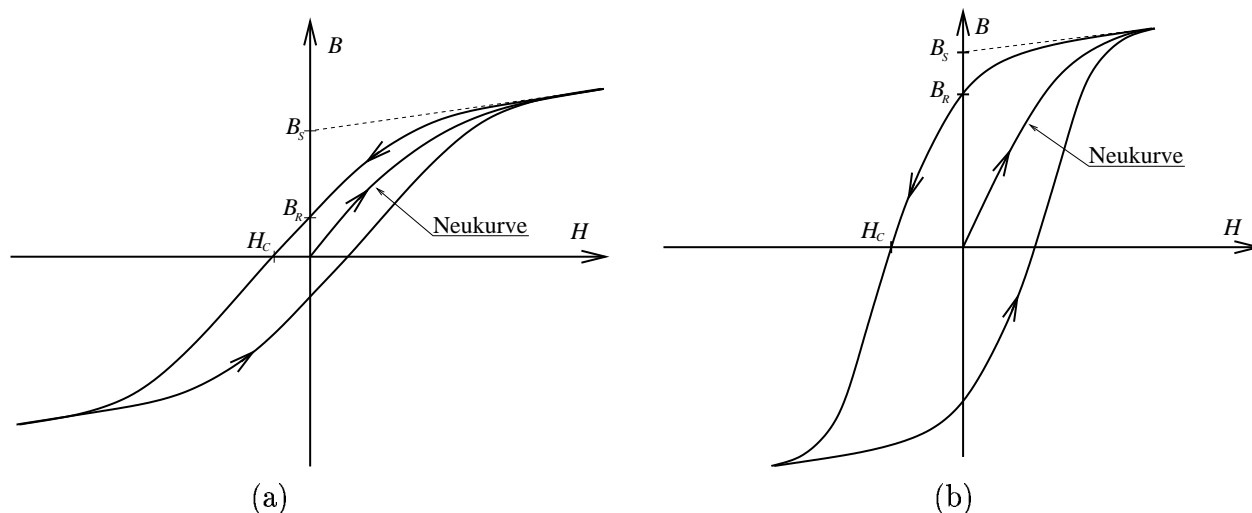


Abbildung 6.13: Hysteresisschleife von (a) magnetisch weichem und (b) magnetisch hartem Material

Versuch 6.5

Wir lassen durch eine mit einem Eisenkern gefüllte Spule der Länge l einen Strom I_{frei} fließen und messen mit einer HALL-Sonde das Magnetfeld (B -Feld) an den Enden der Spule. Das gemessene B -Feld können wir nun in Abhängigkeit vom H -Feld in einem kartesischen Koordinatenkreuz auftragen, da das H -Feld wegen

$$\oint \vec{H} \, d\vec{r} = H l = I_{\text{frei}} \quad (6.67)$$

über den Strom bekannt ist. Wir steigern den Strom I_{frei} langsam bis zu einem Maximalwert I_{max} . Dannach lassen wir den Strom linear bis zum Wert $-I_{\text{max}}$ abfallen, steigern dann den Strom wieder bis zum Maximalwert I_{max} usw. Das Ergebnis ist die in Abb. 6.13 abgebildete Magnetisierungskurve, eine schleifenförmige Kurve, die **Magnetisierungskurve**, **Hysteresis** oder **Hysteresisschleife** $B(H)$ genannt wird.

Wie wir sehen, ist das Magnetfeld B nicht wie bei dia- und paramagnetischen Stoffen proportional zur Feldstärke H . Wegen

$$B = \mu_r \mu_0 H \quad (6.68)$$

kann μ_r für ferromagnetische Stoffe keine Konstante sein.

Diskussion der Hysterese

Es gilt bekanntlich

$$\vec{B} = \mu_0 \vec{H} + \mu_0 \vec{M} \quad (6.69)$$

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. Danach steigt das Magnetfeld B linear zur H -Feldstärke an mit

$$B(H) = \mu_0 H + \mu_0 M_S \quad (6.70)$$

Dieser Teil der Hysterese, 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 Hysterese 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: