

Elektromágnesesség

Áttekintés

- Bevezetés
- Mágneses térerősség
- Mágneses indukció
- Permeabilitás (para, dia és a ferromágneses anyagok)
- Mágneses fluxus
- Erőhatás mágneses térben
- Reluktancia (mágneses ellenállás)
- Mágneses indukció (nyugalmi, mozgási (kölcsönös és ön) indukció)
- Transzformátor elv (működés, felépítés, kivitel stb.)
- Mágneskörök vasanyagok (lemezelt, por, ferrit magok)
- Mag és tekercselési veszteségek

Bevezetés - Elektromos és mágneses tér

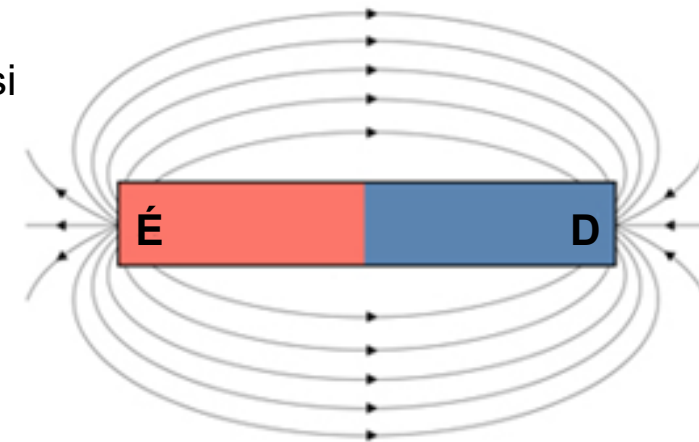
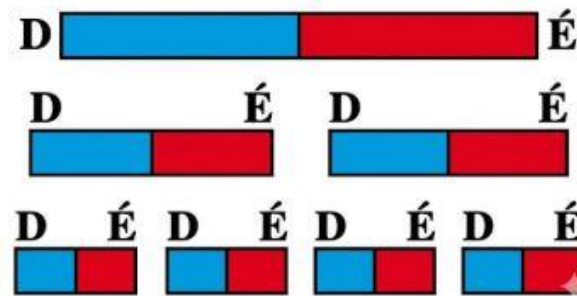
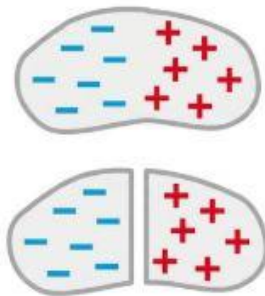
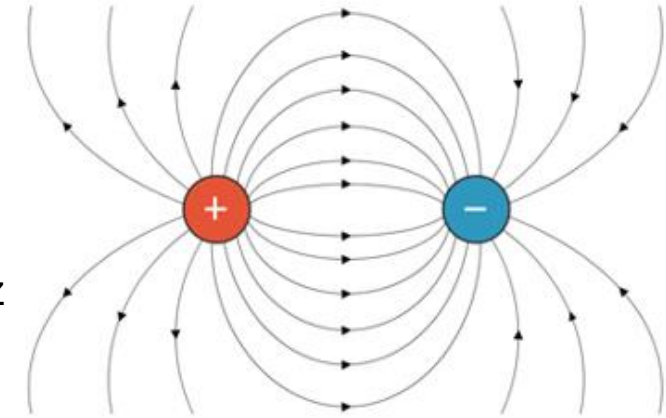
- A mágneses tér az ember számára nem érzékelhető, ezért csak hatásai alapján tudjuk észlelni:

- Erőhatás
- Árammal átjárt vezető
- Indukáló hatás

- Az elektromos tér és a mágneses tér többféle hasonlóságot mutat
- Az elektromos tér az egységnyi pozitív töltésre ható erő nagyságával egyenlő, azaz

$$E = \frac{F}{Q} \text{ [N/C] vagy [V/m]}$$

- Az elektromos tér szétválasztható pozitív és negatív töltések összességére (Isd.: kondenzátor)
- Ha egy állandó mágnezt kettévágunk, ismételten egy dipólust kapunk
- Azaz: a mágneses tér dipólusokból áll, az egyik mágneses pólus nem választható el a mási pólustól

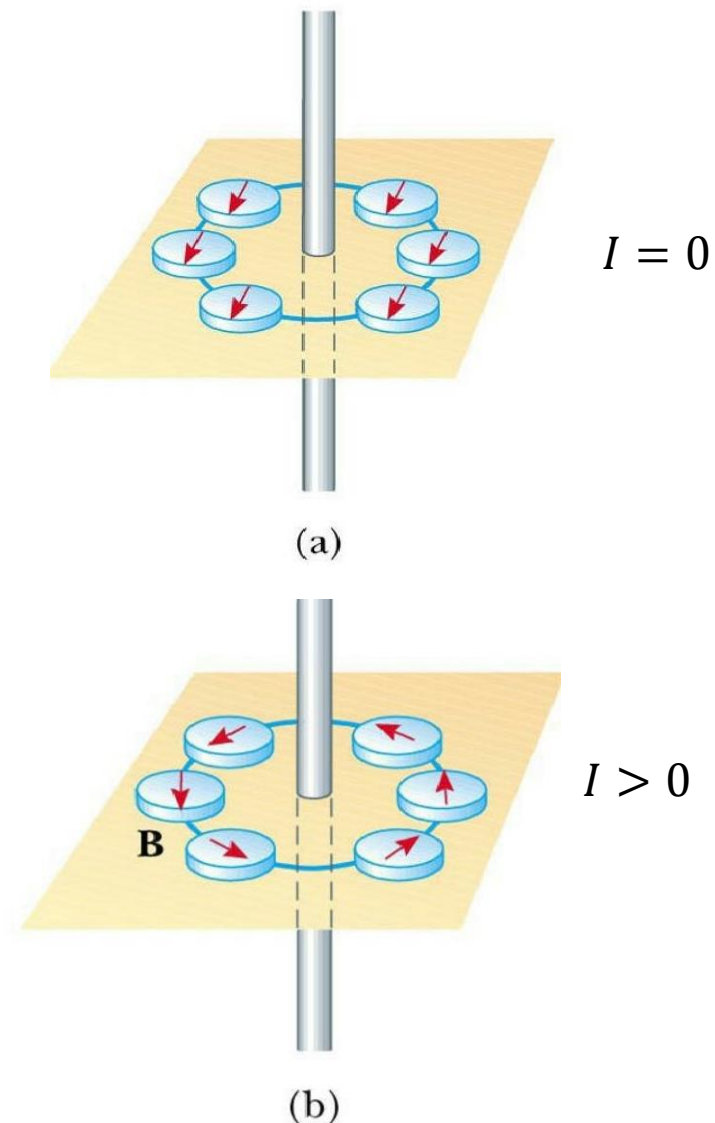


Mágneses teret jellemző mennyiségek – Mágneses térerősség

- Vegyünk például egy vezetőt, amelyben áramot folytatunk át!
- Kísérlettel igazolható, hogy amennyiben a vezetéken áram folyik át, körülötte mágneses tér alakul ki
- Ennek egyfajta erőhatását tudjuk szemléltetni az iránytűk segítségével
- DE! Amennyiben nem helyezünk a vezető körül iránytűket, abban az esetben is kialakul a mágneses gerjesztettség, az áram akkor is hatást gyakorol a környezetére (szemmel nem látható)
- Ez a hatás az áram nagyságától (irányától) és a geometriától függ!
- A jelenséget mágneses térerősségnek nevezzük. Jele: H , mértékegysége (A/m)
- A mágneses térerősség (H) tehát egy olyan vektormennyiség, amely a mágneses tér **intenzitását** jellemzi egy adott pontban, függetlenül attól, milyen anyag (közeg) van jelen.
- Egy egyenes vezető körül a térerősség koncentrikus körökben fog kialakulni (az adott körvonalon a térerősség állandó lesz), azaz:

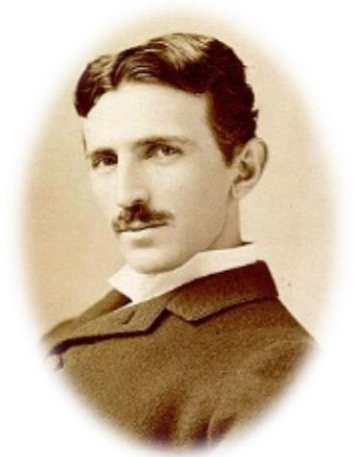
$$H = \frac{I}{2 \cdot \pi \cdot r},$$

- ahol r a vezetőtől mért távolság értéke



Mágneses indukció

- Gondoljuk újra az előző kísérletet!
- Amennyiben a vezetőben áramot folytatunk, az iránytűk elfordulnak (a kialakuló mágneses tér irányának megfelelően)
- Mi lehet az ok? Az iránytű a mágneses tér szempontjából nem közömbös anyagból készült. A mágneses tér erőhatást gyakorol az iránytűkre!
- Ez az erőhatás a mágneses indukció. Jele B , mértékegysége (Vs/m^2) azaz (T) (Tesla) vagy (G) (Gauss). $1T = 10000G$
- A mágneses indukció megmutatja, hogyan reagál a környezet (a közeg) a gerjesztésre.
- A mágneses indukció szintén vektoros mennyiség, amely a mágneses tér **erőhatását** jellemzi.



Mágneses indukció és térerősség kapcsolata

- A korábbi kísérlet több kérdést is felvet:
 - Akkor is keletkezik indukció, ha nincs ott az iránytű?
 - Ha nem iránytű van ott, hanem valamilyen más anyag, mi történik?
- Az indukció közvetlenül nem mérhető, de megállapítható, hogy a mágnes térerősség nem közömbös az anyagokra nézve: a mágneses térerősség (H) indukciót (B) hoz létre valós anyagokban („vezeti” a mágneses teret), azaz

$$B = \mu H$$

- Ahol μ anyagi jellemző: mágneses permeabilitás.
- Ennek megfelelően a mágneses erővonalak haladhatnak



- Tehát a levegőnek (vákuumnak) is van permeabilitása, csak nagyon kis értékű: $\mu_0 = 4\pi 10^{-7} \left(\frac{Vs}{Am}\right)$
- Relatív permeabilitás: μ_r
 - μ_r a relatív permeabilitás, amely megmutatja, hogy az indukció hányszor lesz nagyobb, ha a teret vákuum helyett valamilyen anyag tölti ki ($\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0}$);
- A valóságban –villamos gépek esetén- a korábban említett két lehetőség együttese a jellemző (vas + légrés).

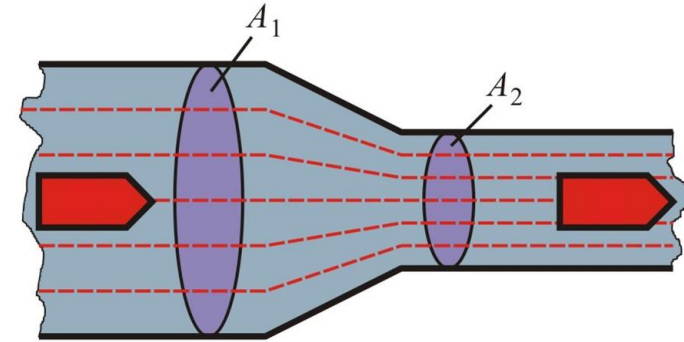
Mágneses indukció és anyag kapcsolata

- A különböző anyagok mágneses tulajdonságai szerkezetükből adódnak, csoportosításuk a relatív permeabilitás alapján lehetséges
- A **diamágneses** anyagok ($\mu_r > 1$) külső tér hiányában nem mutatnak mágneses tulajdonságot. Ez a hatás minden anyagban jelen van, de nagyon gyengén. Ha például egy ilyen anyaghoz egy rúd-mágnessel közelítünk, akkor az anyagdarabra ható erők eredője vonzó jellegű kölcsönhatást eredményez. Általánosságban elmondható, hogy egy paramágnes a nagyobb térerősségű hely felé igyekszik elmozdulni.
- A **paramágneses** anyagok ($\mu_r < 1$) éppen fordítva viselkednek: ezeket az anyagdarabokat a permanens mágnesek taszítják. A diamágnes a kisebb térerősségű hely felé igyekszik elmozdulni.
- A **ferromágneses** effektus ($\mu_r \gg 1$) nagyságrendekkel erősebb, mint a para vagy diamágneses hatás. Ennek oka az, hogy az egyes atomok közötti kvantummechanikai kölcsönhatás miatt a ferromágnesen belül egy-egy nagyobb tartományban az ún. doménben az elemi dipólmomentumok mind egy irányba állnak. Természetesen előfordulhat, hogy külső tér hiányában egy makroszkópikus ferromágnes nem mutat mágneses jelleget, mert a domének orientációja véletlenszerű. Erős külső tér esetén ezek a domének rendeződnek, majd a tér megszűnésével visszaáll a véletlenszerű orientáció.

Diamágneses		Paramágneses		Ferromágneses	
Anyag	μ_r	Anyag	μ_r	Anyag	μ_r
Víz	0,99999901	Mangán	1,0004	Vas	3000-6000
Kén	0,99998	Alumínium	1,000022	Kobalt	100-400
Arany	0,99997	Ón	1,0000043	Nikkel	200-500
Ezüst	0,999975			Permalloy	5e – 300e

Mágneses fluxus

- A korábbi tanulmányok során tanultunk az áramsűrűség fogalmáról: az áramsűrűség azt adja meg, hogy egy adott keresztmetszeten („felületen”) mekkora áramot engedünk meg
- Hasonló mérőszám definiálható mágneses körök esetén is, amit mágneses fluxusnak nevezünk
- A mágneses indukció (B) azt mutatja meg, mennyire sűrűek az erővonalak, a fluxus pedig azt, hogy összesen mennyi erővonal halad át egy adott területen.
- Jele: Φ , mértékesége (Vs/m^2) vagy (Wb) (Weber)



- Kiszámítható:

$$\Phi = B \cdot A \cdot \cos(\alpha),$$

ahol α a felület normálisa és az indukcióvektor közötti szög

- A mágneses erővonalak vektoros mennyiségek, így a felület és a vektorok egymáshoz viszonyított helyzete tehát nem közömbös: a legnagyobb fluxus akkor keletkezik, ha az indukcióvektorok merőlegesek a felületre
- Gyakorlati szemmel (hasonlóan az áramsűrűséghez):
 - Akkor nagyobb a fluxus, ha ugyanakkora felületen azonos az indukcióvektorok száma vagy
 - Kisebb felületen több erővonal halad át
- Minél kisebb felületbe „kényszerítjük” a fluxust, annál inkább melegezni fog a vasmag

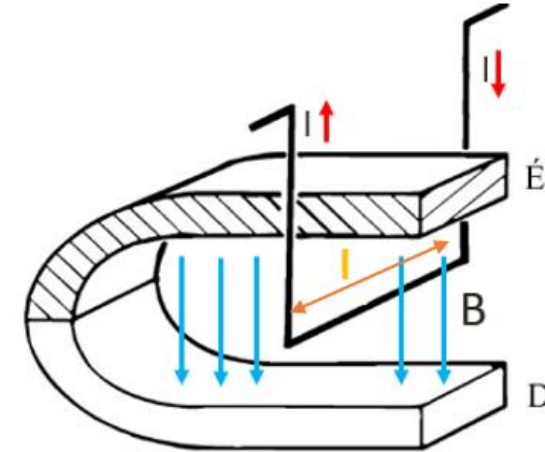
Erőhatás mágneses térben

- Két mágneses tér egymásra való hatása erőként nyilvánul meg (vonzás, taszítás);
- Az erőhatás elérhető állandó mágnessel vagy áramjárta vezető (pl.: tekercselés) segítségével;
- Ha az áram merőleges a mágneses tér irányára, a vezetőre ható erő egyenesen arányos:
 - Az áramerősséggel
 - A mezőben lévő vezető hosszával
 - A mágneses indukcióval (erővonalssűrűséggel):

$$F = BIl \text{ (N)}$$

- Amennyiben a mágneses tér és az áram nem merőleges egymásra, mindig kisebb erő keletkezik, csak a merőleges vetületet szabad figyelembe venni, azaz:

$$F = BIl \sin(\theta)$$



Fogalom	Mihez mérjük a szöget (α)?	Miért ez a függvény?
Erő (F)	A vezető szála és a B között.	Mert a párhuzamos rész nem hat, csak a merőleges. (Merőlegesnél $\sin(90) = 1$)
Fluxus (Φ)	A felület merőlegese (normálisa) és a B között.	Mert a normálissal párhuzamos rész halad át a felületen. (Párhuzamosnál $\cos(90) = 1$)

Reluktancia

- A reluktancia a fluxus útjának mágneses ellenállását jelenti;
- Ahogy az elektromos áramkörökben az ellenállás, úgy mágneses áramkörökben a reluktancia gátolja a mágneses fluxust
- A reluktancia szokásos jelölése R_m
- Analógia:

Elektromos kör

Feszültség (U)

Áramerősség (I)

Ellenállás (R)

Mágneses kör

Mágneses gerjesztés ($\theta = N \cdot I$)

Mágneses fluxus (Φ)

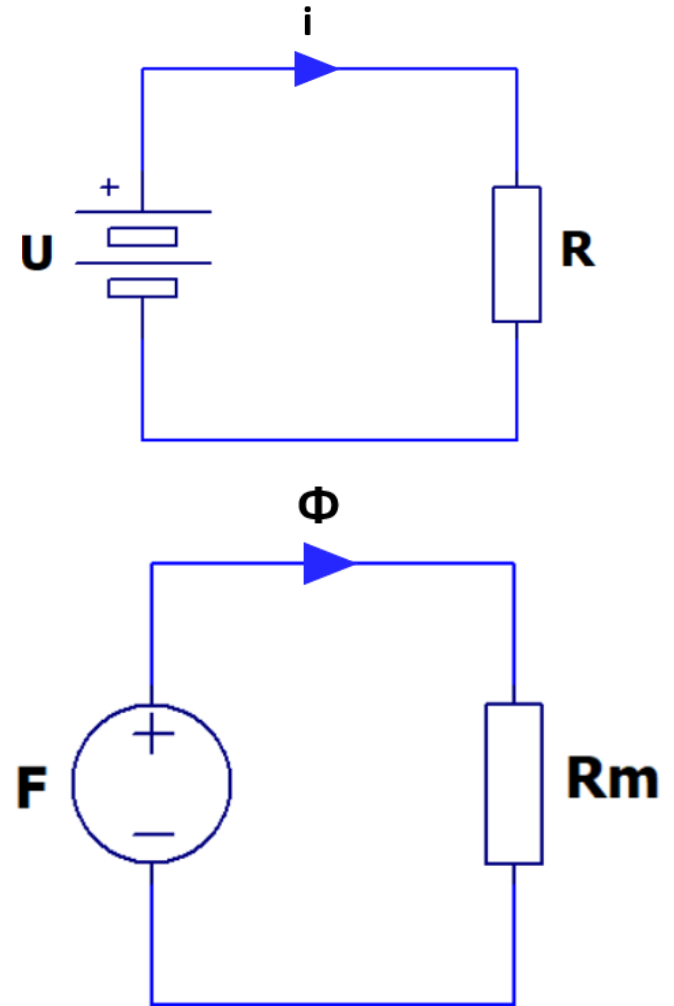
Reluktancia (R_m)

- Mágneses Ohm törvény:

$$\Phi = \frac{N \cdot I}{R_m}$$

- A reluktancia értéke az anyag tulajdonságaitól és a méreteitől függ:

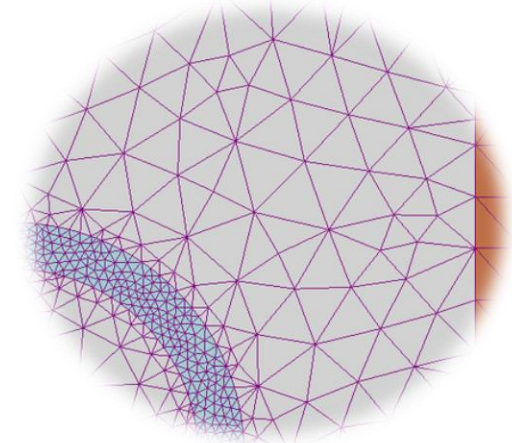
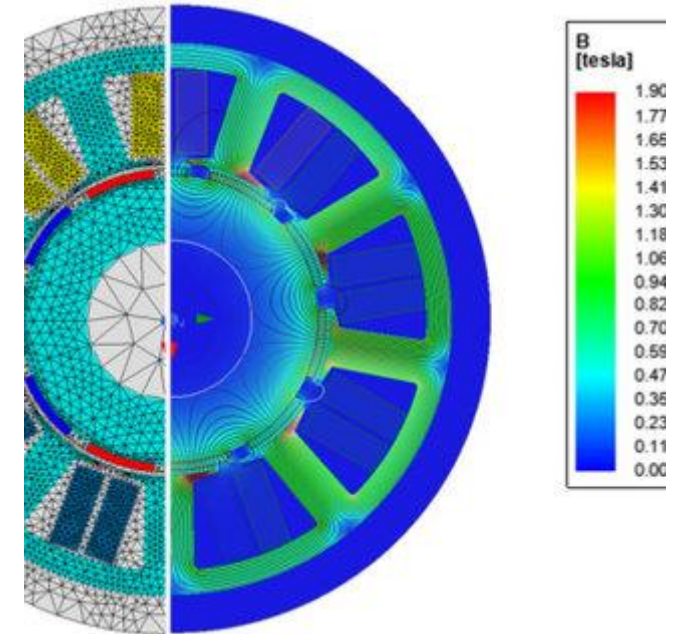
$$R_m = \frac{l}{\mu \cdot A} = \frac{l}{\mu_0 \cdot \mu_r \cdot A}$$



Végeselem szimuláció mágneskörök esetén

- Az elektromos és mágneses terek viselkedését a Maxwell egyenletek írják le:
 - Ezek megoldása valós esetekben „kézzel, papíron” nem kivitelezhető
 - Nemlineáris egyenletek (pl.: BH-karakterisztika)
- Végeselem szimuláció:
 - A geometriát véges számú elemre bontják (síkbeli problémáknál például háromszögekre vagy négyszögekre, térbeli esetben esetleg hasábokra vagy tetraéderekre)
 - Azokon a részeken, ahol a megoldás szempontjából kritikus lehet az eredmény, ott a háló „finomsága” sűrűbb, ahol pedig a változások várhatóan kisebb mértékűek lesznek, ott nagyobb méretű elemeket választanak

$$\begin{aligned}\nabla \times \vec{E} &= -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \\ \nabla \cdot \vec{E} &= \frac{\rho}{\epsilon_0} \\ \nabla \times \vec{B} &= \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} + \mu_0 \vec{J} \\ \nabla \cdot \vec{B} &= 0\end{aligned}$$



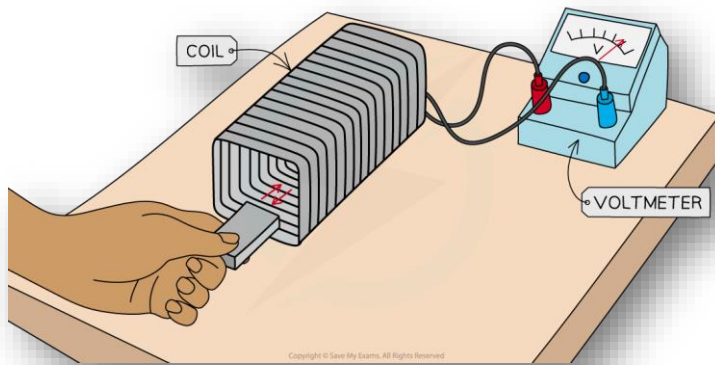
Forrás:
Researchgate,
wikipédia

Elektromágneses indukció

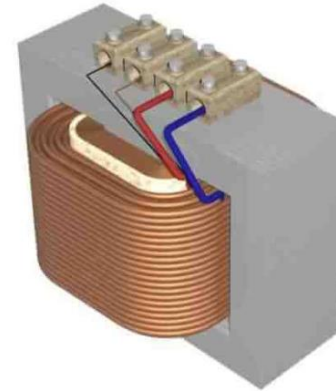
- A mágneses mezőben lezajló változásokkal kapcsolatos jelenségeket elektromágneses indukciónak nevezzük. Ennek vizsgálata Faraday nevéhez fűződik (1831)
- Az elektromágneses indukciónak több megjelenési formája is létezik



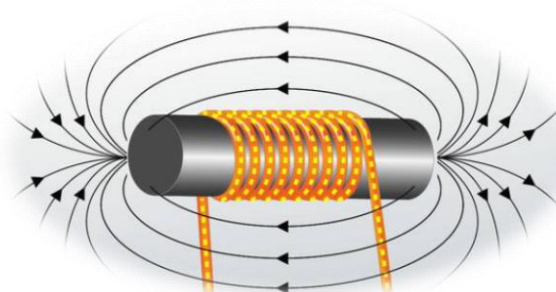
Mozgási indukció



Nyugalmi indukció



Önindukció



Kölcsönös indukció



Mozgási indukció

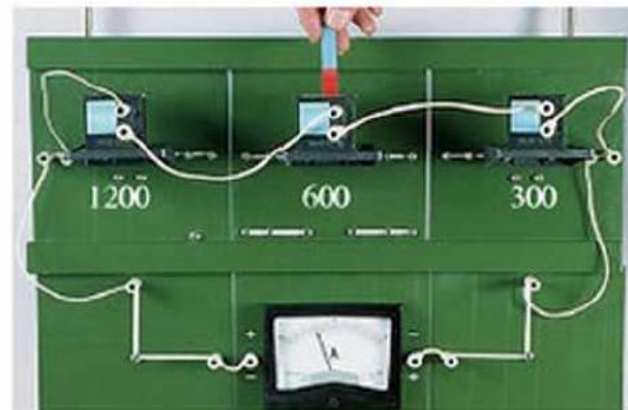
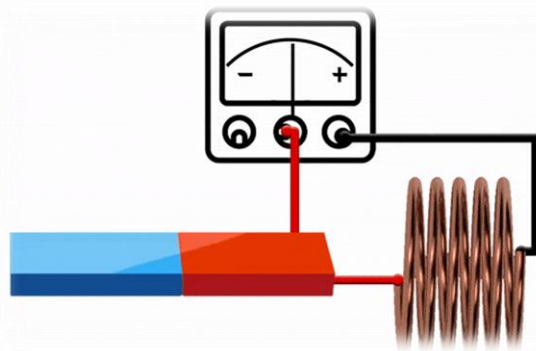
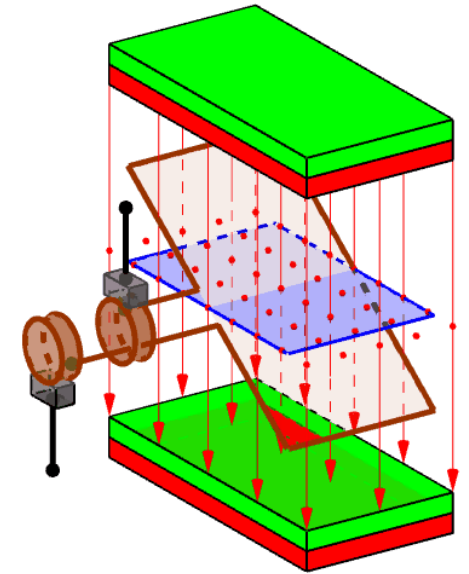
- Kísérlettel igazolható, ha valamely vezető a mágneses tér erővonalait metszi (mozog), a két vége közt feszültség, amennyiben zárt az áramkör, áram keletkezik
- Az így létrejött mennyiségeket indukált feszültségnek, illetve indukált áramnak nevezzük
- Az indukált feszültség nagysága függ az indukció nagyságától, a vezetőkeret hosszától, illetve a mozgás sebességétől

$$U_i = B \cdot l \cdot v$$

- Tekercsek esetén:

$$U_i = N \cdot B \cdot l \cdot v$$

- A korábbiakból megállapítva az indukált feszültség akkor a maximális ha a vezető merőleges az indukcióvonalakra (kék téglalap), amennyiben ez nem így van csak a merőleges irányba eső komponensét kell figyelembe venni!



Forrás:
netfizika.hu
Mozaik, Fizika 8

Az indukált feszültség iránya

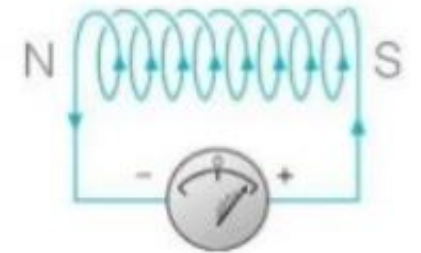
- Az indukált feszültség (áram) iránya mindig olyan, hogy akadályozza az őt létrehozó mozgást, változást (Lenz törvénye)
- Mit jelent ez?



1. eset: A mágnes közeledik a tekercs felé

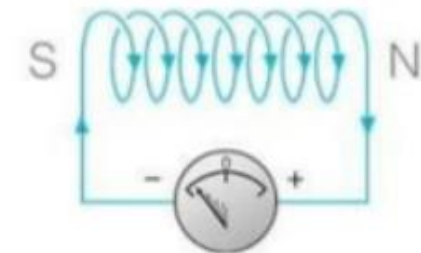
- A fluxus növekedni fog
- Olyan irányú áram keletkezik, hogy ellentétes legyen a fluxus növekedésével

Ez csak akkor lesz lehetséges, ha a tekercs „közeledő” oldala É-i polaritású lesz. Az azonos mágneses pólusok pedig taszítani fogják egymást. A tekercs polaritása a jobbkéz szabállyal állapítható meg (hüvelykujj É-i pólus a többi az áram iránya)



2. eset: A mágnes távolodik a tekercs felől

- A tekercssel való fluxuskapcsolódás csökken
- A tekercsben indukált feszültség keletkezik. Zárt áramkör esetén az áram mágneses teret hoz létre.

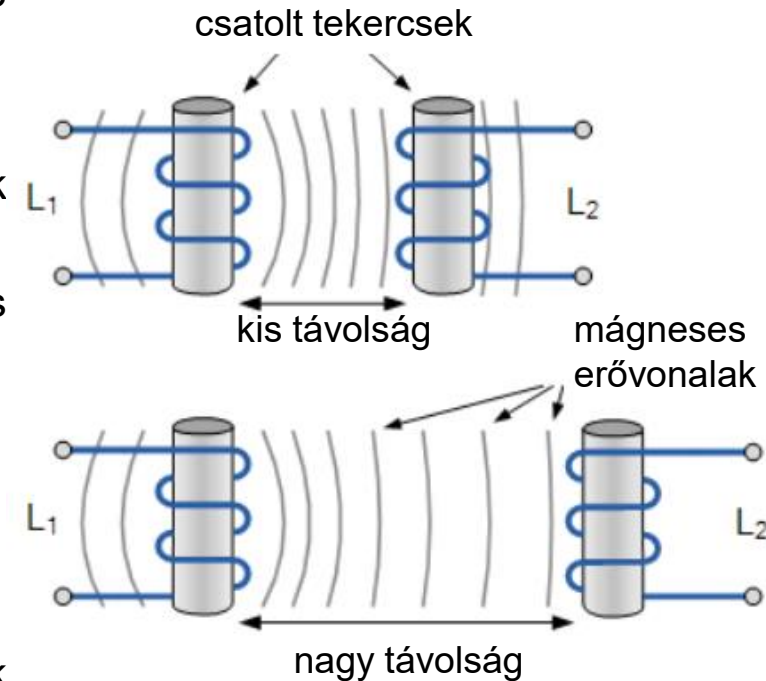


Lenz törvénye értelmében ez a létrehozott mágneses mező a kiváltó okával ellentétesen hat, azaz a mágneshez közelebbi tekercsvég déli polaritású lesz.

Nyugalmi indukció - csatolás

- Nyugalmi indukció akkor jön létre, ha egy álló vezető környezetében **időben változik** a mágneses mező (például egy elektromágnes áramát változtatjuk).
- Ebben az esetben a mágneses momentumok (tekercs vagy mágnes) nem mozognak, e helyett a fluxus (áram) változik, időben
- Ez a transzformátorok és a vezeték nélküli töltők működésének az alapja.
- Két rendszer csatolásban van ha egyiktől energia vihető át a másikba, vagyis az egyik által keltett indukciójel áthalad a másik tekercsen is
- A tekercsek között tehát definiálható egy csatolási tényező, mely megadja az kölcsönhatás mértékét
- A csatolás mértékét a k tényezővel jellemezzük, amelynek értéke 0 és 1 között mozoghat:
 - $k = 1$, tökéletes csatolás (minden erővonal közös)
 - $k = 0$, nincs csatolás (a tekercsek túl távol vannak egymástól)
 - $0 < k < 1$, szoros vagy laza csatolás
- A gyakorlatban a csatolás mindig egynél kisebb, ezzel a szórt mennyiségeket vesszük figyelembe
- Amikor két tekercs csatolásban van, az egyikben bekövetkező áramváltozás feszültséget indukál a másikban. Ezt az összefüggést az m (kölcsönös indukció) jellemzi:

$$M = k\sqrt{L_1L_2}$$



Önindukció

- Az önindukció a fizikának az a jelensége, amikor egy tekercs "saját magában" kelt feszültséget.
- Ez olyankor fordul elő, amikor a tekercsen átfolyó áram erőssége (időben) megváltozik, ami megváltoztatja a tekercs saját mágneses mezőjét is.
- Ez a folyamat a tehetetlenség elektromos megfelelője.
- Amikor egy tekercsben áram folyik, mágneses tér alakul ki körülötte. Ha ez az áram változik (növekszik vagy csökken), a tekercs belsejében a fluxus (Φ) is változni fog. A Faraday-féle indukciós törvény szerint azonban minden fluxusváltozás feszültséget indukál. Mivel ezt a fluxusváltozást a tekercs saját árama okozta, a jelenséget önindukciónak nevezzük.

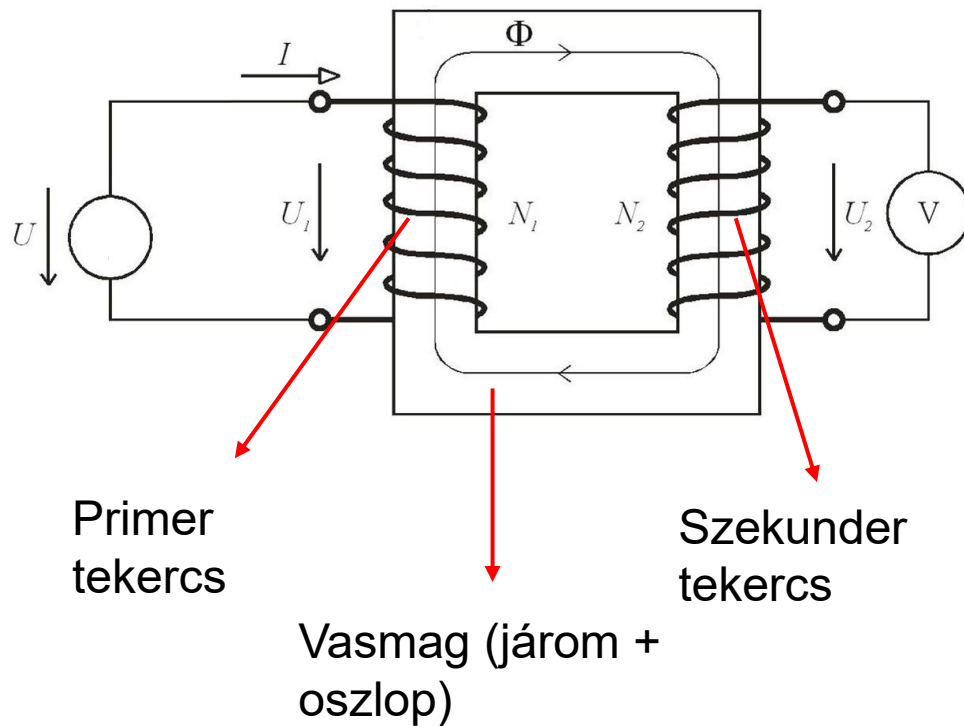
$$u_i = -\frac{d\psi}{dt} = -N \frac{d\Phi}{dt}$$
$$u_i = -N \frac{N}{R_m} \frac{di(t)}{dt} = -L \frac{dI}{dt}$$

- **Hol találkozunk ezzel a gyakorlatban?**

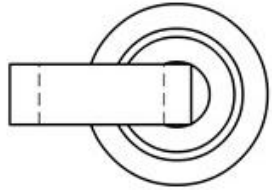
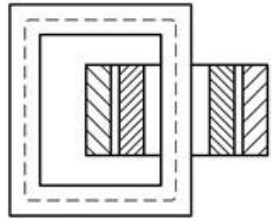
- **Fénycsőgyűjtő:** A régi típusú fénycsővekben egy tekercs (fojtótekercs) hirtelen megszakítása hozza létre azt a nagy feszültséglökést, ami begyűjtja a gázt.
- **Gyújtógyertya az autóban:** Az autó gyújtótrafója szintén az önindukció elvét használja: az alacsony feszültségű áram megszakításakor több tízezer voltos szikra keletkezik.
- **Relék védelme:** Amikor egy elektromágneses relét kikapcsolunk, az önindukció tönkretelheti a vezérlő elektronikát, ezért párhuzamosan egy védődiodát szoktak bekötni, ami "levezeti" ezt a hirtelen feszültséget.

Transzformátor felépítés

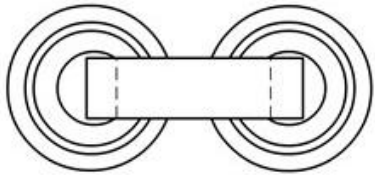
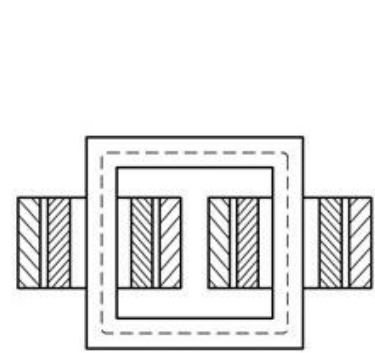
- A transzformátor a nyugalmi indukció elvén működő villamos gép, mely adott váltakozó feszültségű és áramú villamos teljesítményt más váltakozó feszültségű és áramú villamos teljesítménnyé alakít át
- Hatásfoka 95-99% (veszteségeket lásd később)
- Részei:



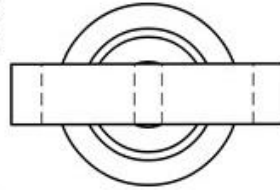
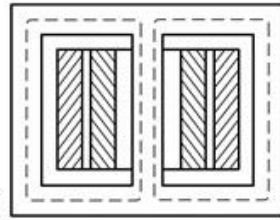
Transzformátor kialakítási lehetőségek



Láncszem típus



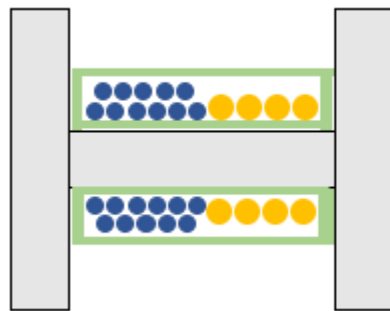
Mag típus



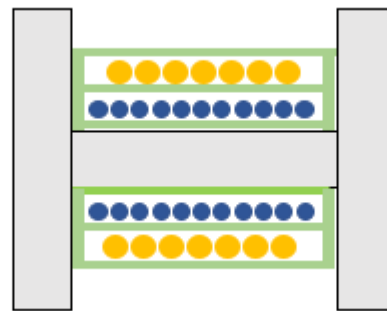
Köpeny típus



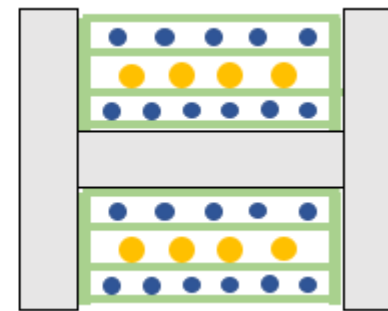
Toroid



Laza csatolás

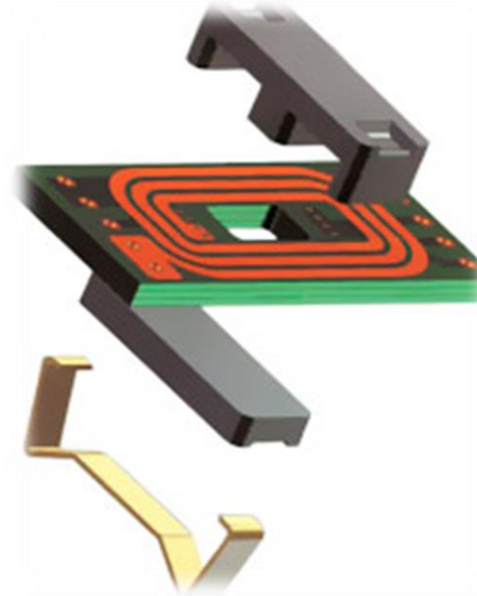
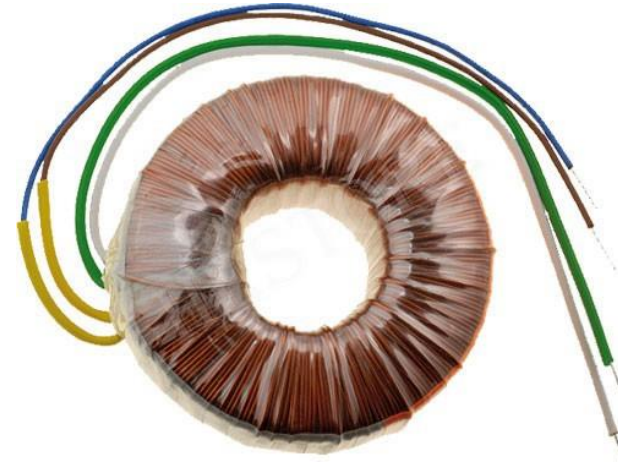
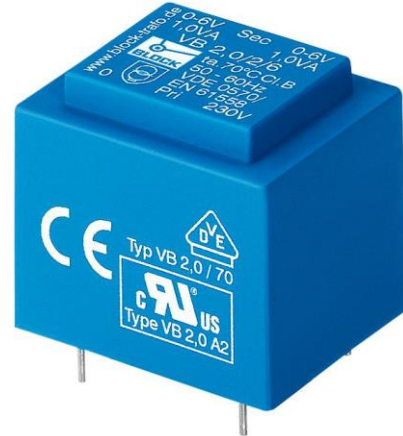


Szoros csatolás



Nagyon szoros csatolás

Transzformátorok a gyakorlatban



Transzformátor működési elve

- Vezessünk a primer tekercsbe váltakozó feszültséget. A korábbiaknak megfelelően ez változó fluxust hoz létre a vasmagban:

$$u_p(t) = N_p \frac{d\phi(t)}{dt}$$

- A változó fluxus hatására a szekunder tekercsben feszültség indukálódik, vagyis:

$$u_{sz}(t) = N_{sz} \frac{d\phi(t)}{dt}$$

- A szórásoktól eltekintve mindkét tekercs fluxusa ugyanaz, vagyis:

$$\frac{U_p}{U_{sz}} = \frac{N_p}{N_{sz}} = a$$

$$P_p = P_{sz}$$

$$U_p I_p = U_{sz} I_{sz}$$

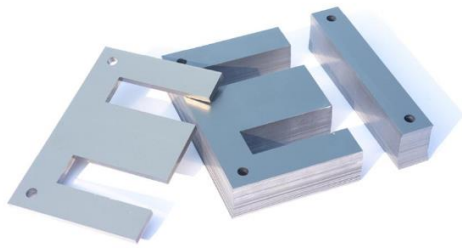
$$\frac{U_p}{U_{sz}} = \frac{I_{sz}}{I_p}$$

- Megállapítások:

- A menetszámok egyenesen arányosak a feszültségek arányával
- A feszültség (menetszám) fordítottan arányos az áramerősséggel. Ha például a primer oldalon nagyobb a feszültség, ahhoz kisebb áram tartozik, a szekunder oldalon pedig fordítva, mivel $P_p = P_{sz}$
- A transzformátor egyenáramról nem működik (az indukciót térben nem csak időben változik)!!

Transzformátor vasmag kialakítási lehetőségek

LEMEZELT
VASMAG
(LAMINATED)



VAS ALAPÚ
AMORF



POR MAGOK
(POWDER)



KERÁMIA
MAGOK
(FERRIT)



→
FREKVENCIA



Three-phase 200-V, 5-kVA,
50-Hz Transformer

Single-phase, 250-V, 5-kVA,
20-kHz Transformer

Forrás: researchgate.com

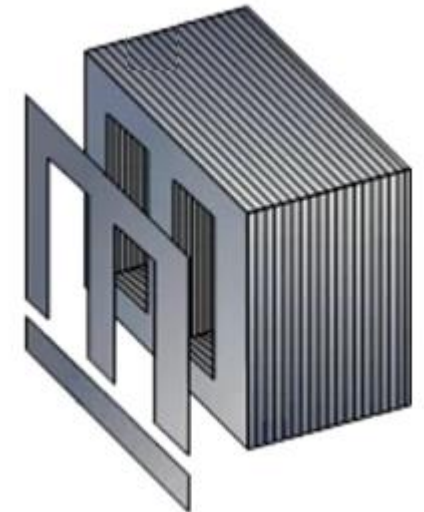
Lemezelt vasmag

- A hálózati frekvencia miatt ez a legelterjedtebb magtípus



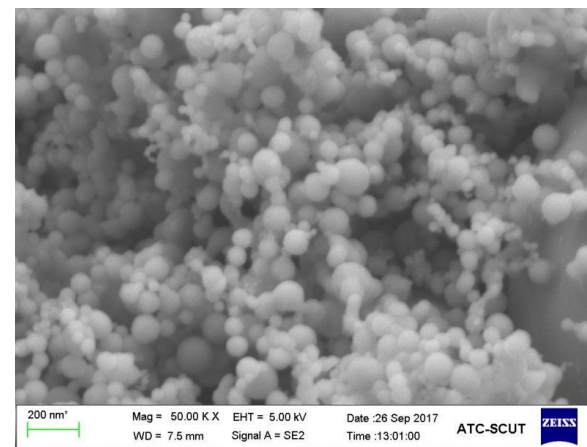
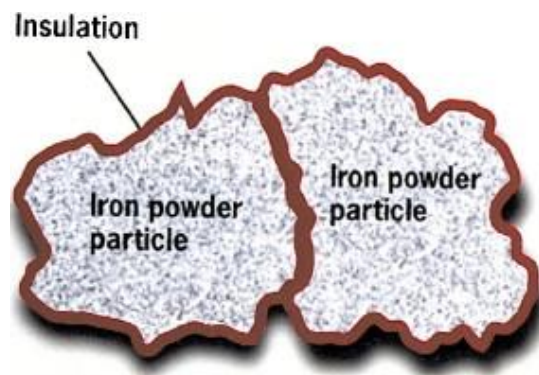
Így tehát jellemzően 50/60Hz-en alkalmazzuk, illetve alacsonyabb felharmonikusok esetén (néhány kHz)

- Két típust különböztetünk meg:
 - Szemcse orientál (Grain oriented) (alacsonyabb veszteség)
 - Nem szemcse orientált (Non grain oriented)
- Előnyök:
 - Viszonylag olcsó
 - Hegeszthető
 - 1,5 – 1,8T közötti maximális indukció (relatíve nagy)
 - Stabil a hőmérséklet függése
- Hátrányok:
 - Tömbösítés (lemezelés miatt)
 - Veszteségek (W/kg)
 - Zaj
 - Limitált frekvencia



Porvasmag

- Jellemzően magasabb frekvenciákra: Alapharmonikus kb. 10kHz-ig, felharmonikus kb. 50kHz-ig
- Technikai kivitele:
 - A vas maganyagot porrá őrlik, majd a szemcséket oxidálják. Az így kapott port kötőanyaggal keverik és nagy erővel formába tömörítik (a kötőanyag szigetelési funkciókat is ellát)
 - Az így kapott maganyag sokkal kisebb veszteségekkel rendelkezik, mint a „hagyományos” transzformátor lemezeknek
 - Minél kisebb a szemcse, annál jobb a veszteségi értékük
 - Ugyanakkor a szemcsék közötti hézag/rés befolyásolja a permeabilitást. Minél kisebb a hézag, annál „tömörebb” az vas, annál nagyobb a permeabilitása (μ_r)
 - Gyakran hivatkoznak rá „elosztott légréses” vasmagként (*distributed air gap core*)
 - Az „elosztott” légrés miatt később kerülnek telítésbe (Isd. későbbi dia)
- A piacon rengeteg porvasmag típus rendelkezésre áll, különböző márkanevek alatt.

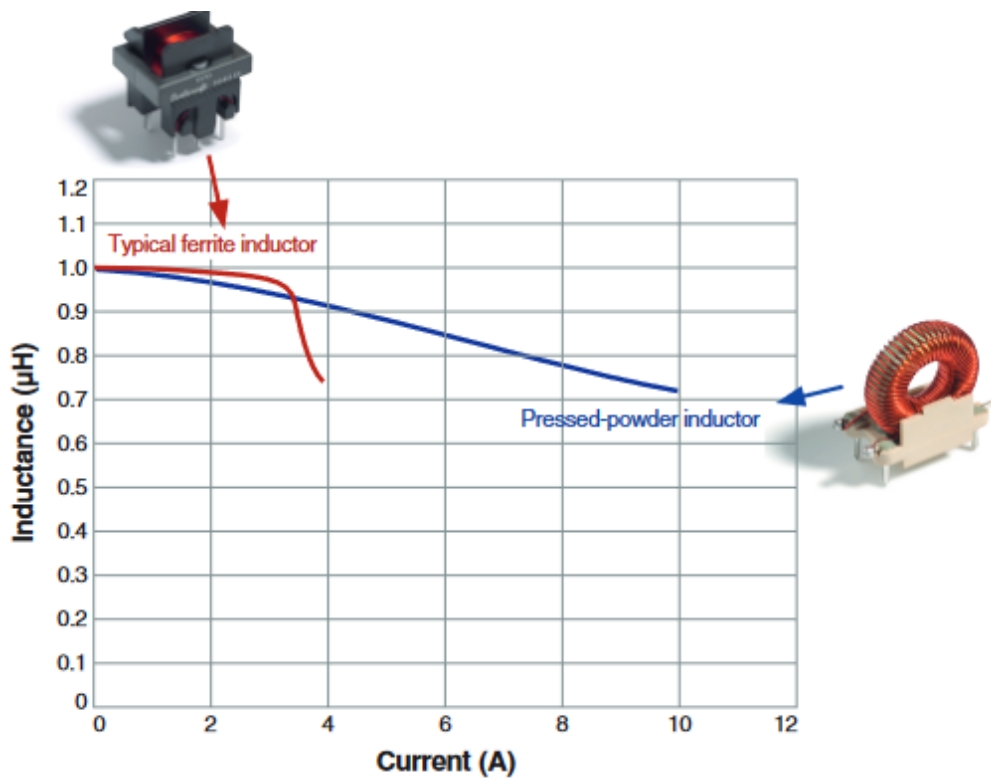


Ferritmagok

- A ferritek polikristályos kerámiák, melyek vas-oxidból állnak. Ehhez oxidokat vagy karbonátokat kevernek hozzá:
 - mangán (Mn)
 - nikkell (Ni)
 - cink (Zn)
- Az anyagokat préselik, majd kiégetik
- A fémek oxidjait (azaz a fénoxidokat) kerámiának nevezik, innen név
- Előnyök:
 - A legtöbb kerámia nagy ellenállású szigetelő, ami csökkenti az örvényáramokat
 - Nagy permeabilitással rendelkeznek (tipikusan $\mu_r=40\dots 10000$)
- Hátrány:
 - Kis mágneses indukció (jellemzően $< 0,5T$)
 - Könnyen törnek
- Magasfrekvenciás alkalmazás esetén (jellemzően RF (kHz és MHz-es tartomány), mivel a vesztesége magasabb frekvencián relatíve alacsony
- Tipikusan kapcsolóüzemű tápegységek nagyfrekvenciás transzformátoraihoz, szűrő és hangoló tekercsekhez használatos, jellemzően a teljesítményelektronikában



Porvasmag és ferritmag összehasonlítása



Porvasmag	Tulajdonság	Ferrit
Viszonylag alacsony	Permeabilitás (μ_r)	Viszonylag magas
Viszonylag nagy magveszteség nagy fluxussűrűség esetén	Magveszteség (P_v)	Viszonylag alacsony magveszteség nagy fluxussűrűség esetén
Lágy telítési jellemzők (soft saturation)	Egyéb	Törékeny (pl.: sarkok)

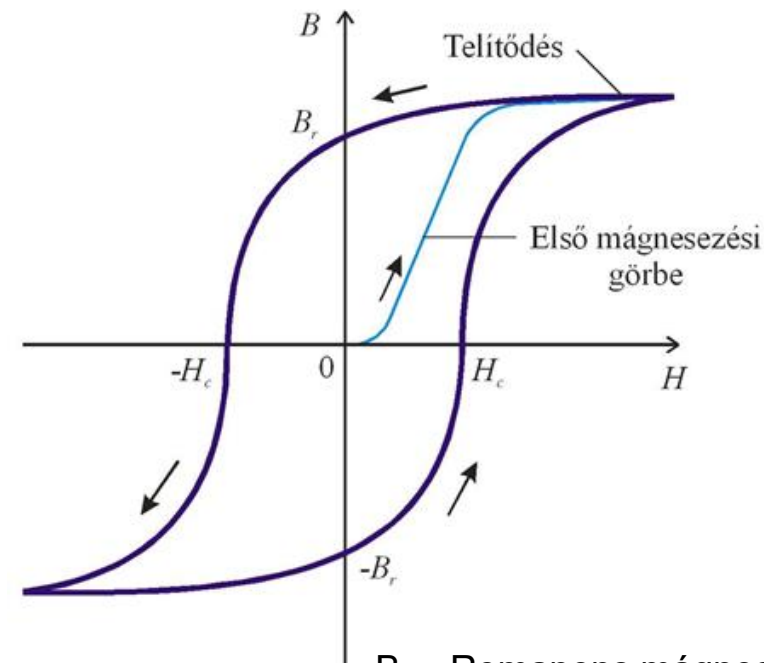
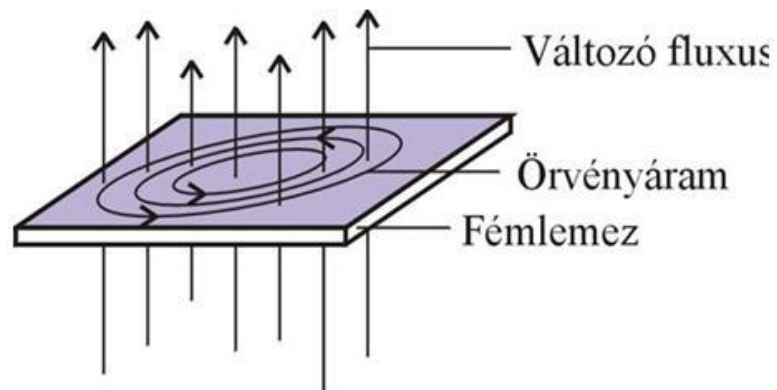
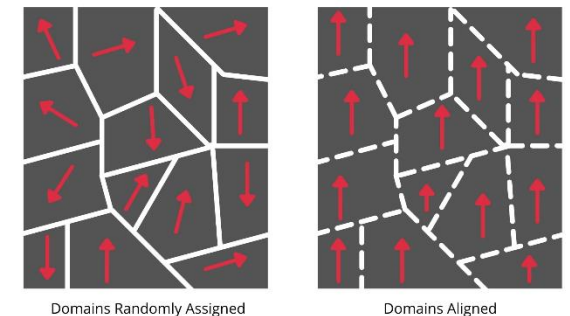
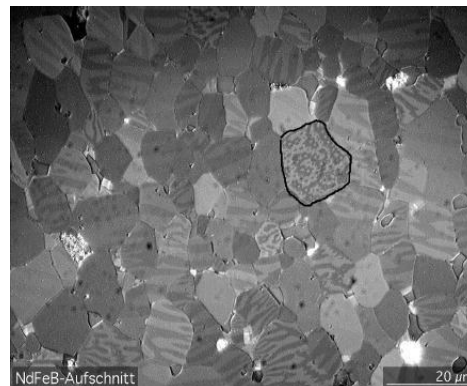
Vasmagok veszteségei

- A vasveszteség két részből áll:

$$P_{Vas} = P_{hiszt} + P_{\text{örvény}}$$

- Hiszterézis veszteség:** A vasban lévő molekuláris mágnesek (elemi mágnesek) a váltakozó mágneses tér hatására folyamatosan irányba akarnak állni. A veszteség nagysága az anyagtól, frekvenciától és a maximális indukciótól függ.

- Örvényáramú veszteség:** Mivel a vasmag fémből van, vezeti az áramot. A változó mágneses fluxus a vasmag belsejében is feszültséget indukál (mint egy egymenetes tekercsben). Mivel a vas keresztmetszete nagy, az ellenállása kicsi, így hatalmas áramok tudnának körbe-körbe folyni, ami nagyon felmelegítené a vasat. Csökkenthető a paket vastagságának csökkentésével. A lemezeket egymástól szigetelni kell (lakkozás)!

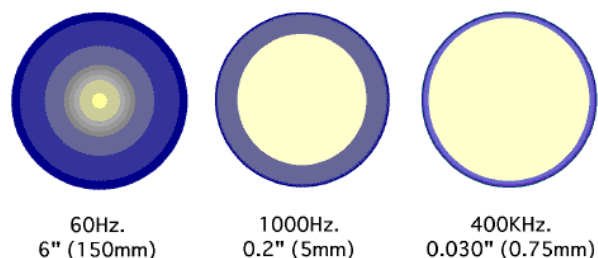


B_r – Remanens mágnesesség
 H_c – Koercitív térerősség

Tekercselés veszteségei

- A tekercselés fontos paramétere az áramsűrűség, mely a tekercselő huzal keresztmetszeti paraméterével van szoros összefüggésben
- Tervezés során jó kiindulóérték lehet a $3 - 5 \text{ A/mm}^2$ (alkalmazástól függ)
- A tekercselés további fontos jellemzője a DC ellenállás, mely tipikusan $\text{m}\Omega$ nagyságrendű (négyponthoz ellenállásmérés, $\text{m}\Omega$ méter)
- Magasabb frekvencián a mágnescsőben található vezető nem vezet teljes keresztmetszetében:

Szkinhatás



Frekvencia	Behatolási mélység		
	Acél	Réz	Ón
50 Hz	1,00 mm	9,30 mm	24,00 mm
150 kHz	0,22 mm	0,17 mm	0,44 mm
30 MHz	41,00 μm	12,00 μm	31,00 μm
1 Ghz	7,10 μm	2,10 μm	5,40 μm

Közelségi hatás

