

A magnetosztatika törvényei anyag jelenlétében

Eddig: a mágneses jelenségeket levegőben vizsgáltuk.

Kimutatható, hogy vákuumban gyakorlatilag ugyanolyanok a törvények, mint levegőben (levegő nem módosítja lényegesen a törvényeket).

Mi történik, ha a mágneses erőteret keltő áramokat más anyagok veszik körül (pl. folyadék, szilárd anyag)?

KÍSÉRLETEK:

- ◆ Az elektromágneses indukciónál, láttuk, hogy az indukáló tekercsbe vasmagot téve, az indukált feszültség – egyébként változatlan körülmények között – jelentősen nagyobb.
- ◆ Áram bekapcsolásakor az önindukációs tekercs áramkésleltető hatása lényegesen nagyobb, ha a tekercsben vasmag van.

A kísérletek tehát azt mutatják, hogy a mágneses teret keltő tekercsek mágneses hatása függ a tekercset kitöltő *anyagtól*.

Mi okozza az anyagoknak a mágneses erőteret befolyásoló hatását?

Ahhoz, hogy a kérdésre válaszolni tudjunk, az atomok felépítését és viselkedését kell ismernünk. Az anyagot felépítő atomok töltött részecskékből (atommag és elektronok) állnak, amelyek állandó mozgásban vannak. Az atommag töltéseinek mozgását első közelítésben elhanyagolhatjuk, az elektronok azonban atomi léptékkal mérve jelentős mozgásokat végeznek, ami azt jelenti, hogy az atomban elektromos áramok jönnek létre. Ezek az atomi áramok mágneses dipólmomentumokat és mágneses erőteret hoznak létre. Az így létrejött atomi mágneses erőterek képesek megváltoztatni az eredeti külső mágneses erőteret.

Az anyagok atomjaiban az elektronok kétféle mozgást végeznek, amelyek mindegyike elemi mágneses dipólus megjelenését eredményezi.

Az egyik mozgás az elektronnak az atommag körüli mozgása, amelyet a mágneses jelenségek egyszerű leírásánál azzal az igen egyszerű (de a valóságnak nem teljesen megfelelő) modellel közelíthetünk, hogy az elektronoknak az atommag körüli mozgását elemi köráramokként fogjuk fel, és ezek az elemi köráramok atomi mágneses dipólusoknak felelnek meg. Ezek adják az elektronok ún. *pályamozgásából* származó dipólmomentumot.

Az anyagok mágneses viselkedése bizonyos anyagok esetén nem értelmezhető egyedül az elektronok pályamozgásából származó mágneses dipólmomentumok segítségével. Kiderült, hogy az elektronoknak van egy sajátos belső mozgása is, amit a legegyszerűbb (de a valósággal több szempontból nem egyező) modell szerint úgy képzelhetünk el, hogy az elektron a saját tengelye körül forog, ami a benne lévő töltés körmozgása miatt egy újabb mágneses dipólmomentumot eredményez. Ezt *spin* mágneses dipólmomentumnak nevezik.

- ◆ Az anyagok többségében az atomok mágneses dipólmomentumainak eredője nem nulla, tehát az atomoknak van egy eredő mágneses dipólmomentuma. Ezek a dipólmomentumok azonban külső mágneses tér nélkül rendezetlenül helyezkednek el, és átlagos eredő mágneses erőterük nulla. A külső mágneses erőteret ezeket a dipólusokat rendezi, és ekkor nullától különböző eredő mágneses erőterük lesz, ami megváltoztatja az eredeti külső mágneses erőteret.
- ◆ Az anyagok egy részében külső mágneses erőteret nélkül az atomokban az elektronok mágneses dipólmomentumai egymást kompenzálják, így az atomoknak nincs eredő mágneses dipólmomentuma. A külső mágneses erőteret azonban az ilyen anyagok atomjaiban eredő mágneses dipólusokat (ún. indukált dipólmomentumot) hozhat létre, és

ezeknek a rendezett mágneses dipólusoknak az átlagos tere már nem nulla, ami szintén befolyásolja a kialakuló mágneses erőteret.

Azt a folyamatot, amelynek során az anyagban az atomi mágneses dipólmomentumok rendeződnek, az anyag *mágnesezésének*, az ilyen állapotba került anyagot pedig *mágnesezettnek* nevezik.

Az atomokban végbemenő töltésmozgásból származó áramokat – szemben a vezetékben folyó ún. *makroszkopikus áramokkal* – gyakran *mikroszkopikus áramoknak* nevezik. Ezzel a terminológiával élve azt mondhatjuk, hogy a makroszkopikus áramok által létrehozott mágneses erőteret az anyag jelenléte az atomi szinten jelentkező, mikroszkopikus áramok révén módosítja.

Mágneses erőter anyagokban

Az atomi mágneses dipólusok hatása a mágneses erőtérré homogén, izotróp anyagokban

A mágnesezett anyagokban várhatóan más lesz a mágneses erőter, mint a külső tér, hiszen a mágneses dipólusok tere módosítja azt.

Homogén, izotróp anyagokban a tapasztalat szerint egy áram által egy meghatározott helyen okozott mágneses indukció vákuumbeli (B_v) és anyag jelenlétében mérhető értékei (B) között egyszerű arányosság áll fenn, így az anyag jelenléte által okozott változás egyetlen, anyagtól függő számmal vehető figyelembe:

$$\mathbf{B} = \mu_r \mathbf{B}_v.$$

Itt μ_r az anyagi minőségtől függő szám, az illető anyag *relatív permeabilitása*.

A különböző anyagok mágneses erőterben különböző módon viselkednek, ami relatív permeabilitásuk értékében is kifejeződik. A homogén, izotróp anyagok a mágneses térrel kapcsolatos viselkedésük alapján két nagy csoportba oszthatók:

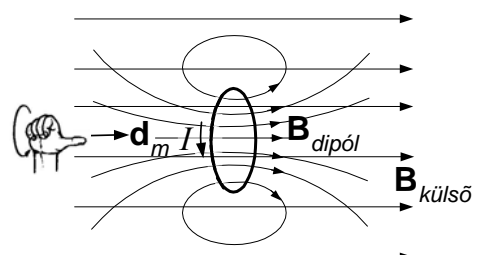
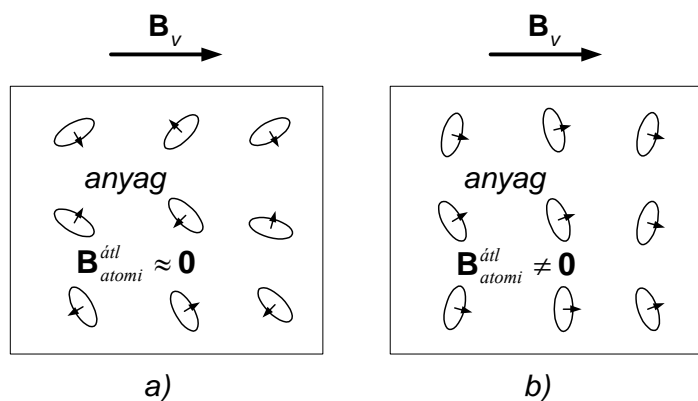
1. Paramágneses anyagok

Azokban az anyagokban, amelyekben az atomoknak nullától különböző mágneses dipólmomentuma van (ez az anyagok többsége) az atomi dipólusok külső mágneses tér nélkül rendezetlenül helyezkednek el, és mágneses erőterük átlagosan semlegesítik egymást (a) ábra). Ha azonban az anyagot mágneses erőterbe tesszük, akkor a dipólmomentumok igyekeznek beállni az erőter irányába (a tökéletes rendeződést a hőmozgás akadályozza meg, de a

dipólusok többsége az erőtérral közel párhuzamosan áll be; b) ábra).

A külső erőter irányába befordult atomi dipólus dipólmomentum vektora (\mathbf{d}_m)

párhuzamos a külső erőter $\mathbf{B}_{\text{külső}}$ mágneses indukcióvektorával (ábra). Ilyenkor a dipólust alkotó áramhurok belsejében a dipólus által



keltett $\mathbf{B}_{dipól}$ mágneses indukció egy irányú a dipólmomentum vektorral és így a külső erőterrel is. Mivel pedig a dipólus erőtere éppen itt a legerősebb (itt a legsűrűbbek az indukcióvonalak), az erőterrel egy irányban beálló dipólus jelenléte erősíti az átlagos mágneses erőteret.

Ebben az esetben tehát a mikroszkopikus mágneses dipólusok eredője a mágneses erőter irányába mutat, ezért $B > B_v$. Ennek megfelelően a relatív permeabilitás I -nél nagyobb pozitív szám: $\mu_r > I$, értéke azonban a mérések szerint I -től alig különbözik (nagysága $I+10^{-3}$ – $I+10^{-6}$ között van). Az ilyen anyagokat *paramágneses* anyagoknak nevezik. Nevüket onnan kapták, hogy a belőlük készült hosszú, vékony rúd a mágneses térrel párhuzamosan (*paralell*) igyekszik beállni. A homogén, izotróp anyagok döntő többsége paramágneses.

2. Diamágneses anyagok

Az anyagok egy másik csoportjánál az atomok eredő mágneses dipólmomentuma nulla. Ha azonban egy ilyen anyagot mágneses erőterbe teszünk, akkor – itt nem részletezett okok miatt – az atomokban létrejön egy ún. *indukált* mágneses dipólmomentum. Az így keletkezett mágneses dipólusok a külső erőterrel *ellenkező irányban* igyekeznek beállni (a hőmozgás hatása itt is jelentkezik).

Ez a fenti megfontolások alapján azt jelenti, hogy a rendeződött dipólusok mágneses erőtere ezekben az anyagokban a külső erőterrel ellenkező irányú, így az anyagban az átlagos mágneses indukció kisebb, mint a vákuumbeli érték ($B < B_v$). Ennek megfelelően a relatív permeabilitás I -nél kisebb pozitív szám: $\mu_r < I$, amelynek értéke a mérések szerint alig különbözik I -től (nagysága körülbelül $I+10^{-6}$). Az ilyen anyagokat *diamágneses* anyagoknak nevezik. Nevüket onnan kapták, hogy a belőlük készült hosszú, vékony rúd a mágneses erőterre merőlegesen (*diametrálisan*) igyekszik beállni. Diamágneses anyag pl. a bizmut, a higany, a réz, a víz, a gázok közül pedig a nitrogén és a hidrogén.

A két csoport közös jellemzője tehát az, hogy relatív permeabilitásuk nagysága alig különbözik I -től.

Vákuumban nincs mágnesezés, ezért $\mu_r = I$. Mivel gázokban jó közelítéssel $\mu_r = I$, a levegőben végzett kísérletek eredményeit jó közelítéssel vákuumbeli eredményeknek fogadhatjuk el.

Mivel az anyag jelenléte módosítja a mágneses erőteret, felmerül a kérdés: hogyan módosulnak a magnetosztatika alaptörvényei?

A magnetosztatika Gauss-törvénye anyag jelenlétében

Az anyagokban az atomi töltésmozgásból származó mágneses erőteret ugyanolyan töltéseknek (elektronok) a mozgása okozza, mint amelyek a makroszkopikus áramokat keltik.

Ezek a mikroszkopikus áramok feltehetőleg ugyanolyan természetű mágneses erőteret keltenek, mint a makroszkopikus áramok, ezért feltehetjük, hogy az így keletkezett mágneses indukcióvektor vonalai is zárt hurkok. Ebből következik, hogy a Gauss-törvény változatlan formában érvényes anyag jelenlétében is:

$$\oint_A \mathbf{B} d\mathbf{A} = 0.$$

A tapasztalat ezt a feltevést igazolja.

Gerjesztési törvény anyag jelenlétében

A gerjesztési törvény az áramok és a mágneses erőter kapcsolatát rögzíti, ezért ebben figyelembe kell venni a mikroszkopikus áramok erőterét is.

Ez formálisan a **mikroszkopikus áramoknak** a törvénybe történő beírását jelenti:

$$\oint_L \mathbf{B} d\mathbf{r} = \mu_0 (I + I_{mikro}).$$

(Itt I illetve I_{mikro} a zárt hurok által körülvett felületen átmenő valódi illetve mikroszkopikus áramok előjeles összegét jelenti.) Ezzel az összefüggéssel azonban az a probléma, hogy a mikroszkopikus áramok járuléka általában csak igen bonyolult módon számítható ki. Ezért itt csak a legegyszerűbb esettel, a homogén izotróp anyagok esetével foglalkozunk.

Homogén, izotróp anyagok esetén a gerjesztési törvény egyszerűen átalakítható az anyag jelenlétében érvényes alakra. Ehhez csak a $\mathbf{B} = \mu_r \mathbf{B}_v$ összefüggést kell behelyettesíteni a vákuumban érvényes egyenletbe:

$$\oint_L \mathbf{B}_v d\mathbf{r} = \oint_L \frac{\mathbf{B}}{\mu_r} d\mathbf{r} = \mu_0 I.$$

Ha ezt az egyenletet átrendezzük, akkor a gerjesztési törvény a

$$\oint_L \mathbf{B} d\mathbf{r} = \mu_0 \mu_r I$$

alakot ölti.

Eszerint az anyag jelenléte a mágneses erőterre vonatkozó alaptörvényt, és így az összes többi összefüggést is úgy módosítja, hogy *azonos makroszkopikus áramok* esetén minden vákuumban érvényes összefüggésben, ahol szerepel a μ_0 , az anyagban érvényes alakot a $\mu_0 \Rightarrow \mu_0 \mu_r$ cserével kapjuk meg. A $\mu = \mu_0 \mu_r$ mennyiséget az anyag *abszolút permeabilitásának* nevezik.

Így írható át pl. az egyenes vezető illetve a tekercs mágneses tere

$$B = \mu_r B_v = \frac{\mu_r \mu_0 I}{2\pi r} = \frac{\mu I}{2\pi r} \quad \text{illetve} \quad B = \mu_r B_v = \frac{\mu_r \mu_0 IN}{l} = \frac{\mu IN}{l}.$$

A mágneses erőter jellemzésére a \mathbf{B} mágneses indukcióvektor mellett gyakran egy másik térmennyiséget is bevezetnek, amelyet mágneses térerősség-vektornak neveznek, és rendszerint \mathbf{H} -val jelölnek. Homogén, izotróp, anyagokban a két térmennyiség között az egyszerű

$$\mathbf{B} = \mu_0 \mu_r \mathbf{H} = \mu \mathbf{H}$$

összefüggés áll fenn. Ha a gerjesztési törvényt átírjuk a

$$\oint_L \frac{\mathbf{B}}{\mu_0 \mu_r} d\mathbf{r} = I$$

alakba, akkor látható, hogy a \mathbf{H} mágneses térerősség bevezetésével a törvényre a formailag egyszerűbb

$$\oint_L \mathbf{H} d\mathbf{r} = I$$

alakot kapjuk.

Bonyolultabb anyagok

A mikroszkopikus áramok hatása a mágneses erőterre inhomogén, anizotróp anyagban általában bonyolult: az atomi dipólusok mágneses erőtere általában nem párhuzamos a külső erőterrel, és a mágneses dipólusok bizonyos anyagokban külső erőter nélkül is

rendeződhetnek. Ez utóbbi esetben az anyagnak saját mágneses erőtere lehet, vagyis mágnesként viselkedhet.

Ferromágneses anyagok

Ha az anyagban a dipólusok maguktól rendeződnek, akkor azt mondjuk, hogy az anyagnak *spontán mágnesezettsége* van. Ilyen anyagok az ún. *ferromágneses anyagok*, amelyek egy bizonyos – anyagtól függő – hőmérséklet, az ún. Curie-pont felett paramágnesesek, a Curie-pont alatt viszont külső mágneses tér nélkül is kialakul bennük egy spontán mágnesezettség.

Energetikai okokból egy makroszkopikus mintában a mágnesezettség nem azonos irányú a teljes anyagban, hanem ellenkező mágnesezettségű tartományok (ún. *domének*) jönnek létre. Az ilyen anyag kifelé nem mutat mágneses tulajdonságokat. Ha azonban az anyagot erős mágneses térbe tesszük, akkor a domének mágnesezettsége egy irányúvá tehető, és ez az állapot a tér megszűnte után is fennmarad. Az ilyen anyag mágnesként viselkedik.

Ferromágneses anyag pl. a vas, a nikkell és számos ötvözet.

A ferromágneses anyagok fontos jellemzője, hogy relatív permeabilitásuk (μ_r) igen nagy lehet, elérheti a 10^4 - 10^5 értéket is. Ha a mágneses erőteret létrehozó áramok közötti térrészt ilyen anyaggal töltjük ki, akkor ott a mágneses indukció nagysága a vákuumbeli értéknél nagyságrendekkel nagyobb lehet. Ezért tesznek pl. a tekercsekbe vasmagot, ha a mágneses indukció megnövelése a cél.