KISÉRLETI FIZIKA

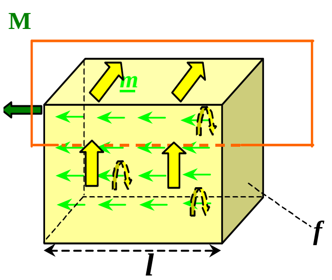
Elektrodinamika

6. (III.18- IV.8.)

Mágneses anyagok

Ferromágneses anyagok: (Fe, Ni, CoSm ,…)
Rendelkeznek mágneses dipólmomentummal.

Mágneses dipólok - köráram ekvivalensek !
$\underline{M}$ = $\underline{m}$ /V mágneses momentumsűrűség /mágnesezettség/,
I_P ($\underline{M}$-mel) ekvivalens (Polarizációs) áram, ill. $\underline{j}_P$ áramsűrűség



$M = m/V$
$m = I f$

$V = f l$

$\oint \underline{M}\, d\underline{s} = I_P$, mert

$$\oint \underline{M}\, d\underline{s} = M\, l = \frac{m}{V} l = \frac{I\, f}{V} l = I_P$$

A kis köráramok belső eredői kioltják egymást, s ezért egy egyesített, nagy-felületű (f) köráramnak (I_P) tekinthető a mágnes.
(A nagyáramkör árama egyenlő az elemi köráramok áramával!)

$$\boxed{\oint M d\underline{s} = I_P} \qquad \boxed{\mathbf{rot}\ \underline{\mathbf{M}} = \underline{\mathbf{j}}_P}$$

$$\boxed{\oint \underline{B}\, d\underline{s} = \mu_o (I_{szab.} + I_P)} \qquad \boxed{\mathbf{rot}\ \underline{\mathbf{B}} = \mu_o\, \underline{\mathbf{j}}_{\ddot{o}sszes}}$$

$$\boxed{\oint \underline{H}\, d\underline{s} = I_{szab.}} \qquad \boxed{\mathbf{rot}\ \underline{\mathbf{H}} = \underline{\mathbf{j}}_{szabad}}$$

$$\underline{\mathbf{H}} = (1/\mu_o)\, \underline{\mathbf{B}} - \underline{\mathbf{M}}$$

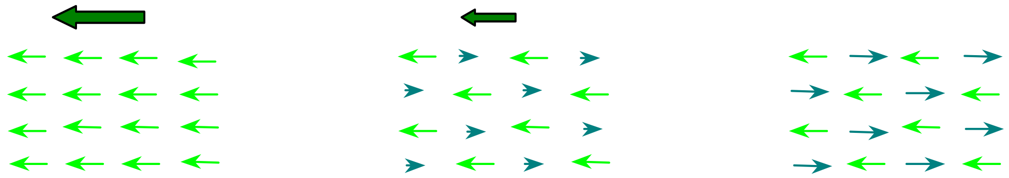
$\underline{\mathbf{B}} = (\mu_r\, \mu_o)\underline{\mathbf{H}}$ *(korlátozottan, lineáris közelítésben !)*

$\underline{\mathbf{M}} = \chi\, \underline{\mathbf{H}}$ χ_M */mágneses/ **szuszceptibilitás***
$\mu_r = 1 + \chi$

- *$\mu_r > 1$ paramágnesség ($\chi_M > 0$)*
- *$\mu_r < 1$ diamágnesség ($\chi_M < 0$)*
- *extrém anyag a szupravezető, amelynél $\mu_r = 0$*
  (azaz tökéletes diamágnes ($\chi = -1$), mert $\underline{B} = 0$)
- *$\mu_r >> 1$ ferromágnesség* (munkahipotézis)

Ferromágneses anyag:

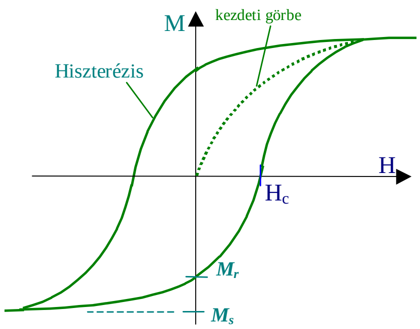
-Ferromágnes,	-ferrimágnes,	-antiferromágnes,
$\underline{M}$	$\underline{M}$	$\underline{M} = 0$



Fe, Co, Ni CoSm,	ferritek	MnO_2

$$\underline{B} = \mu_o(\underline{H} + \underline{M})$$

Mágnesezettség:

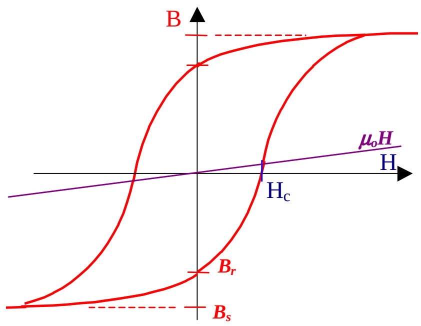


H_c koercitív erő

M_r remanens mágnesezettség

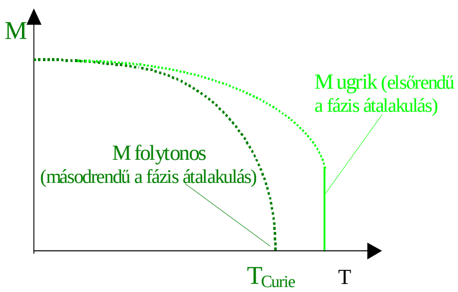
M_S telítési (szaturációs) mágnesezettség

Indukció

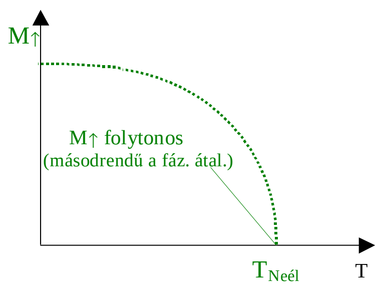


Mágneses fázisátalakulások (hőmérsékletfüggések):

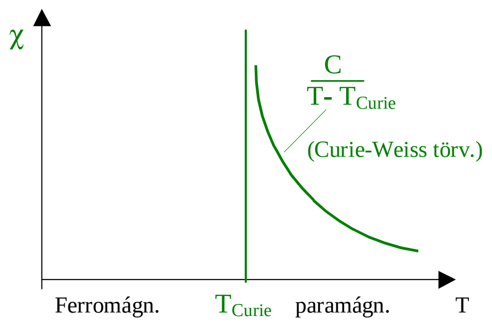
Ferromágneses :

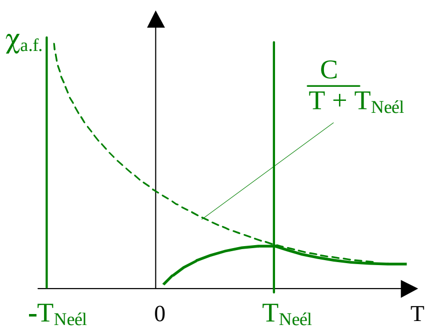


Antiferromágneses:



$$\chi = \frac{M}{H} = \frac{\partial M}{\partial H}$$



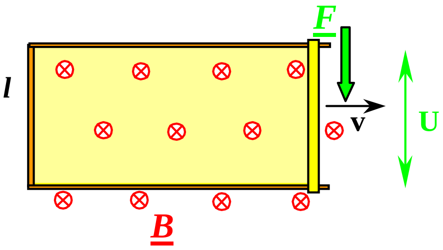


Indukció I. (mozgási indukció):

a) Az egyik eset: homogén mágneses térben egy vezeték mozog
(Egy keret egyik oldala (l) mozog, a többi áll. Merőleges elrendezés).

A Lorentz erő miatt a rendszer nem konzervatív $\oint \underline{E}\, d\underline{s} \neq 0$:

$$\underline{\boldsymbol{F}} = \boldsymbol{q}\, (\underline{\mathbf{v}} \times \underline{\boldsymbol{B}})$$



$$W = \int F_L\, ds = F\, l = (q\, v\, B)\, l$$

$$U = W/q = B\, l\, v$$

Mintha egy $\boldsymbol{U = B\, l\, v}$ feszültségű telep lenne bekapcsolva. Ezt hívjuk indukált feszültségnek.

$$U_i = \int E\, ds = F\, l = B\, l\, v = B\, l \frac{ds}{dt} =$$

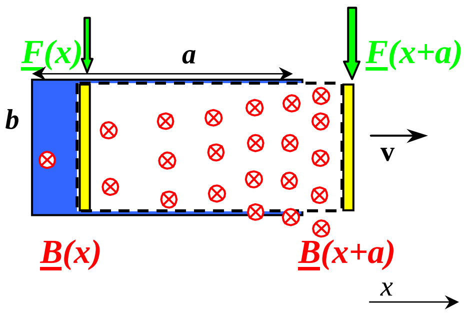
$$= B \frac{dls}{dt} = B \frac{dA}{dt}$$

$$\int \frac{F}{q} ds = \int E\, ds \Rightarrow \quad \oint \underline{E}\, d\underline{s} = -\frac{d \iint \underline{B}\, d\underline{A}}{dt} = -\frac{d\Phi}{dt} = U_i$$

$\Phi = \int \underline{B}\, d\underline{A}$ a mágneses fluxus.

b) A másik eset: inhomogén mágneses térben mozog két (b szélességű) vezeték.

$$\underline{\boldsymbol{F}} = \boldsymbol{q}\, (\underline{\mathbf{v}} \times \underline{\boldsymbol{B}})$$



$$W = \oint \underline{F}\, d\underline{s} = \big(q\, v\, B(x+a) - qvB(x)\big) b =$$

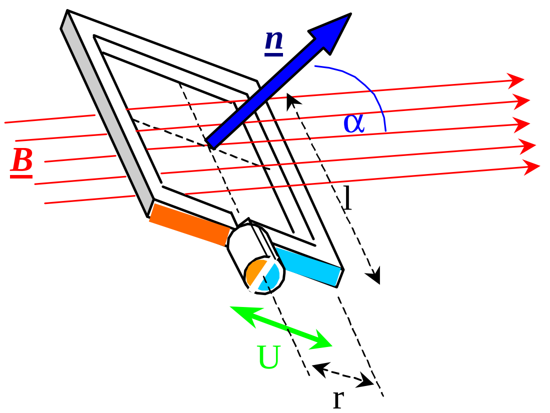
$$= q \frac{\Delta x \big(B(x+a) - B(x)\big)}{\Delta t} b =$$

$$= q \frac{\Delta \int_0^b \int_0^a B(x)\, dx dy}{\Delta t}$$

$$U = W/q = d \iint \underline{B} d\underline{A} / dt; \quad \left(v = \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{a}{t}\right)$$

$$U_i = -\frac{d\Phi}{dt}$$

c) harmadik eset. A tér állandó és a keret forog.



Nem merőleges, hanem folyamatosan változó szögű (forgó) elrendezés, (homogén a tér):

$$\Phi = \int \underline{B}\, d\underline{A} = \underline{B}\, \underline{A} = B\, A \cos\alpha$$

(α:.a $\underline{B}$ és az $\underline{A}$ ($\underline{n}$) által bezárt szög:
α = ωt , v = rω, f = 2r l)

$$U_i = -\frac{d\Phi}{dt} = -B\, A \frac{d(\cos \omega t)}{dt}$$

$$\boldsymbol{U_i = B\, l\, (2r\, \omega) \sin \omega t}$$

Váltakozó áram.

Generátor: esetleg nemcsak egy menet, hanem egész tekercs forog
Ezen az elven működnek a nagy erőművek.

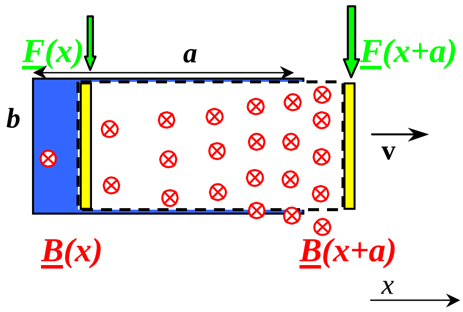
Indukció II. (nyugalmi indukció):

Generátor - tekercs forog, a mágneses tér áll (fent).
Bicikli generátor - tekercs áll, a mágnes forog
(ez új, ez nincs benne, az eddigi egyenletekben)!

α) Mágneses tér és egy teljes (nem forgó) keret.
A tér áll (és inhomogén), a keret (A= ab, egyenes vonalúan egyenletesen) mozog.

Mint fent láttuk: $U_i = -\frac{d\Phi}{dt}$

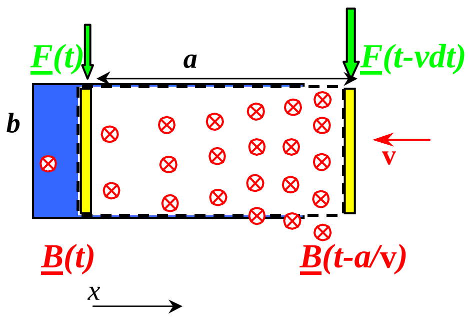
$\underline{F} = q\,(\underline{v} \times \underline{B})$



$$\oint \underline{F}\, d\underline{s} = \int_0^b q v \left(B(x+a) - B(x)\right) dy =$$
$$= qv\left(B(x+a) - B(x)\right) b =$$
$$= \frac{q\left(B(x+a) - B(x)\right) ab}{t}$$
$$= q\frac{\left(\Delta B(x)\right) A}{\Delta t} = q\frac{d\,(B\,A)}{dt}; \quad (v = a/t)$$

β) Ugyanezt a kerettel együttmozgó koordináta-rendszerből szemlélve (relativitás elv), a keret áll és a tér változik (időben) (nem lehet más a végeredmény):

A B tér időben (egyenletesen) változik



$$\oint \underline{E}\, d\underline{s} = -\frac{d\int \underline{B}\, d\underline{A}}{dt} = -\frac{d\Phi}{dt} = U_i$$

, de most a fluxus a B miatt változik,
(s a keret geometriája A változatlan)!

$$\oint \underline{E}\, d\underline{s} = -\frac{\partial \underline{B}}{\partial t} A = -\frac{\left(\Delta B(t)\right) A}{\Delta t} = U_i$$

Ez a ***nyugalmi*** indukció:

$$rot\, \underline{E} = -\frac{\partial \underline{B}}{\partial t}$$

Ez egy új egyenlet!

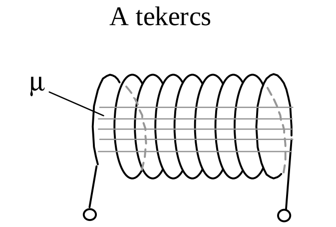
$$\boxed{\oiint \underline{D}\, d\underline{A} = Q} \qquad \boxed{\textbf{div}\, \underline{\mathbf{D}} = \rho}$$

$$\boxed{\oint \underline{E}\, d\underline{s} = -\frac{d\iint \underline{B}\, d\underline{A}}{dt}} \qquad \boxed{\textbf{rot}\, \underline{\mathbf{E}} = -\partial \underline{\mathbf{B}} / \partial t}$$

$$\boxed{\oint \underline{H}\, d\underline{s} = I} \qquad \boxed{\textbf{rot}\, \underline{\mathbf{H}} = \underline{\mathbf{i}}}$$

$$\boxed{\oiint \underline{B}\, d\underline{A} = 0} \qquad \boxed{\textbf{div}\, \underline{\mathbf{B}} = \underline{\mathbf{0}}}$$

Új eszköz a tekercs:

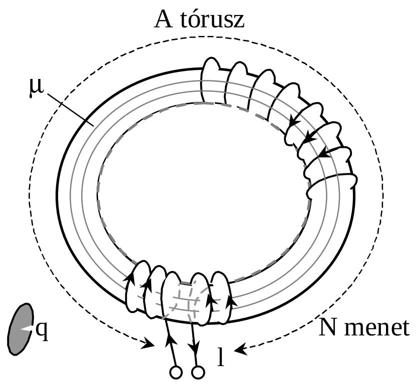


$$U_i \sim \frac{dB}{dt} \qquad \mathrm{B \sim H \sim I} \quad \Rightarrow \; U_i \sim \frac{dI}{dt}$$

$$U_i = -L\frac{dI}{dt}$$

L az önindukciós együttható.

Tórusz (toroid) önindukciós együtthatója:



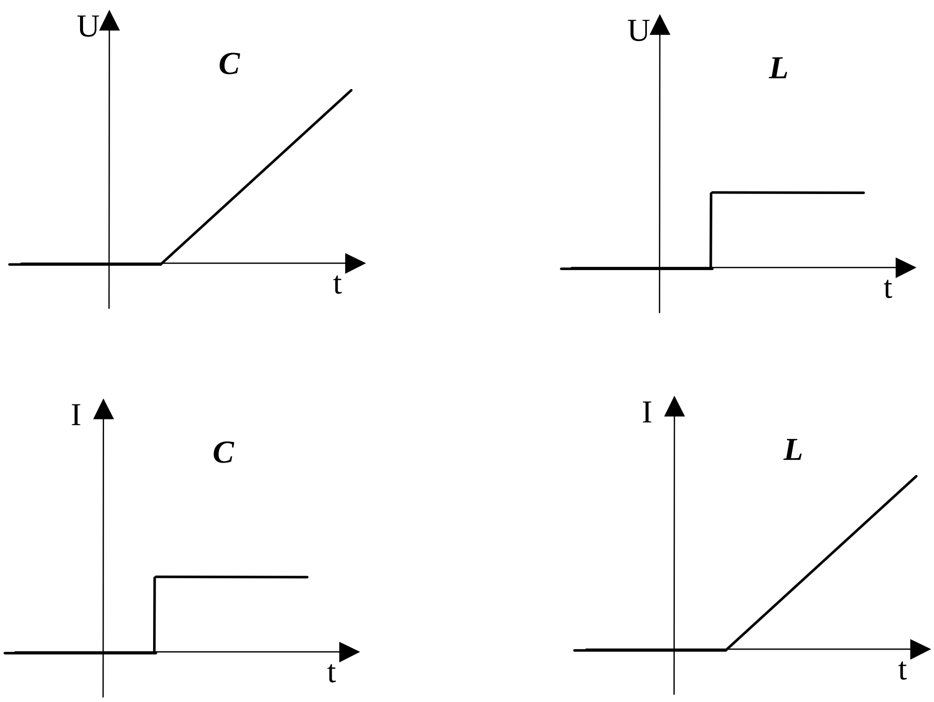
$$\oint \underline{B}\, d\underline{s} = Bl = \mu_r \mu_o\, I\, N \Rightarrow B = \mu_r \mu_o \frac{NI}{l}$$

$$\Phi = \int \underline{B}\, d\underline{A} = \underline{B}\, \underline{A} = B\, Nq$$

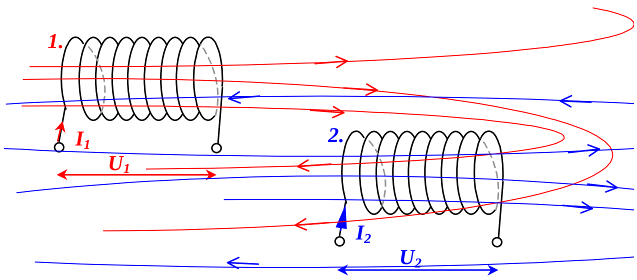
$$U_i = -\frac{dI}{dt}(Nq) = -\mu_r \mu_o \frac{N^2 \frac{dI}{dt}}{l} q$$

$$L = \mu_r \mu_o \frac{N^2}{l} q$$

Kondenzátor (C) és a tekercs (L) összehasonlítása:



Kölcsönös indukció és transzformátor



$$U_1 = L_{11}\frac{dI_1}{dt} + L_{12}\frac{dI_2}{dt}$$

$$U_2 = L_{21}\frac{dI_1}{dt} + L_{22}\frac{dI_2}{dt}$$

$\boldsymbol{L_{12} = L_{21}}$ köcsönös indukciós együttható.

Ha az 1. tekercs minden fluxusa átmegy a 2. tekercsen és fordítva, akkor ideális a transzformátor, és ekkor a kölcsönös idukciós együttható: $L_{21} = L_{12} = \sqrt{L_{11}\,L_{22}}$.
Primer tekercs (1.), szekundertekercs (2.).
Ha kicsi a terhelés, akkor a szekunder tekercsen $I_2 \approx 0$

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{L_{11}}{L_{12}} = \frac{L_{11}}{\sqrt{L_{11}\,L_{22}}} = \sqrt{\frac{L_{11}}{L_{22}}}$$

, de $L_{11} \sim N_1^2$; $L_{22} \sim N_2^2$, ezért:

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2}$$

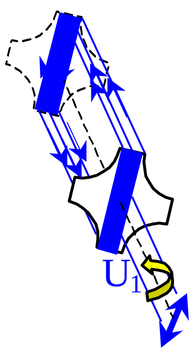
A tekercs egyenáramú viselkedése.
Lenz törvény. Örvényáramok.

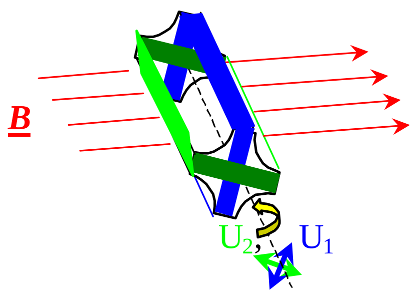
Hálózat, váltóáramú generátorok:

Ha a mágnes forog az (álló) tekercs előtt: kerékpár dinamó ⇒ váltakozó áram lesz

$$U = U_o \sin \omega t$$

Általában fordítva van, a keret (sok keret, azaz tekercs) forog álló mágnesek előtt.

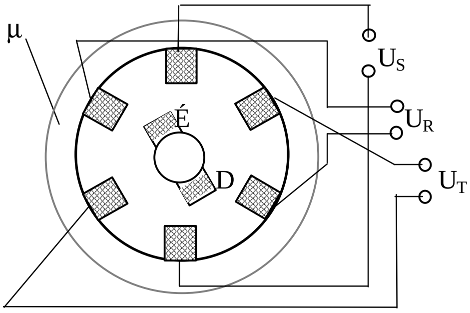




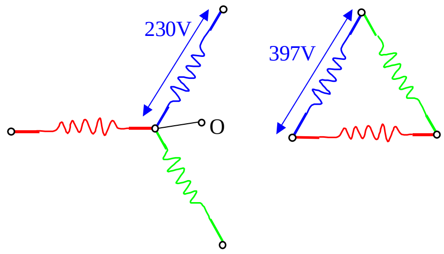
Két (egymásra merőleges) keretben már két feszültség (U_1, U_2) indukálódik (90^o fáziskéséssel).

Három 120 ^{o} fokkal elfogatott tekercs, három fázisú generátor elve:

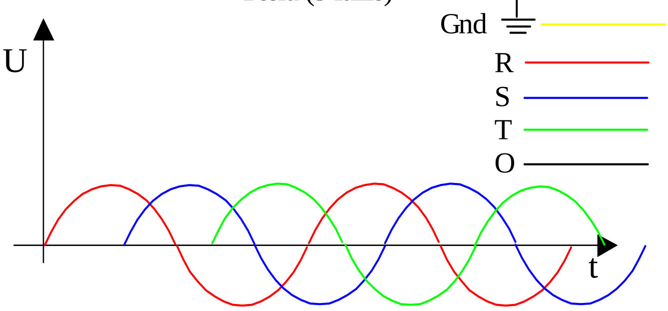
Háromfázisú generátor



Csillag (✫) és Delta (Δ) kapcsolások

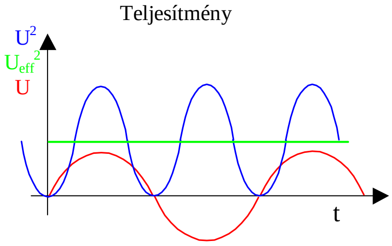


Tesla (3 fázis)



Váltóáramú hálózat:

Teljesítmény



$$U = U_o \sin \omega t\,;$$

A teljesítmény: $P = \dfrac{U^2}{R} = \dfrac{(U_o \sin \omega t)^2}{R}$ /időfüggő/.

Az átlagteljesítmény: $\overline{P} = \dfrac{U_o{}^2}{R}\overline{(\sin \omega t)^2} = \dfrac{U_{eff}{}^2}{R} = = \dfrac{U_o{}^2}{R}\dfrac{1}{2} = \dfrac{\left(U_o/\sqrt{2}\right)^2}{R}$

$U_{eff} = U_o/\sqrt{2}$ effektív feszültség: $\boldsymbol{U_{eff.} = 230\ V}$

Három fázisú hálózat:

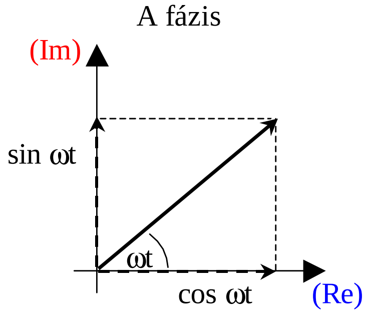
$$U_R = U_o \sin(\omega t - 2\pi/3);\quad U_S = U_o \sin \omega t\,;\ U_T = U_o \sin(\omega t + 2\pi/3)$$

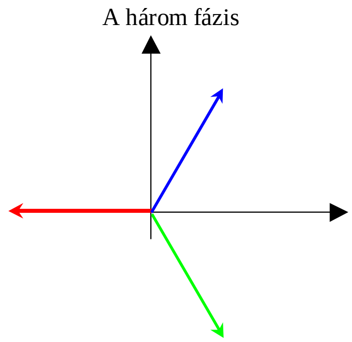
$$U_R + U_S + U_T = U_o \sin \omega t \{\cos(-2\pi/3) + \cos 0 + \cos(-2\pi/3)\} =$$
$$= U_o \sin \omega t \{-1/2 + 1 - 1/2\} = 0$$

$$U_T - U_R = U_o [\sin(\omega t + 2\pi/3) - \sin(\omega t - 2\pi/3)]$$
$$= U_o [\sin \omega t \{\cos(+2\pi/3) - \cos(-2\pi/3)\} + \cos \omega t \{\sin(+2\pi/3) - \sin(-2\pi/3)\}] =$$
$$= U_o [\cos \omega t \{2 \sin(2\pi/3)\}] = \left(\sqrt{3} U_o\right) \cos \omega t$$

$\boldsymbol{\sqrt{3}\, U_o = 397\ V}$

A fáziskülönbség állandó (⅔π) :



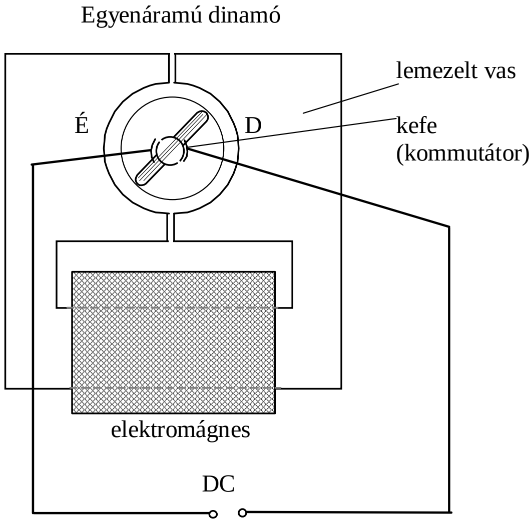


Komplex az ábrázolás, mert két dimenzió van (az amplitudó /U_o/ és a fázis).

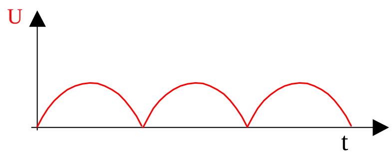
$$i\,\sin\omega t = \frac{e^{i\omega t} - e^{-i\omega t}}{2} = Im\left[e^{i\omega t}\right] \quad ; \quad \cos\omega t = \frac{e^{i\omega t} + e^{-i\omega t}}{2} = Re\left[e^{i\omega t}\right]$$

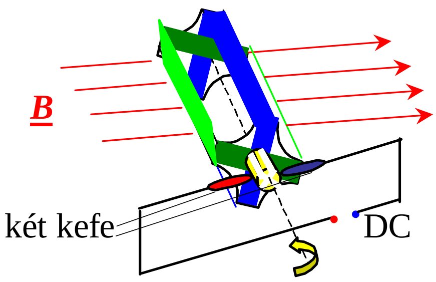
$$e^{i\omega t} = \cos\omega t + i\,\sin\omega t$$

Egyenáramú generátorok:



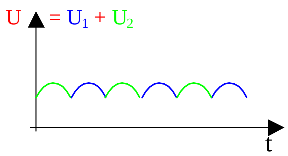
Lüktető „egyen"áram:

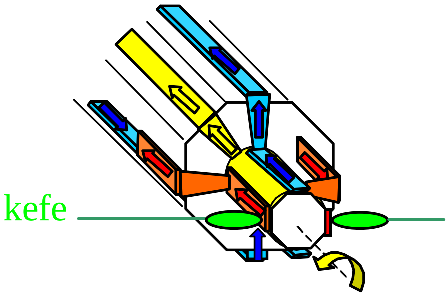




Két tekercs, kétpár kommutátor.

Kéttekercs együttes lüktetőárama:





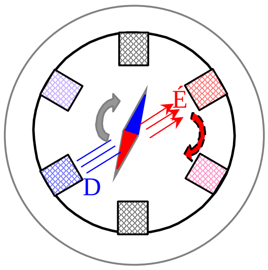
Sok tekercs, sok kommutátor, elhanyagolható „lüktetés” , azaz egyenáram.

Villanymotorok

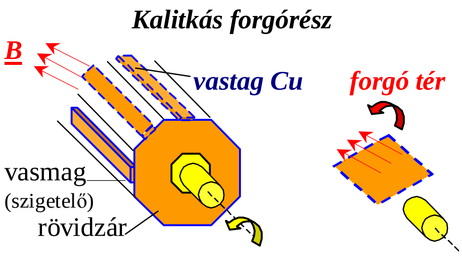
1.) Váltóáramú motorok

a) Háromfázisú motor

Forgó mágneses tér



A három fázist (R, S, T) a három tekercspárra kötve forgó mágneses teret kapunk, amelyet az iránytű forgással követ.



A motorban nem iránytűre, hanem az indukált áramra hat a forgatónyomaték.

Az aszinkron motoroknál a mezővel együttforgó keretben nem indukálódik áram, ezért ekkor nincs forgatónyomaték. A súrlódás és főképp a külső terhelés miatt a keret lemarad a tértől, ezért az aszinkronban lesz. A növekvő terheléssel nő a lemaradás (a slip) (csökken a fordulatszám), de nő az indukált áram, s így a fogatónyomaték is.
Nagy az inditónyomaték és terhelésfüggetlen a fordulatszám, csak 1-3 %-os a lemaradás.
Tipikusan 50 Hz -es(= 3000 ford/perc) váltóáramnál 2950 ford/perc a fordulatszám.

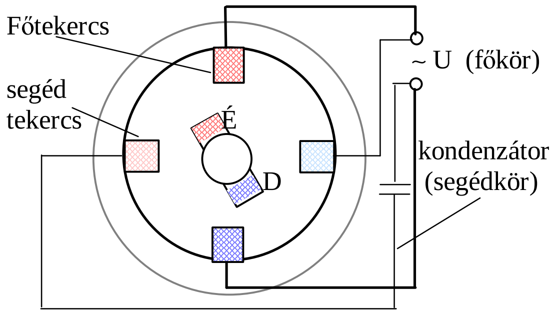
b) Egyfázisú motorok

A mágneses tér és az indukált áram is oszcillál egyfázisú váltóáramú gejesztéskor (nem forog). Forgatáshoz ezt módosítani kell, mert a forgatónyomaték nem oszcillálhat.

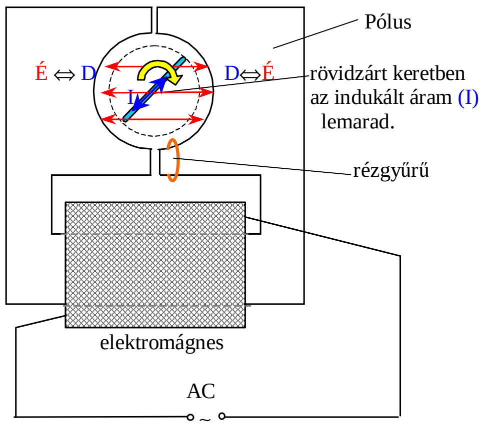
α) Segédfázis

A forgó mágneses teret állítunk elő egy segéd tekercspárral, melyet a segédáramkörbe tett segédkondenzátor (esetleg segédtekercs) 90^o -os fázistolását kihaszálva kapunk.

Segédfázisú forgótér



Egyfázisú tojásterű motor

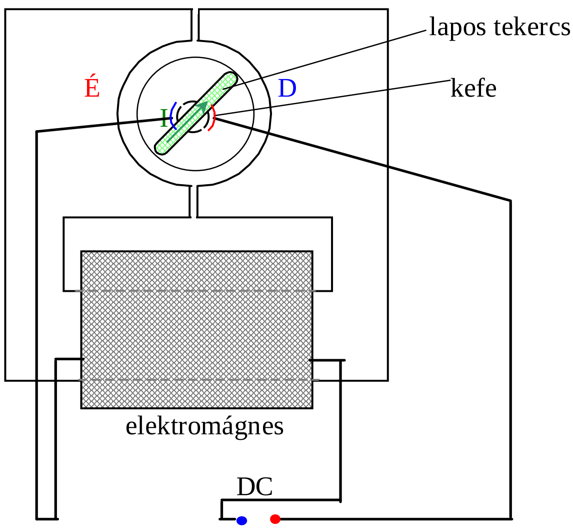


β) Tojásszerű tér

Itt a rézgyűrű, mint segédtekercs (egymenetes) lerontja a körszimmetriát, s így a forgatónyomaték már egyirányú lehet.

2) Egyenáramú motor

Egyenáramú gép (kétpólusú)

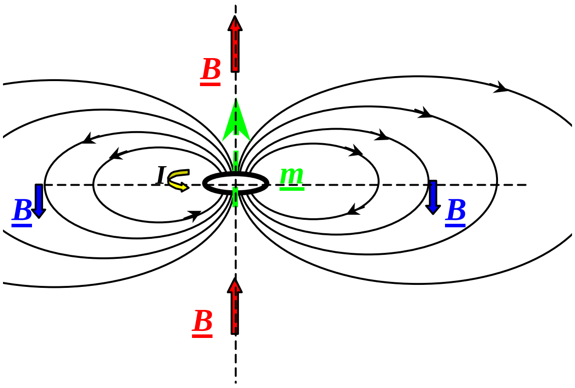


Az áramátjárta keretre (vagy lapos-tekercsre) a sztatikus B tér addig gyakorol forgatónyomatékot amíg a keret merőleges nem lesz a B -re. Ezen a holtponton a tehetetlenség miatt átlendülve, a kommutátor áramirány-változtatása miatt, újra az előzővel megegyezőirányú forgató-nyomaték hat a forgórészre.
Vízszintes forgórésznél nem indul a kétpólusú kivitel, ezért szokásos többkeretes forgórész (több kom-mutátorral, lásd pl. az egyenáramú generátorok ábráit).

Az atomi momentum (**m**) és a ***M***- mágnesezettség viszonyai anyagfajtákként:

A mágneses momentum a mágneses tér egyetlen forrása
(, mert nincs mágneses monopólus: *div* $\underline{B}$ *= 0).*

A mágneses momentumok nem okvetlenül kioltanak.
*(Sőt, **csak** az indukált momentumok árnyékolnak /többnyire részlegesen/).*



A mágneses momentum tere: $\underline{B}(\underline{r}) =$

$$\frac{\mu_o}{4\pi}\left(\frac{3(\underline{m}\,\underline{r})\underline{r}}{r^5}-\frac{\underline{m}}{r^3}\right)$$

A mágneses momentum energiája $\underline{B}^k$ ***külső térben:***

$$E^{mágn.}_{energ.} = -\underline{m}\,\underline{B}^k$$

A térrel megegyező irány a kedvező!

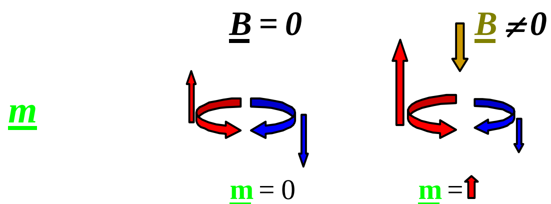
M- mágnesezettség: $\underline{M} = \underline{m}/V$ *mágneses momentum sűrűség* *(makro jellemző)*
$\underline{m}$ *- atomi mágneses l momentum* *(mikro jellemző)*

A külső tér megjelenése mindig **indukál** mágneses momentumot is (sok esetben csak keveset)!

*a) Csak indukált momentum (köráram) van, ha **diamágneses az anyag.***

$\underline{M}(\underline{B} = 0) = 0$ *és* $\underline{m}(\underline{B} = 0) = 0$, *és* $\underline{M}(\underline{B} \neq 0) \neq 0$;
(*M* *B* –vel ellentétes irányú***)***

*Az **atomi** momentumok (**m**):*



Ampere féle köráramok
(indukció)

b) Mágneses anyagok

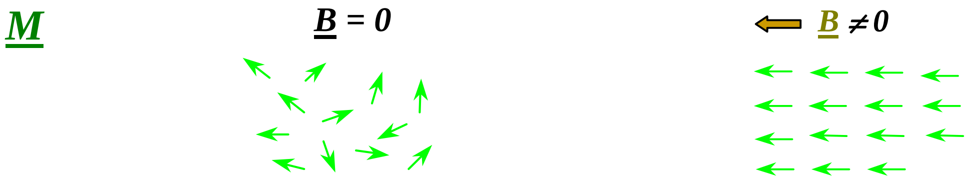
$\underline{m}$ ***atomi*** *momentum már eleve van.*

Az ***eredő*** momentumok *(*$\underline{M}$*):*

= *tér nélkül rendezetlenek,* ***paramágneses anyag.***

$\underline{M}(\underline{B} = 0) = 0$, $m(\underline{B} = 0) \neq 0$, ***és tér esetén*** $\underline{M}(\underline{B} \neq 0) \neq 0$;

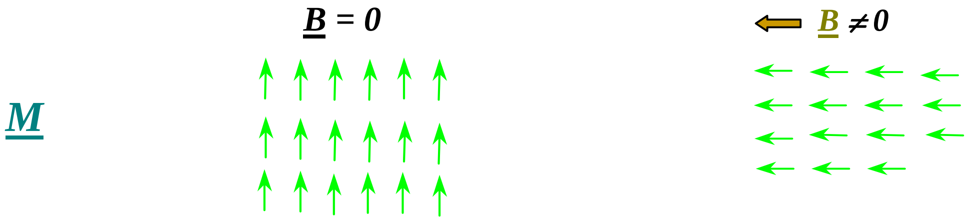
($\underline{M}$ $\underline{B}$ –vel azonos irányú***)***



= *eleve rendezett,* ***ferromágneses anyag****.*

$\underline{M}(\underline{B} = 0) \neq 0$ *és* $m(\underline{B} = 0) \neq 0$

($\underline{M}$ $\underline{B}$ –vel azonos irányú***)***



Maxwell **egyenletek (III.) mágneses anyag jelenlétében:**

$$\boxed{\text{rot}\, \underline{H} = \underline{j}_{szabad}} \qquad \boxed{\text{rot}\, \underline{B} = \mu_o\, \underline{j}_{összes}}$$

$$\underline{H} = (1/\mu_o)\, \underline{B} - \underline{M}$$