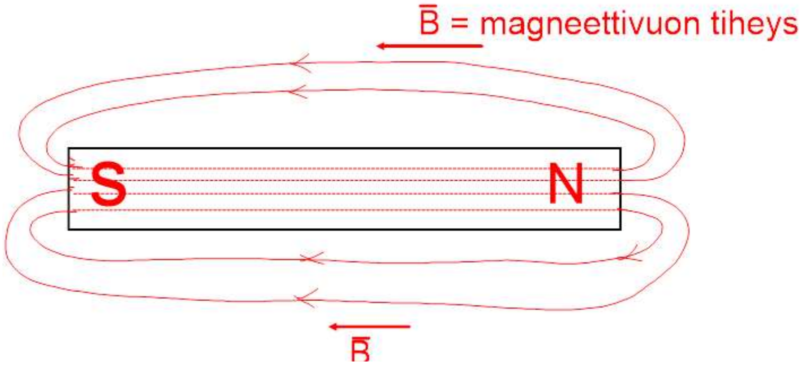
## 1 Magneettikenttää kuvataan kenttäviivoilla

- etävuorovaikutus, kosketuskontaktia ei tarvita
- voi olla vetovoima tai hylkivä voima
- samassa esineessä on kaksi eri tavalla käyttäytyvää kohtiota: POHJOIS- JA ETELÄKOHTIO

Miten magneetit toimivat?



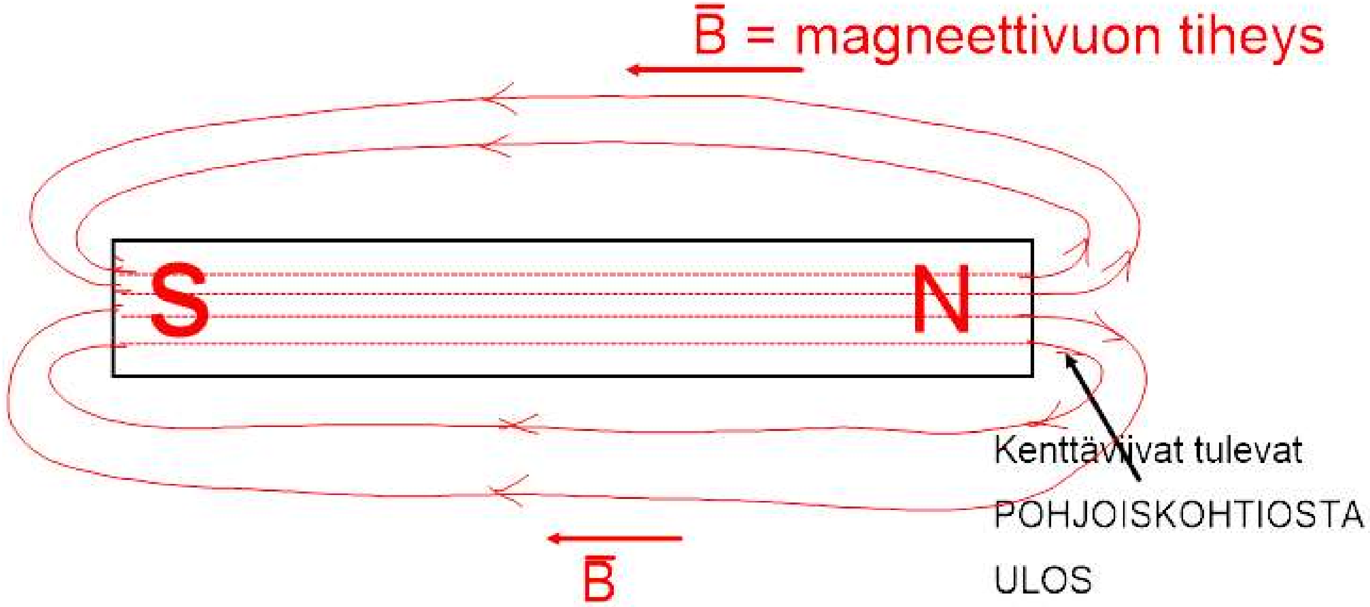

## Historiaa:

H.C. Orsted: Sähkövirtajohdin vuoro-vaikuttaa kompassineulan kanssa
Johtimen kenttäviivat

M. Faraday: Magneettikentän muutokset synnyttävät suljettuun virtapiiriin sähkö-virran

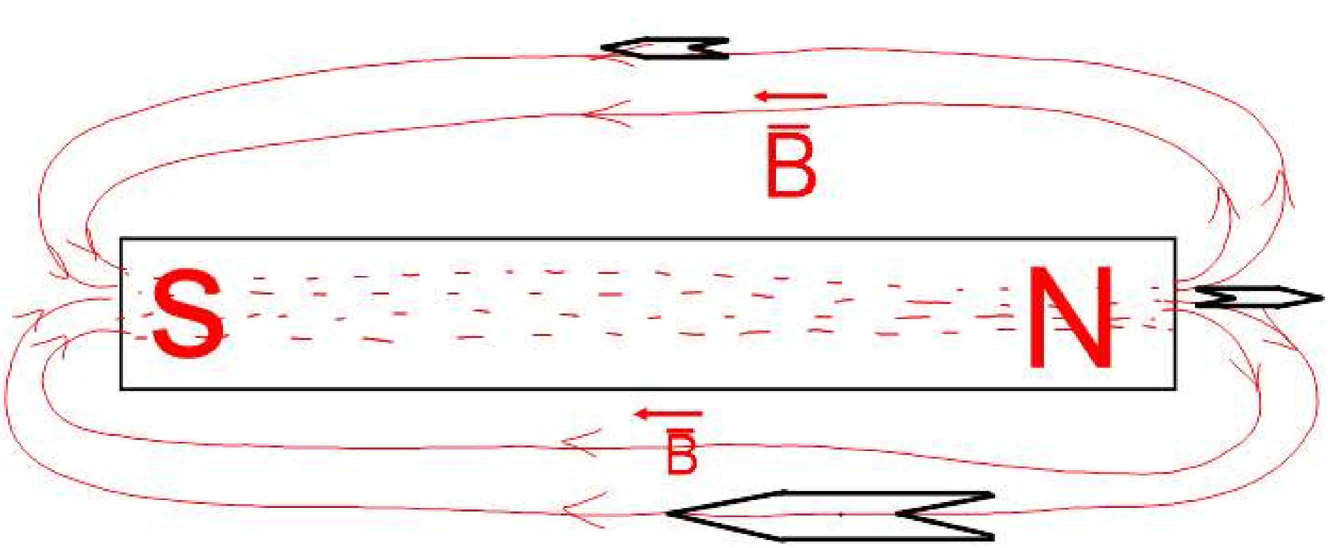
## 2 Magneettikenttää mallinnetaan kenttäviivoilla

- magneetti esiintyy aina kaksi-napaisena eli DIPOLINA:



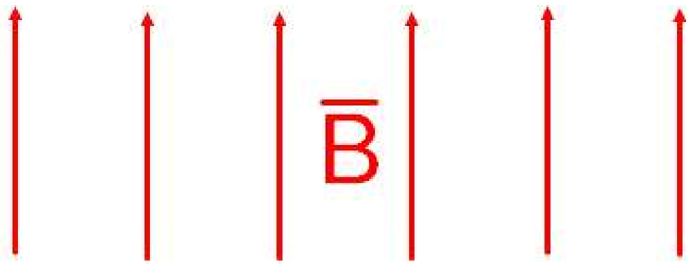

Kompassineula asettuu aina kenttäviivan suuntaiseksi:

Katso livenä



# Magneettikentän voimakkuus

- magneettikenttä on HOMOGEENINEN, jos kenttäviivat ovat yhdensuuntaisia eli suunta ja tiheys ovat yhtä suuria
- magneettikentän voimakkuutta kuvaava suure on MAGNEETTIVUON TIHEYS $\bar{\mathbf{B}}$ (vektorisuure)




Magneettivuon tiheyden yksikkö:

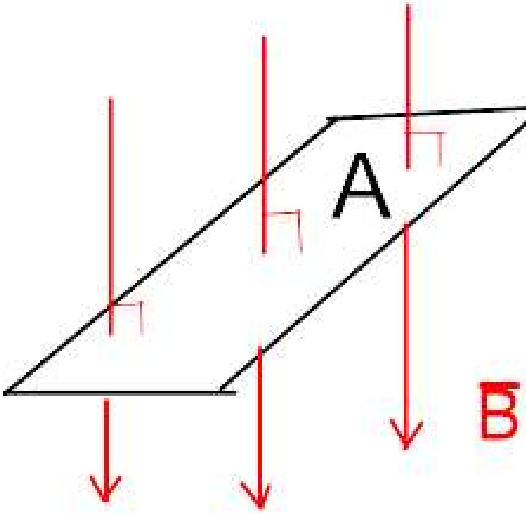
$[B]= 1T$ (tesla), $1T = 1\frac{Vs}{m^2}$

1 gaussi = 1G = 0,0001T

eli 1T = 10000G

Yksi tesla on paljon...

# Magneettivuo



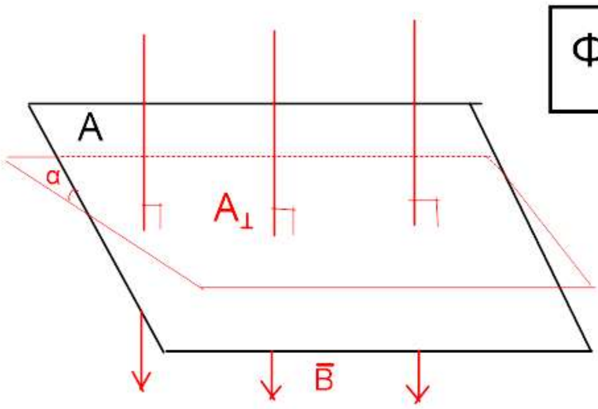

Kun magneetti-kentän $\overline{B}$ kenttä-viivat ovat tason A normaalin suuntaisia, magneettivuo

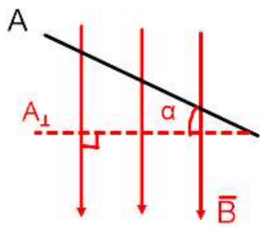
"Fii"

$$\boxed{\Phi = BA}$$

Jos tasopinta ei ole kohtisuorassa kenttäviivoihin nähden...

$$\boxed{\Phi = BA_\perp = BA\cos\alpha}$$



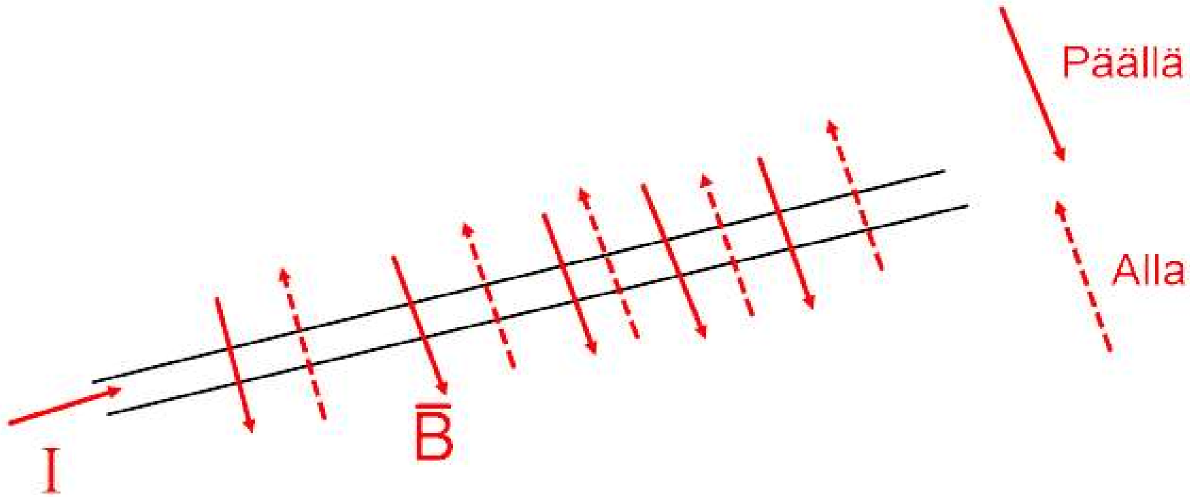

Magneettivuon yksikkö:

$$[\Phi] = [B][A] = 1\,\mathrm{T} \cdot 1\,\mathrm{m}^2$$

$$= 1\,\frac{\mathrm{Vs}}{\cancel{\mathrm{m}^2}} \cdot 1\,\cancel{\mathrm{m}^2} = 1\,\mathrm{Vs} = 1\,\mathrm{Wb}\ (\text{weber})$$

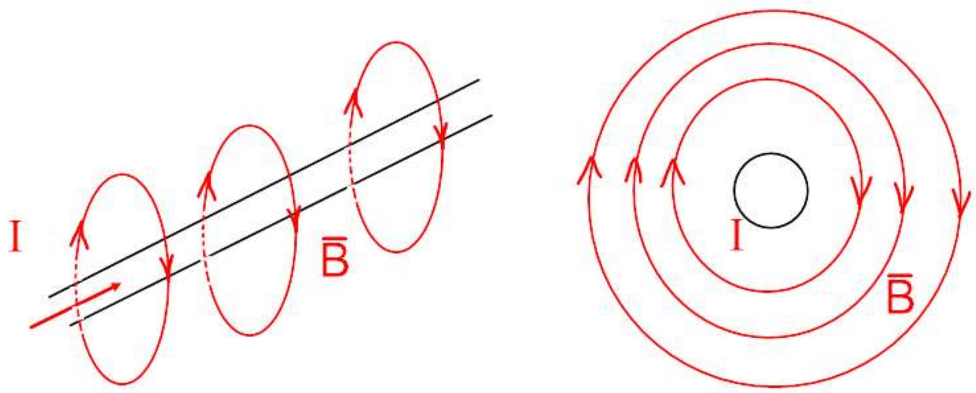
## Suoran virtajohtimen magneettikenttä

Kokeellinen havainto: kompassineula kääntyy poikittain virtajohtimeen nähden:




Toisaalta kompassineula kääntyy aina kenttäviivan suuntaan...

Johtopäätös: kenttäviivat ovat johdin-keskeisiä renkaita:

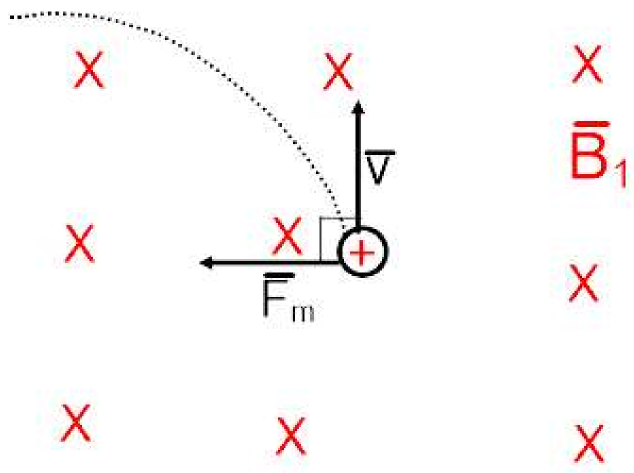



Kenttäviivat ovat renkaita

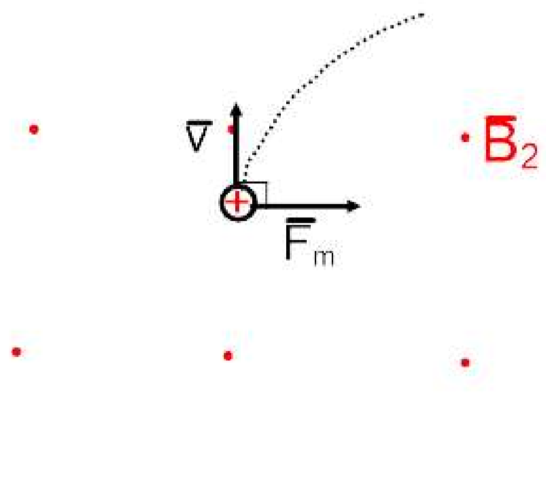
Kenttäviivojen suunta saadaan <u>johtimen oikean käden säännöstä.</u>

## Magneettikentän kenttäviivojen suunnan havainnollistaminen

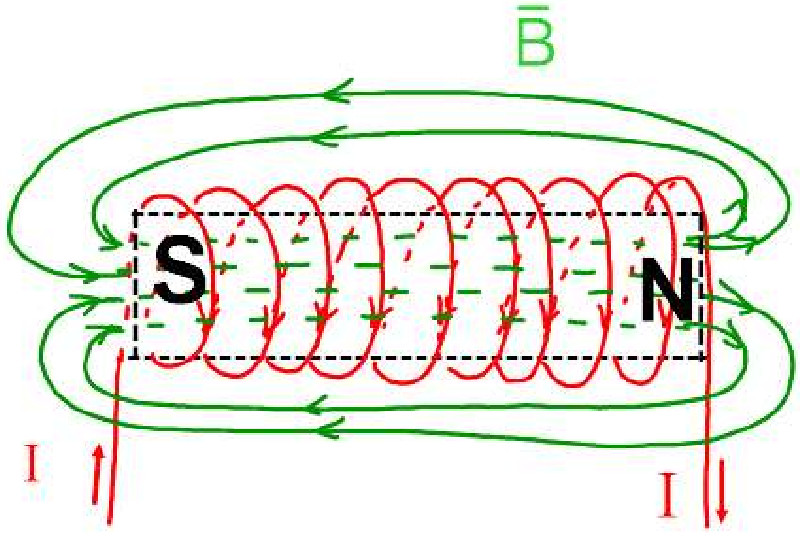
1. Kenttäviivat x kulkevat kohtisuorasti tasosta sisään päin:



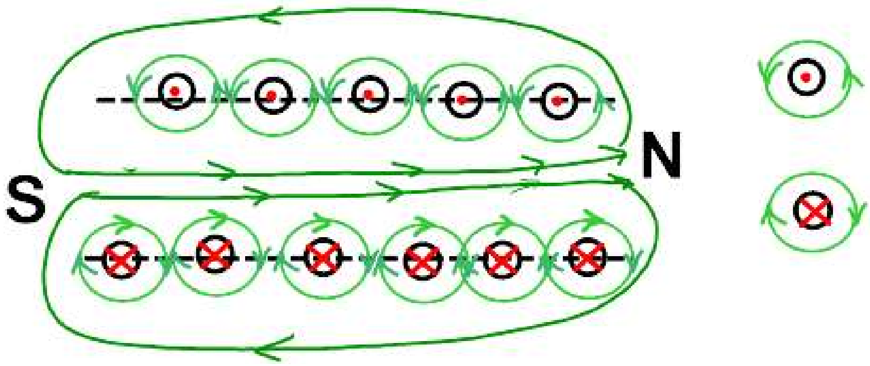

2. Kenttäviivat · kulkevat kohtisuoraan tasosta ulos:



# Silmukan ja käämin magneettikenttä




Kenttäviivojen suunta saadaan käämin oikean käden säännöstä.




Käämin keskiakselilla magneettivuon tiheys on likimain homogeeninen. Magneettivuon tiheys keskiakselilla keskellä käämiä on

$$\boxed{B = \frac{\mu_0 N I}{\ell}}$$

$\mu_o$ = tyhjiön permeabiliteetti = $4\pi \cdot 10^{-7}\,\frac{\text{Vs}}{\text{Am}}$
N = käämin kerrosmäärä
$\ell$ = käämin pituus
I =sähkövirta
MAOL s. 132

Oppilastyökäämi: N = 1200,

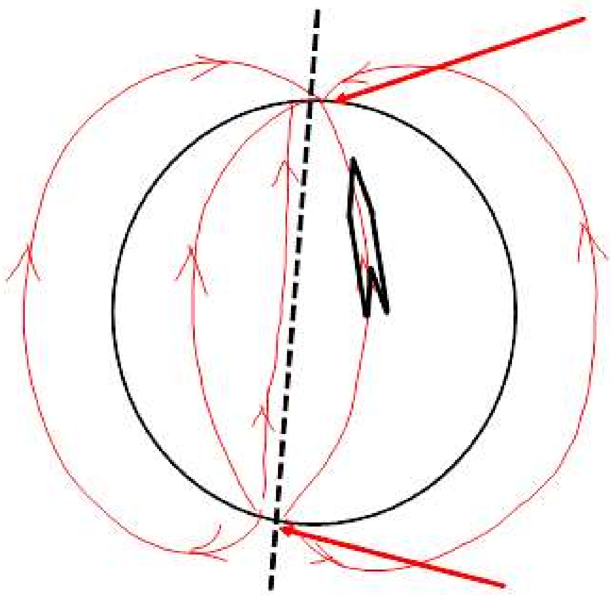
$\ell$ = 0,065m ja I = 0,50A, jolloin

$$B = \frac{\mu_o N I}{\ell} = \frac{4\pi 10^{-7}\,\mathrm{Vs}/\cancel{\mathrm{A}}\mathrm{m} \cdot 1200 \cdot 0{,}50\cancel{\mathrm{A}}}{0{,}065\ \mathrm{m}}$$

$$\approx 0{,}011599\ \mathrm{Vs/m^2} \approx 11{,}6\ \mathrm{mT.}$$

Kokeellinen havainto: $B_{kok} \approx 7{,}5$ mT.

# Maapallon magneettikenttä



Magneettinen etelänapa

Maantieteellinen pohjoisnapa
= magneettinen etelänapa
ja päinvastoin...

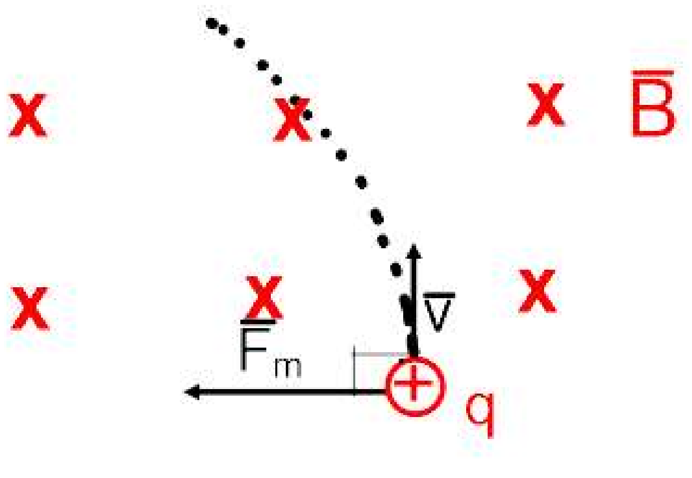
Magneettinen pohjoisnapa

# 3 Magneettinen voima

Lähtökohta: Magneettisessa voimassa on kyse liikkuvien varattujen hiukkasten välisestä vuorovaikutuksesta eli tarvitaan

- varattuja hiukkasia
- hiukkaset liikkuvat (voiman mittaajaan nähden)
- liikesuunta ei saa olla kenttäviivan kanssa yhdensuuntainen

# Magneettisen voiman suunta ja suuruus homogeenisessa magneettikentässä




Ympyrärata

Kun varattu hiukkanen liikkuu homogeenisessa magneettikentässä, jonka magneettivuon tiheys on $\bar{B}$ ja kappaleen nopeus on $\bar{v}$ ja nopeus on kohtisuorassa kenttäviivoihin nähden eli $\bar{v} \perp \bar{B}$, hiukkaseen vaikuttaa MAGNEETTINEN VOIMA

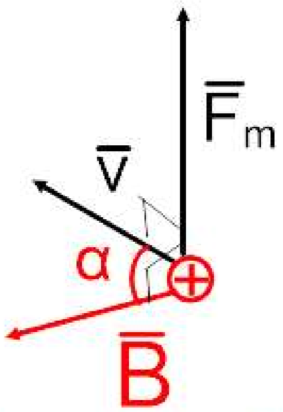
$$\boxed{F_m = qvB}$$

q = hiukkasen sähkövaraus

---

Jos $\sphericalangle(\bar{v},\bar{B}) = \alpha$, niin $\boxed{F_m = qvB\,sin\,\alpha}$

Pos. varaus:




Oikean käden sääntö

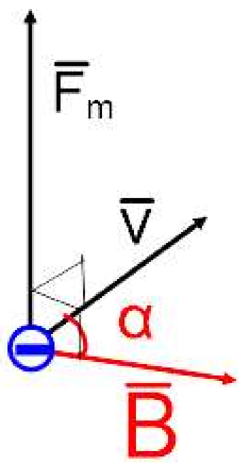
Huom!

$\bar{F}_m \perp \bar{v}$

ja

$\bar{F}_m \perp \bar{B}$

Neg. varaus:




Vasemman käden sääntö

Magneettivuon tiheyden yksikkö:

$F_m = qvB\sin\alpha$ eli $B = \dfrac{F_m}{qv\sin\alpha}$

$$[B] = \frac{[F_m]}{[q][v]} = \frac{1\text{N}}{1\text{ C}\cdot 1\text{ m/s}} = \frac{1\text{ Ns}}{1\text{ Cm}} = 1\text{T (tesla)}$$

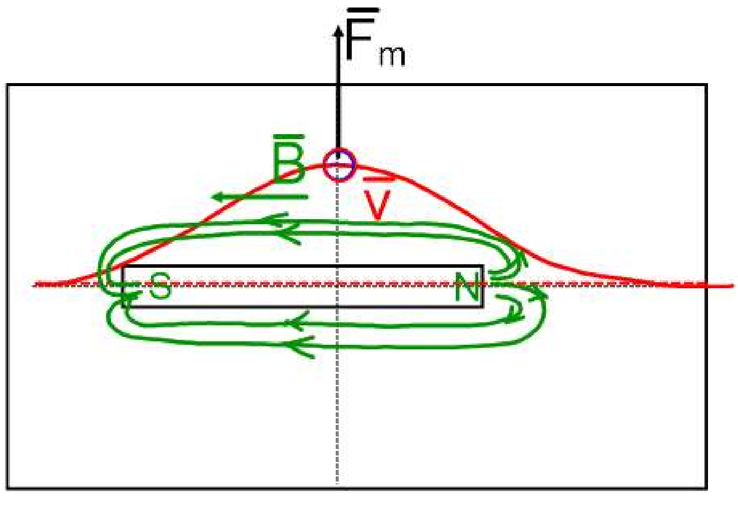
Toisaalta

$$[B] = 1\text{T} = \frac{1\text{Ns}}{1\text{Cm}} = \frac{1\text{Nms}}{1\text{Cm}^2} = \frac{1\text{Js}}{1\text{Asm}^2}$$

$$= \frac{1\cancel{\text{As}}\text{Vs}}{1\cancel{\text{As}}\text{m}^2} = 1\frac{\text{Vs}}{\text{m}^2} \quad \text{eli } 1\text{T} = 1\frac{\text{Vs}}{\text{m}^2}.$$

Magneettisen voiman suunnan tarkastelu:

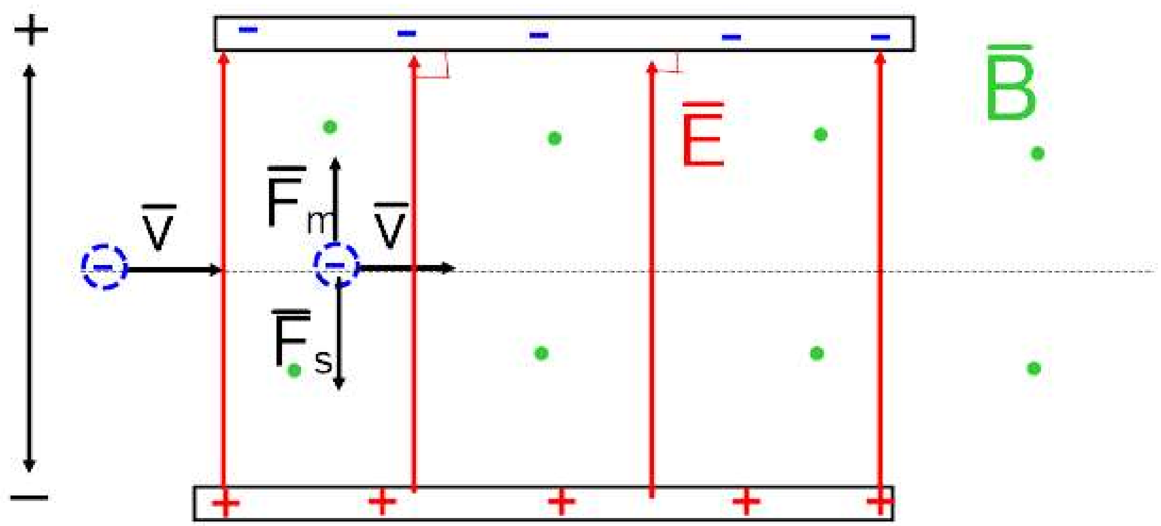
Oskilloskoopin piirtämä viiva kaareutuu YLÖSPÄIN kestomagneetin vaikutuksesta. Kumpi magneetin pää on pohjoiskohtio?



- $\overline{F}_m$ suuntautuu YLÖSPÄIN.
- $\overline{v}$: n suunta: Tasosta ULOS.
- Vasemman käden sääntö:
- $\overline{B}$: n suunta on VASEMMALLE.
- Pohjoiskohtio on siis kuvassa OIKEALLA.

ESIMERKKI 3 s. 33
Nopeusvalitsin

B = 150 mT
E = 330kV/m




Millä nopeudella varattu hiukkanen pääsee suoraan eteenpäin?

Nopeusvalitsimen simulaatio

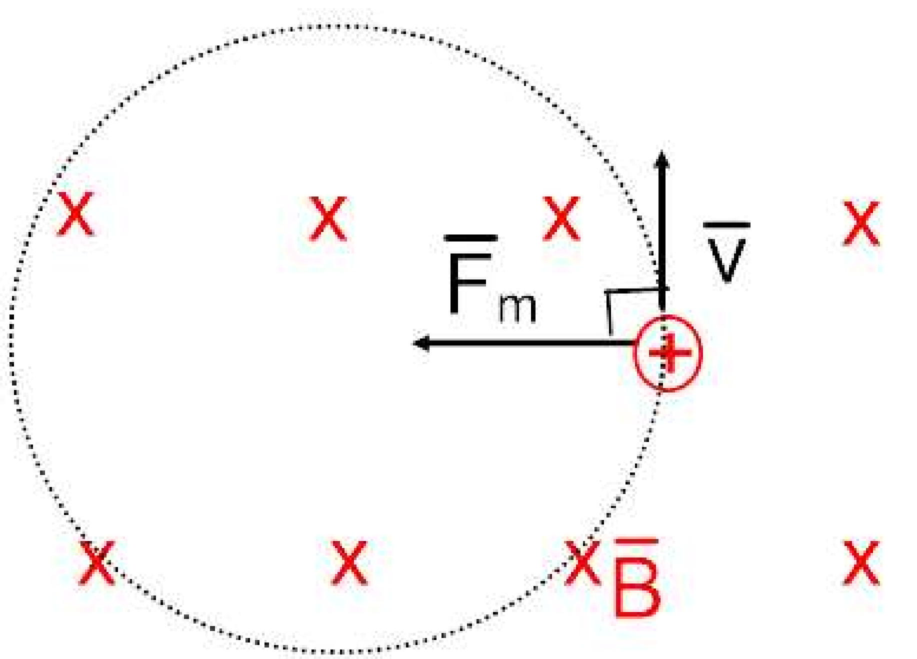
Voimatasapaino: $\overline{F}_m + \overline{F}_s = \overline{0}$.

Suuntasopimuksen mukaan

$$F_m - F_s = 0 \quad \text{eli} \quad \cancel{q}vB = \cancel{q}E \;|:q$$

$$v = \frac{E}{B} = \frac{330000\,\mathrm{V}/\cancel{\mathrm{m}}}{0{,}15\,\mathrm{Vs}/\mathrm{m}^{\cancel{2}}} \approx 2{,}2\cdot 10^6\,\mathrm{m/s}.$$

## Varatun hiukkasen ympyräliike magneettikentässä




Oletus:

$\overline{v} \perp \overline{B}$

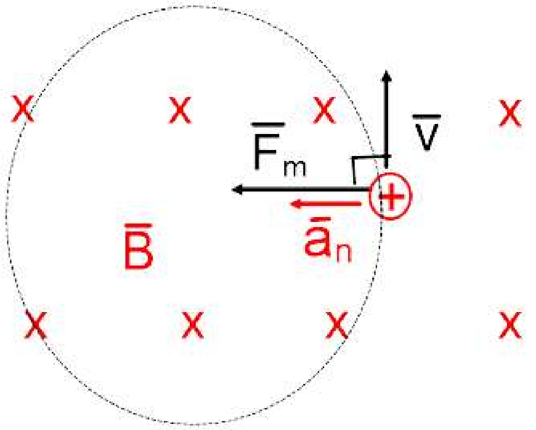
Silloin

$\overline{F}_m \perp \overline{v}$ ja

$\overline{F}_m \perp \overline{B}$

Varattu hiukkanen joutuu ympyräradalle

Liikeyhtälö: $\Sigma\overline{F} = m\overline{a}$ eli $\overline{F}_m = m\overline{a}_n$.




Skalaariyhtälö

$$q\cancel{v}B = \frac{mv^{\cancel{2}}}{r} \quad |:v$$

$$qB = \frac{mv}{r} \quad |v = \omega r$$

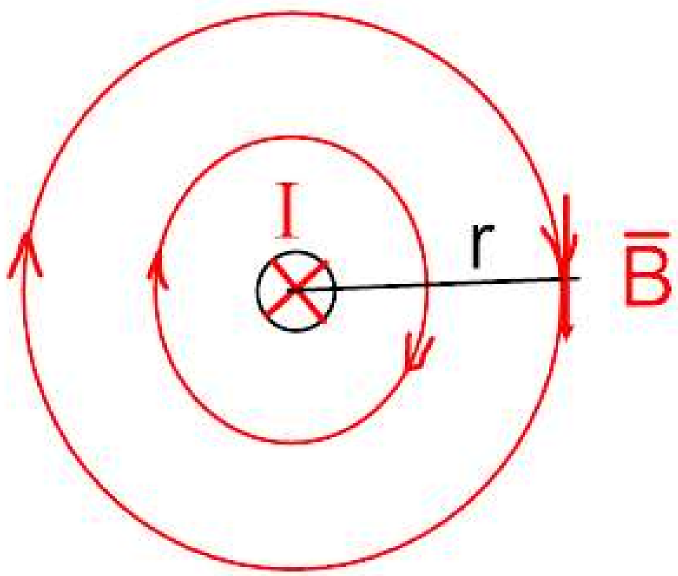
$$qB = \frac{m\omega\cancel{r}}{\cancel{r}} \quad | :m$$

$$\boxed{\omega = \omega_o = \frac{qB}{m}}$$

Varatun hiukkasen ominaiskulmanopeus

## 4 Magneettikenttä kohdistaa virtajohtimeen voiman

Pitkän ja suoran virtajohtimen tuottama magneettivuon tiheys voidaan laskea Biot-Savartin lain avulla:



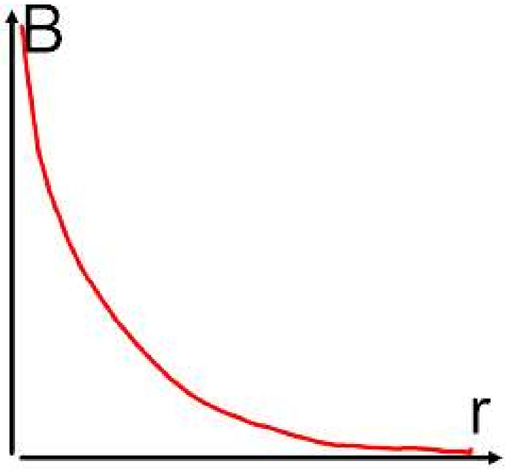
$$\boxed{B(r) = \frac{\mu_o I}{2\pi r}}$$

MAOL
s. 132

$\mu_o$ = tyhjiön permeabiliteetti

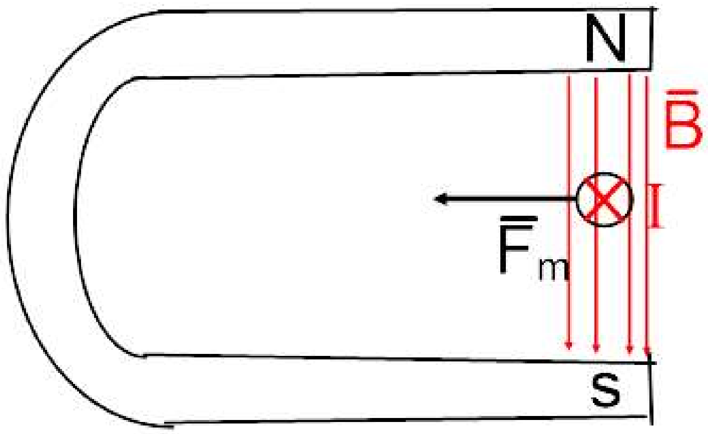
$$= 4\pi\ 10^{-7}\ \frac{Vs}{Am}$$

MAOL s.70

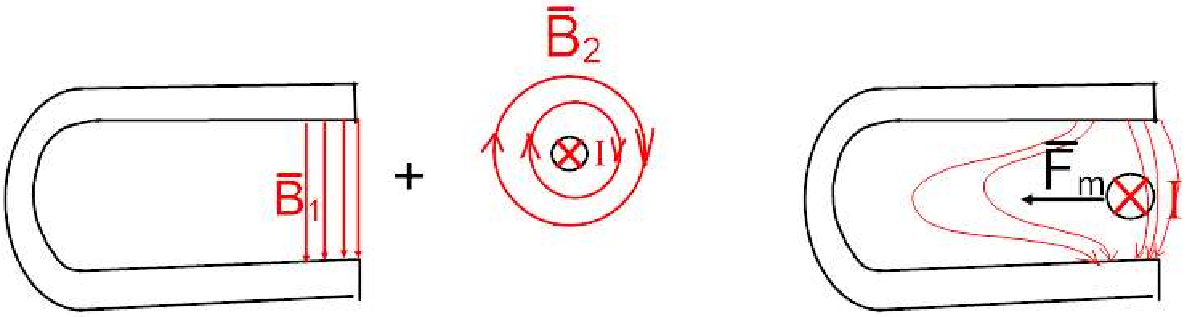



**Virtajohdin ulkoisessa magneetti-kentässä**

Johtimeen kohdistuvan magneettisen voiman suunta voidaan päätellä kuvitteellisten positiivisten varausten avulla.

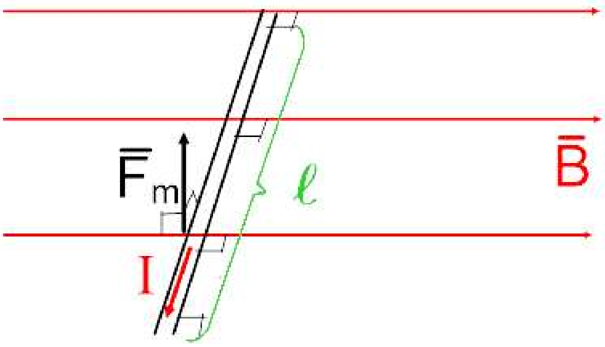


Voiman suunta voidaan päätellä myös magneettikenttien kokonaisvaikutuksen avulla:




Magneettisen voiman suunta on kokonaiskentän <u>tihentymästä harventumaan päin</u>.

**Virtajohtimeen kohdistuva magneettinen voima**




Magneettisen voiman suunta on tasosta ulospäin.

$$\boxed{F_m = I\ell B}$$

kun johdin on kohtisuorassa kenttäviivoihin nähden.

## 5 Varatun hiukkasen liike homogeenisessa sähkö- ja magneettikentässä

Lähtökohta: Magneettisessa voimassa on kyse liikkuvien varattujen hiukkasten välisestä vuorovaikutuksesta eli tarvitaan

- varattuja hiukkasia
- hiukkaset liikkuvat (voiman mittaajaan nähden)
- liikesuunta ei saa olla kenttäviivan kanssa yhdensuuntainen

## Varattu hiukkanen homogeenisessa sähkökentässä

Oletus: $\bar{E}$ = vakio, jolloin $\bar{F}_s = q\bar{E}$ = vakio ja

$$\bar{a} = \frac{\bar{F}_s}{m} = \text{vakio}$$

eli kyseessä on TASAISESTI KIIHTYVÄ LIIKE. Liikeyhtälöt ovat yksinkertaiset!

# Mekaanisen energian säilymislaki sähkökentässä

Lähtökohta: $E_p + E_k$ = vakio

eli $E_{p,a} + E_{k,a} = E_{p,l} + E_{k,l}$ a = alku, l = loppu

Varatulle hiukkaselle $E_p = qV$

q = sähkövaraus, [Q] = 1C
$V$ = sähkökentän potentiaali [$V$]=1V

Varatun hiukkasen energian säilymislaki on siis

$$\boxed{qV_a + ½mv_a^2 = qV_l + ½mv_l^2}$$

Usein $v_a \approx 0$ m/s, jolloin $E_{k,a} \approx 0$J. Silloin

$$qV_a = qV_l + ½mv_l^2$$

$$q(\underbrace{V_a - V_l}_{U}) = ½mv_l^2$$

eli siis $\boxed{qU = ½mv_l^2}$ Schusterin kaava

## Varatun hiukkasen liikkeen vertailu sähkö- ja magneettikentässä

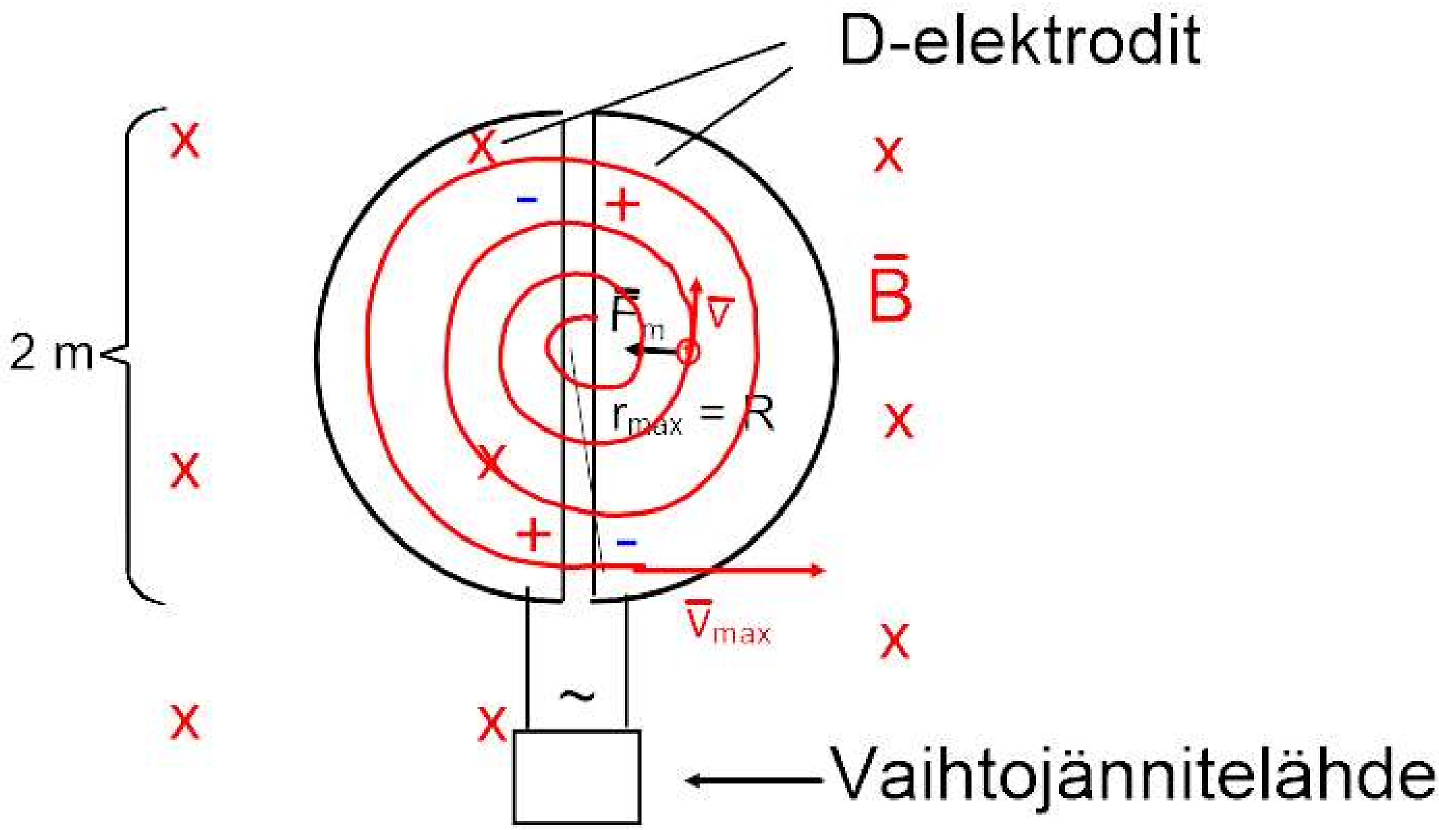
### Sähkökenttä

- Coulombin voima $\bar{F}_s = q\bar{E}$ on olemassa AINA riippumatta varatun hiukkasen nopeudesta ja liikesuunnasta
- $\bar{F}_s \parallel \bar{E}$
- Coulombin voima voi muuttaa varatun hiukkasen vauhtia ja samalla liike-suuntaa (ja myös liike-energiaa)

### Magneettikenttä

- magneettinen voima on olemassa, jos varatun hiukkasen liikesuunta ei ole täysin kenttäviivojen suuntainen ja $\bar{v} \neq \bar{0}$
- $\bar{F}_m \perp \bar{v}$ ja $\bar{F}_m \perp \bar{B}$
- magneettinen voima pystyy ohjailemaan tehokkaasti nopeasti liikkuvia varattuja hiukkasia
- <u>magneettinen voima ei tee työtä</u>, joten se ei voi muuttaa hiukkasen vauhtia eikä liike-energiaa vaan ainoastaan liikesuuntaa

## Syklotroni = syklinen hiukkaskiihdytin




- kierrätetään ioneja homogeenisessa magneettikentässä $\bar{B}$
- ionit kiertävät aina puoli kierrosta vakionopeudella
- liikeyhtälö $qvB = \frac{mv^2}{r}$
- elektrodien välissä ionien nopeutta lisätään sopivasti tahdistetulla vaihtojännitteellä
- kun hiukkasten nopeus kasvaa, radan säde kasvaa, jolloin seurauksena on spiraalirata

- ionit toteuttavat ominaiskulmanopeuden ehdon

$$\boxed{\omega = \omega_o = \frac{qB}{m}}$$

- silloin $v_{max} = \omega_o R = \dfrac{qBR}{m}$

- suurin liike-energia

$$E_{max} = \tfrac{1}{2} m v_{max}^2 = \tfrac{1}{2} m \left(\frac{qBR}{m}\right)^2 =$$

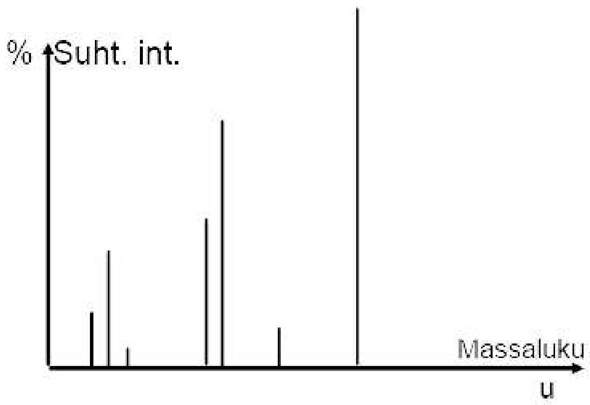
$$= \tfrac{1}{2} \cancel{m} \frac{q^2 B^2 R^2}{m^{\cancel{2}}} = \underline{\tfrac{1}{2} B^2 R^2 \frac{q^2}{m}}$$

Tärkeää: Jos ionien varausaste kasvaa, liike-energia kasvaa varausasteen toiseen potenssiin verrannollisena eli se kasvaa hyvin voimakkaasti .

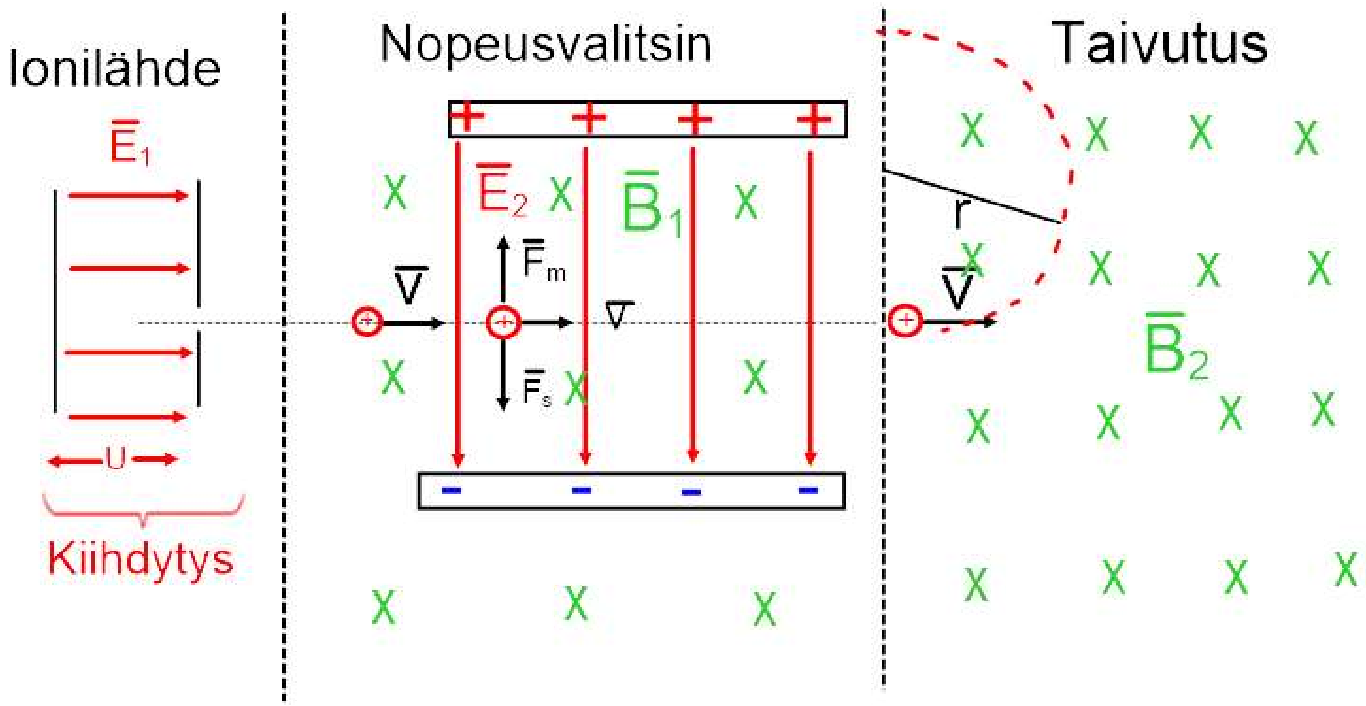
Syklotronia käytettäessä ionien varaus-asteet pitäisi saada hyvin suuriksi.

# Massaspektrometri

- määritetään atomien tai molekyylien massoja
- massaspektrometria tarvitaan mm. orgaanisten yhdisteiden analytiikassa ja tyhjiöteknologiassa




# MASSASPEKTROMETRIN OSAT



IONILÄHDE

- tekee atomeista tai molekyyleistä yleensä POSITIIVISIA ioneja, yleensä varaus $q = +e$
- joskus ioni voi olla moninkertaisesti varattu, ts. $q = +ne$, $n = 1, 2, 3,..$
- kiihdytyksessä potentiaalienergia muuttuu liike-energiaksi:

$$\boxed{qU = \frac{1}{2}mv^2 \quad \text{eli } v = \sqrt{\frac{2qU}{m}}}$$

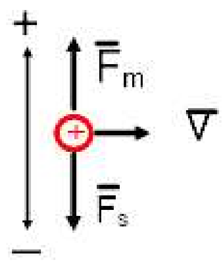
- moninkertaisesti varatut ionit saavat "liian suuren" nopeuden

**NOPEUSVALITSIN**

Voimatasapaino: $\overline{F}_m + \overline{F}_s = \overline{0}$

eli skalaarimuodossa $F_m - F_s = 0$

eli $qvB_1 = qE_2$, jolloin $vB_1 = E_2$ ja




$$\boxed{v = \frac{E_2}{B_1}}$$

Vain tällä nopeudella päästään suoraan eteenpäin.

**TAIVUTUS**

tasainen ympyräliike: $F_m = ma_n$, eli skalaariyhtälönä

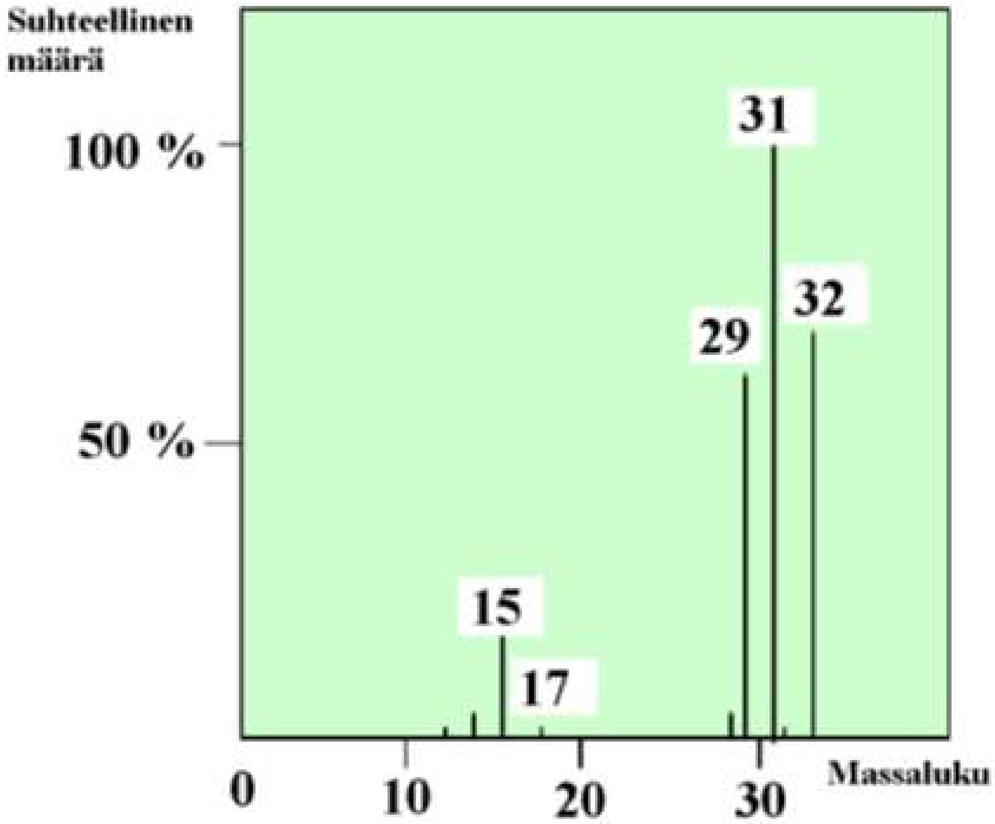
$$qvB_2 = \frac{mv^2}{r}$$

josta saadaan kaarevuussäteeksi

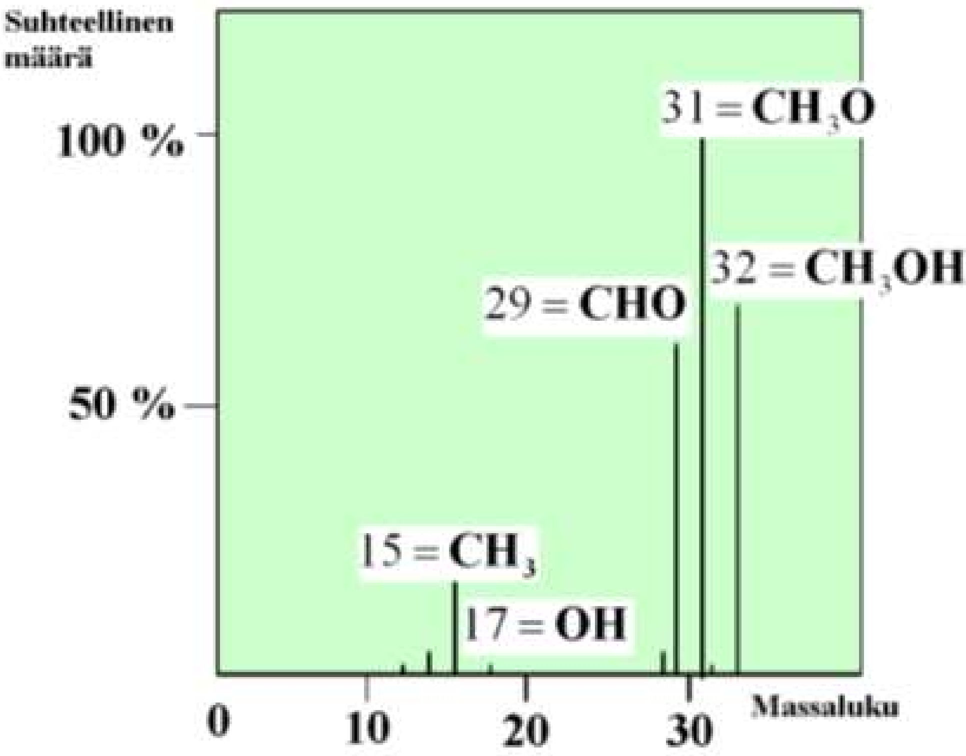
$$\boxed{r = \frac{mv}{qB_2}}$$

v, q ja B2 ovat vakioita.Mitä suurempi massa, sitä suurempi säde.

Erään happea sisältävän orgaanisen aineen massaspektri



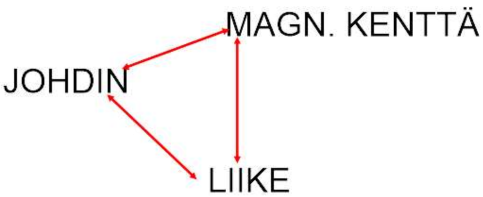
Tulkinta: Kyseessä on metanoli




## 6 Magneettivuon muutos aiheuttaa induktion

Kun johdinjärjestelmä on MUUTTUVASSA MAGNEETTIKENTÄSSÄ, johtimen päiden välille muodostuu potentiaaliero eli jännite.

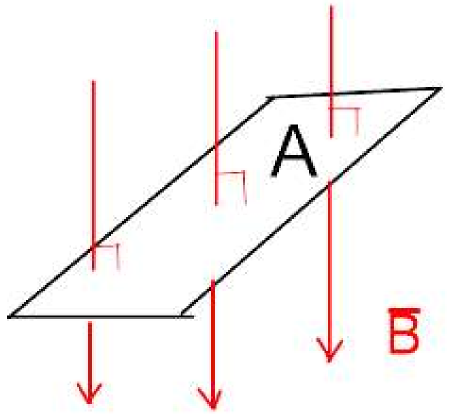
Tämä jännite aiheuttaa suljetussa virtapiirissä sähkövirran.




Simulaatio

# Magneettivuon muutos induktioilmiön syynä

## Magneettivuo



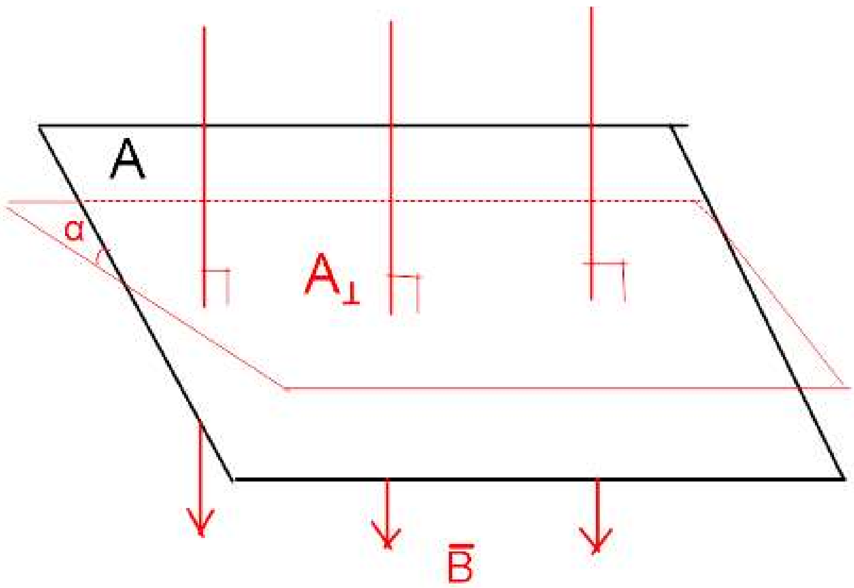

Kun kenttäviivat ovat tason normaalin suuntaisia, magneettivuo

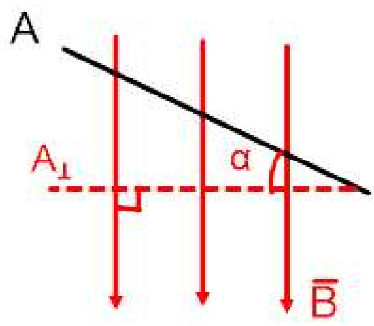
"Fii"

$$\boxed{\Phi = BA}$$

Jos pinta ei ole kohtisuorassa kenttäviivoihin nähden...

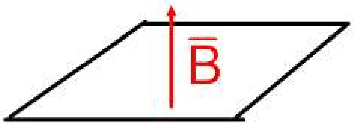
$$\boxed{\Phi = BA_{\perp} = BA\cos\alpha}$$

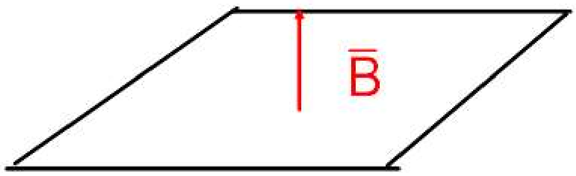


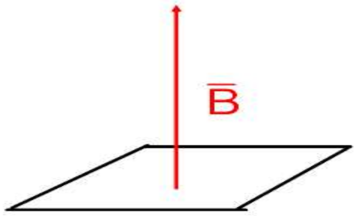
# Muutetaan magneettivuota...

## Muutetaan pinta-alaa



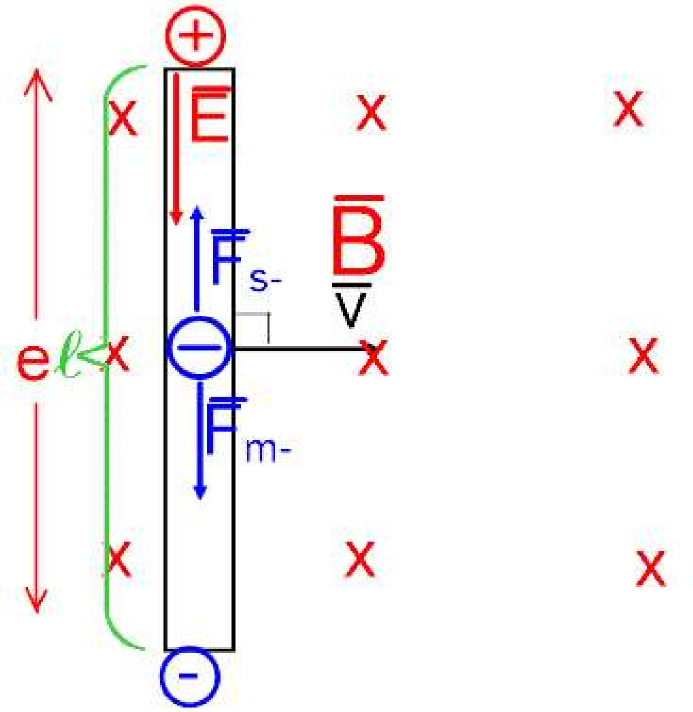




## Muutetaan vuontiheyttä


## Muutetaan kulmaa

# 7 Liikkuvaan suoraan johtimeen voi indusoitua jännite



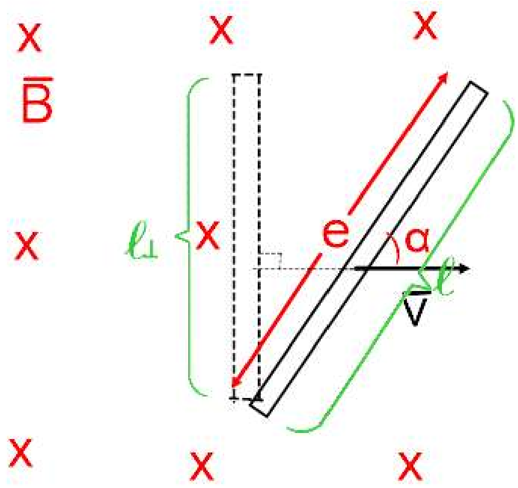

Simulaatio

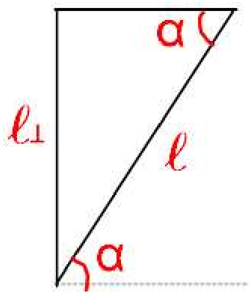
- tasapainotilassa $\overline{F}_{m-} + \overline{F}_{s-} = \overline{0}$
  eli $F_{m-} = F_{s-}$ eli
  $qvB = qE \mid E = e/\ell$

$\boxed{e = \ell vB}$ $\quad \ell \perp \overline{v} \perp \overline{B}$ $\quad$ MAOL s.132

Tangon päiden välinen JÄNNITE

Jos tanko on vinossa liikesuuntaan nähden




$$\sin\alpha = \frac{\ell_\perp}{\ell}$$

$$\ell_\perp = \ell \sin\alpha$$

Tangon päiden välille indusoituu jännite

$e = \ell_\perp vB = \ell \sin\alpha vB = \ell vB\sin\alpha$ MAOL s.132

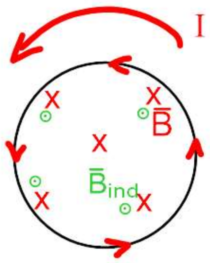
Lenzin laki:

Induktiovirran suunta on sellainen, että sen vaikutukset vastustavat sitä magneettikentän muutosta, joka aiheutti induktion.

Mitä se tarkoittaa?????

ESIMERKKI

Kestomagneetti lähestyy pyöreän johdinsilmukan tasoa pohjoiskohtio edellä. Määritä induktiovirran suunta silmukassa.




Kun kestomagneetti lähestyy, $\overline{B}$:n suunta silmukan sisällä on TASOSTA SISÄÄN. Samalla $\overline{B}$ KASVAA ja magneettivuo kasvaa.

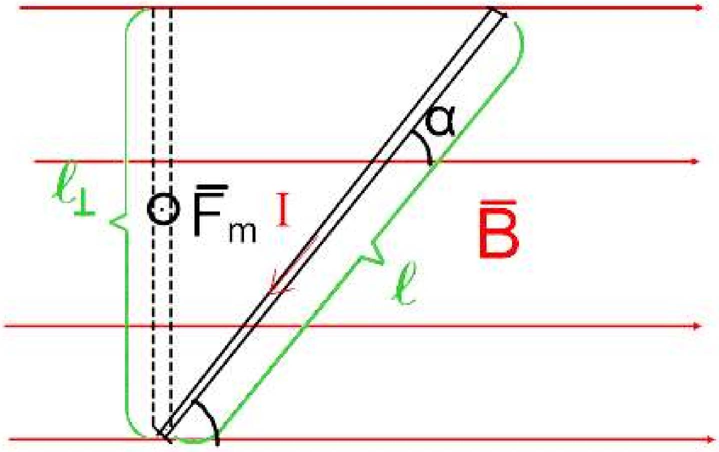
Induktiovirta tuottaa magneetti kentän $\overline{B}_{ind}$, joka vastustaa $\overline{B}$:n muutoksia.

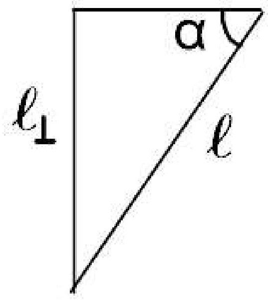
Tämän induktiokentän suunta on TASOSTA ULOS.

Johtimen oikean käden sääntö:

Induktiovirta kulkee <u>VASTAPÄIVÄÄN</u>.

Jos johdin on vinossa kenttäviivoihin nähden, (ks. MAOL s.132)



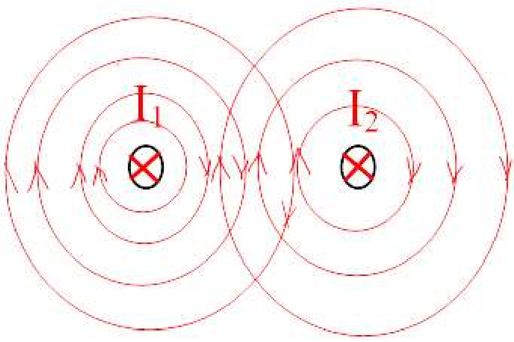

$$\sin\alpha = \frac{\ell_\perp}{\ell}$$

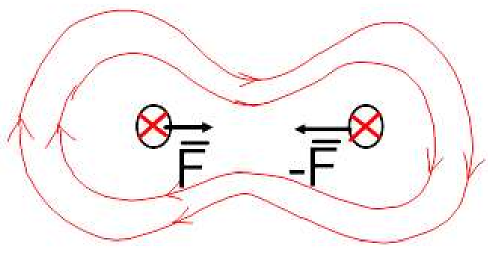
eli $\ell_\perp = \ell\sin\alpha$

$$\boxed{F_m = I\ell\, B = I\ell B\sin\alpha}$$

**Yhdensuuntaista virtajohtimien välinen vuorovaikutus**

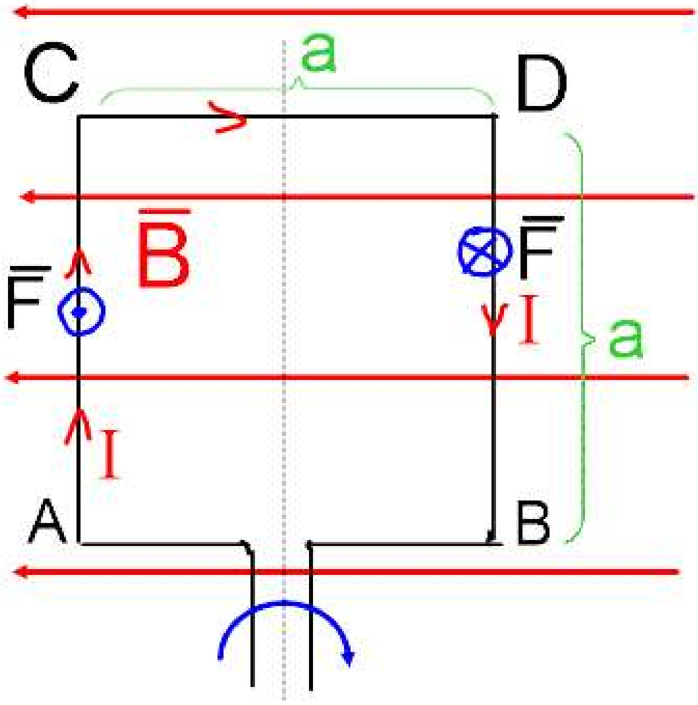
Kaksi yhdensuuntaista johdinta tuntevat <u>VETOVOIMAN</u>, jos virrat kulkevat samaan suuntaan:



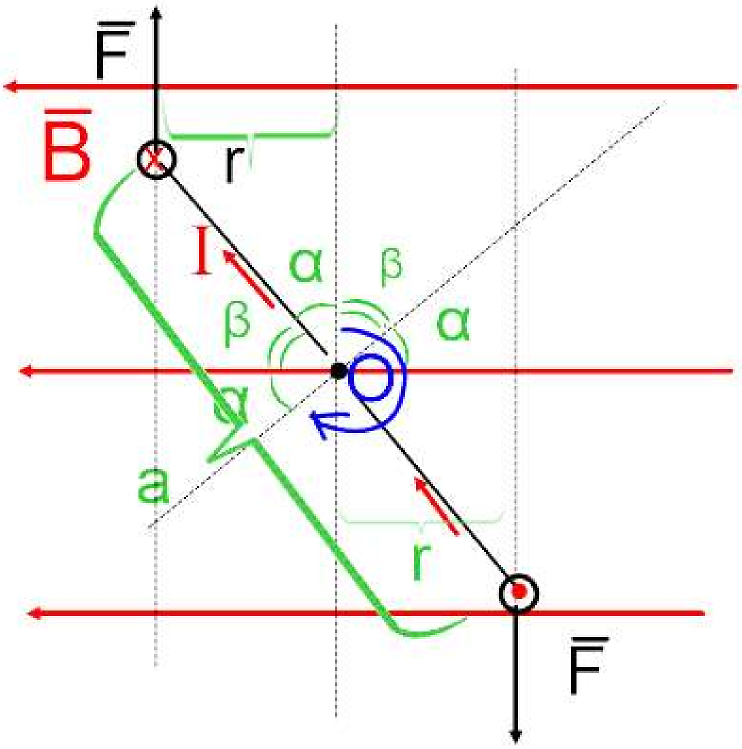



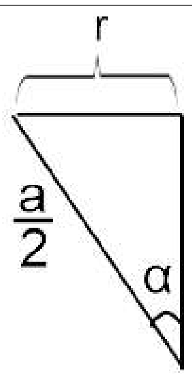

Voima on <u>hylkivä</u>, jos sähkövirrat kulkevat <u>vastakkaisiin</u> suuntiin.

# Käämi ulkoisessa magneettikentässä




Silmukan pinta-ala
$A = a \cdot a = a^2$




$$\sin\alpha = \frac{r}{\frac{a}{2}} \qquad r = \frac{a}{2}\sin\alpha$$

Käämiin kohdistuva voiman momentti on

$$M_O = 2Fr = \cancel{2}F\frac{a}{\cancel{2}}\sin\alpha = Fa\sin\alpha \quad |F = IaB$$

$$= IaBa\sin\alpha = IB\underbrace{a^2}_{a^2 = A}\sin\alpha = IBA\sin\alpha$$

Jos silmukoita on N kpl, kokonaismomentti on

$$M = NIBA\sin\alpha \quad \text{MAOL s. 132}$$

Momentti on suurin, kun $\sin\alpha = 1$ eli $\alpha = 90^{\circ}$. Silloin silmukan taso on kenttäviivojen suuntainen.

Vastaavasti momentti on nolla, kun $\sin\alpha = 0$ eli $\alpha = 0^{\circ}$, jolloin silmukan taso on kohtisuorassa kenttäviivoihin nähden.

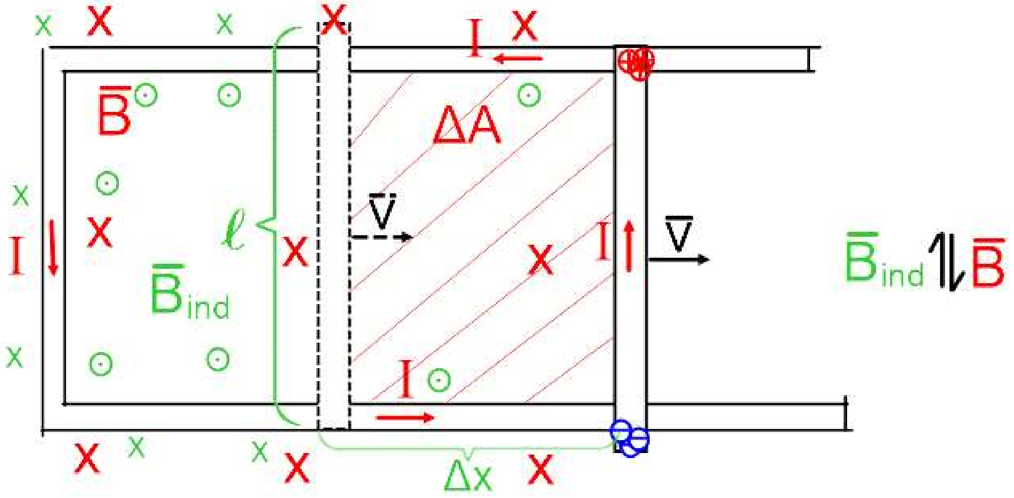
Magneettinen voima siis pyörittää!
Sovellukset:

- kiertokäämimittarit
- tasavirtamoottorit

# 8 Induktiolaki määrää lähdejännitteen

Simulaatio

## Induktiolaki ja induktiojännite




- tankoa hinataan vakionopeudella $\bar{v}$
- kuljettu matka $\Delta x = v\Delta t$

pinta-alan muutos $\Delta A = \ell\Delta x = \ell v\Delta t$

magneettivuon muutos $\Delta\Phi = B\Delta A$ eli

$$\Delta\Phi = B\ell\Delta x = B\ell v\Delta t = \underbrace{\ell vB}_{= e\, =\, \text{jännite}}\Delta t = e\Delta t$$

Siis $\Delta\Phi = e\Delta t$ eli $e = \dfrac{\Delta\Phi}{\Delta t}$

Merkkisopimus: $\boxed{e = -\dfrac{\Delta\Phi}{\Delta t}}$

Lenzin laki: Induktiovirta vastustaa magneettivuon muutosta.

Tämä antaa KESKIMÄÄRÄISEN INDUKTIOJÄNNITTEEN.

Hetkellinen jännite saadaan erotus-osamäärän raja-arvona eli aika-derivaattana:

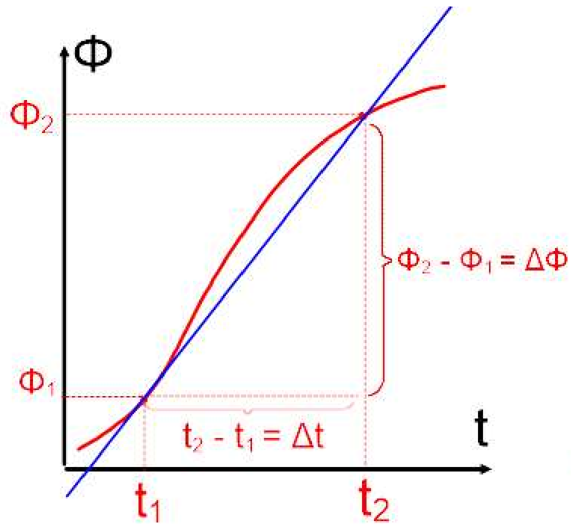
$$e(t) = \lim_{\Delta t \to 0} - \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = - \frac{d\Phi}{dt}$$

Siis $\boxed{e_k = - \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} \quad , \quad e(t) = - \frac{d\Phi}{dt}}$

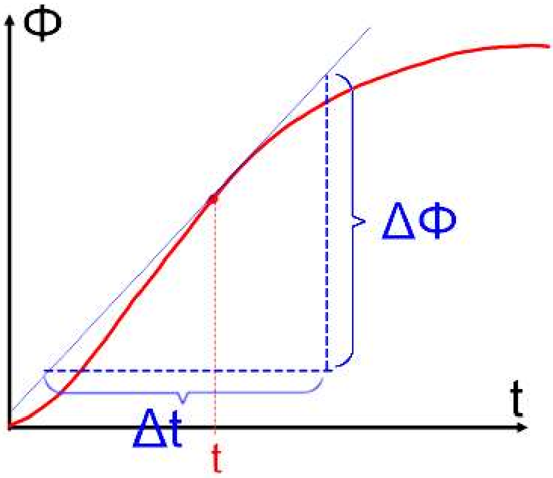
Keskimääräinen jännite Hetkellinen jännite

## Induktiojännitteen graafinen määritys

Keskimääräinen jännite




Hetkellinen jännite



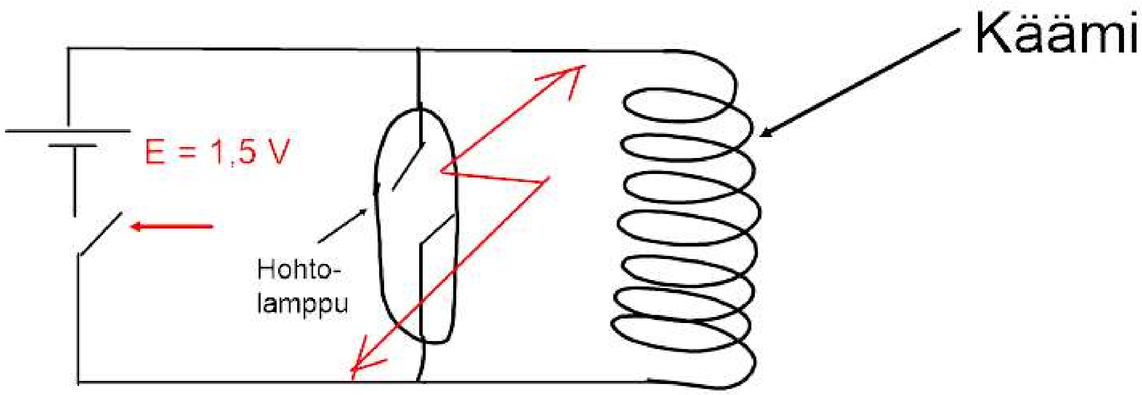

$$\boxed{e_k = - \frac{\Phi_2 - \Phi_1}{t_2 - t_1} = - \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}}$$

$$\boxed{e(t) = - \frac{d\Phi}{dt}}$$

## 9 Muuttuva magneettivuo synnyttää pyörrevirtoja

Jos johdekappale liikkuu muuttuvassa magneettikentässä, siihen indusoituu pyörrevirtoja. Pyörrevirrat pyrkivät Lentzin lain mukaisesti HIDASTAMAAN kappaleen liikettä. Samalla johdekappale lämpiää.

## 9+ Itseinduktio ja magneettikentän energia




Käämin sähkövirran vaihtelu aiheuttaa jännitepiikkejä. MIKSI?

- Selitys:
- käämi aiheuttaa magneettikentän
- kenttäviivat kulkevat käämin omien silmukoiden läpi
- muodostuu MAGNEETTIVUO $\Phi = BA_{\perp}$
- sähkövirran muuttuessa magneettivuo muuttuu
- syntyy induktiojännite

$$\boxed{e_k = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}}$$

Käämin magneettivuo on yleensä suoraan verrannollinen sähkövirtaan I eli

$$\Phi = LI,$$

missä L = käämin INDUKTANSSI eli käämin rakenteesta riippuva vakio Silloin

$\Delta\Phi = \Delta(LI) = L\Delta I$, sillä L = vakio ja

$$e_k = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = -\frac{L\Delta I}{\Delta t} = -L\frac{\Delta I}{\Delta t}$$

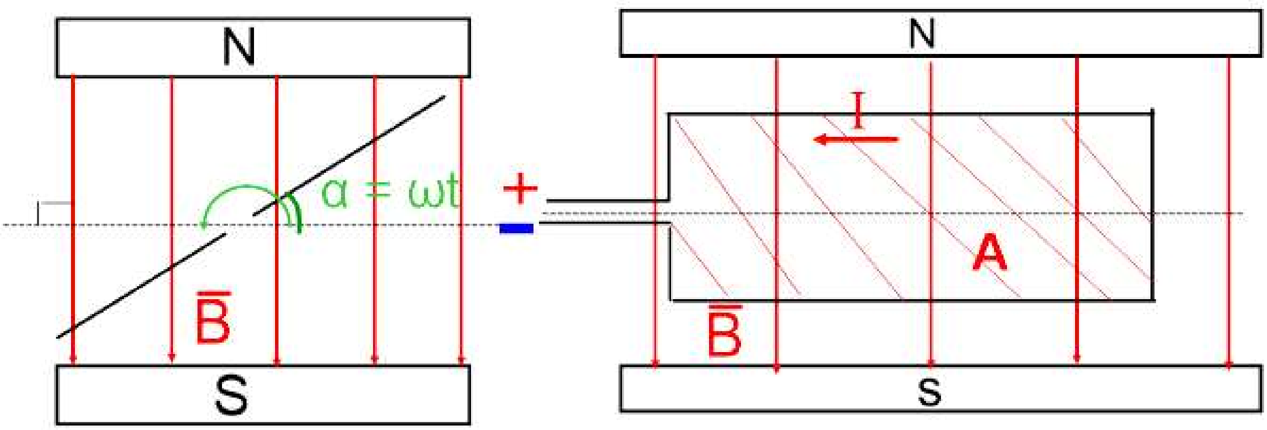
Induktanssin yksikkö:

$$e_k = -L\frac{\Delta I}{\Delta t} \quad \Rightarrow \quad L = -\frac{e_k \Delta t}{\Delta I}$$

Silloin $$[L] = \frac{[e_k]\,[\Delta t]}{[\Delta I]} = \frac{1V \cdot 1s}{1A} = 1\,\frac{Vs}{A} = 1H$$

(henry)

# 10 Generaattori tuottaa vaihtojännitettä




Pyöritetään johdinsilmukkaa (pinta-ala = A ) vakiokulmanopeudella $\omega$ homogeenisessa magneettikentässä $\overline{B}$

Silmukkaa pyörittämällä muodostuu jaksollisesti muuttuva magneettivuo

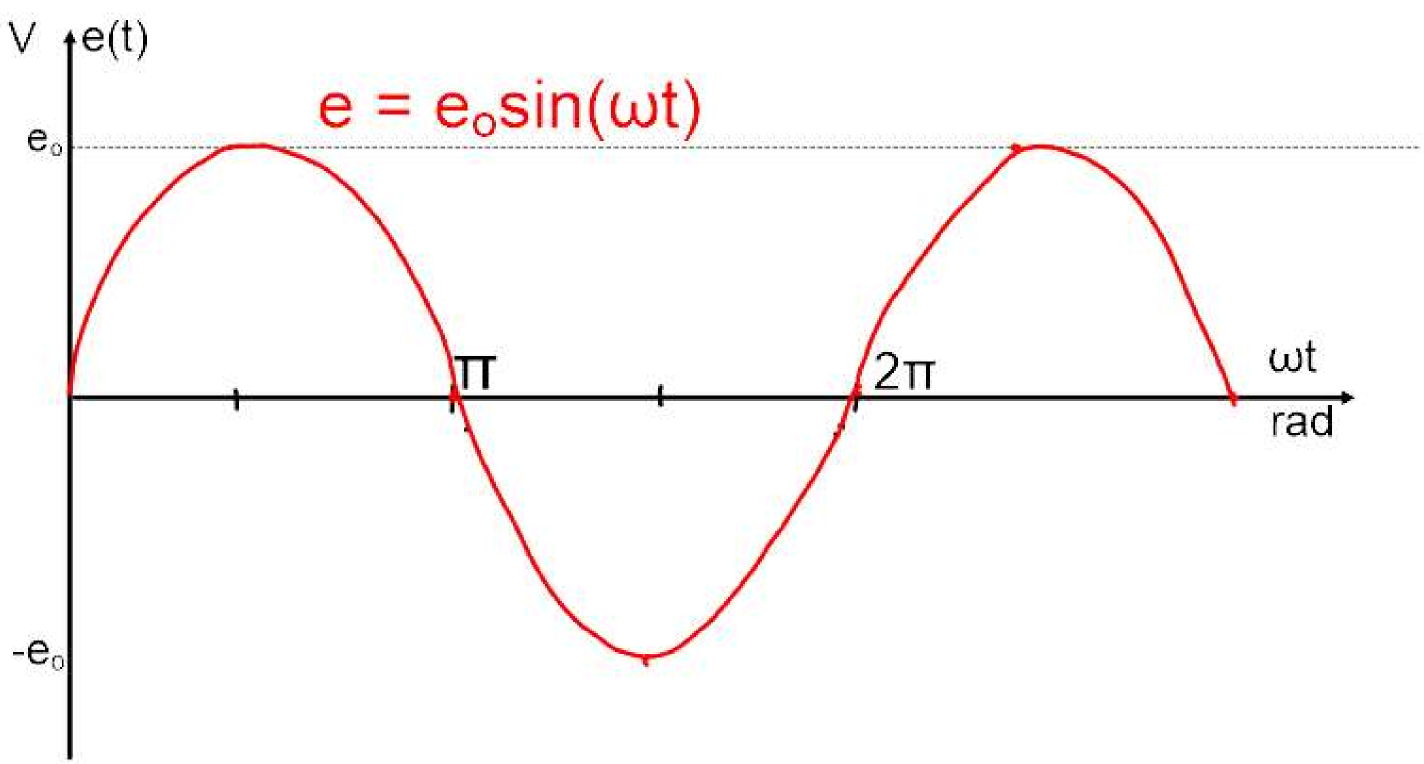
$$\Phi = BA_{\perp} = BA\cos\alpha = BA\cos(\omega t)$$

Hetkellinen jännite

$$e(t) = -\frac{d\Phi}{dt} = -\frac{d}{dt}(BA\cos(\omega t))$$

$$= -BA\frac{d(\cos(\omega t))}{dt} = -BA(-\sin(\omega t))\cdot\omega$$

$$= \underbrace{BA\omega}_{e_o}\sin(\omega t) = e_o\sin(\omega t)$$




Walter Fendt

FSU

Jos generaattorin jännite ohjataan suljettuun virtapiiriin, saadaan ajan suhteen muuttava sähkövirta (=VAIHTOVIRTA)

$$i = i(t) = \frac{e(t)}{R} = \underbrace{\frac{e_o sin(\omega t)}{R}}_{= i_o} = i_o sin(\omega t)$$

$i_o$ = sähkövirran huippuarvo, joka riippuu jännitteen huippuarvosta $e_o$ ja resistanssista R.

Usein kulmanopeus $\omega$ kirjoitetaan taajuuden f avulla:

$$\boxed{\omega = 2\pi f}$$

Silloin $e(t) = e_o sin(\omega t) = e_o sin(2\pi ft)$.

Lisäksi $f = \frac{1}{T}$, joten

$$e(t) = e_o sin(2\pi ft) = e_o sin(\frac{2\pi t}{T}).$$

# 11 Vaihtojännite synnyttää vaihtovirran

Peruskäsitteitä:

Sinimuotoinen vaihtojännite:

$e(t) = e_o \sin(\omega t) = e_o \sin(2\pi f t) = \quad e_o \sin\left(2\pi \frac{t}{T}\right)$

$e_o$ = jännitteen huippuarvo

$\omega t$ = vaihekulma

T = jaksonaika

Verkkojännitteen taajuus f = 50,00 Hz.
(Tarkka!)

Taajuus $\quad f = \frac{1}{T}$

## Vaihtovirran ja -jännitteen huippuarvot ja teholliset arvot

Merkinnät:

$u_o$ = vaihtojännitteen HUIPPUARVO

U = vaihtojännitteen TEHOLLISARVO
(= tietyllä tavalla määritelty aikakeskiarvo)

Vastaavasti

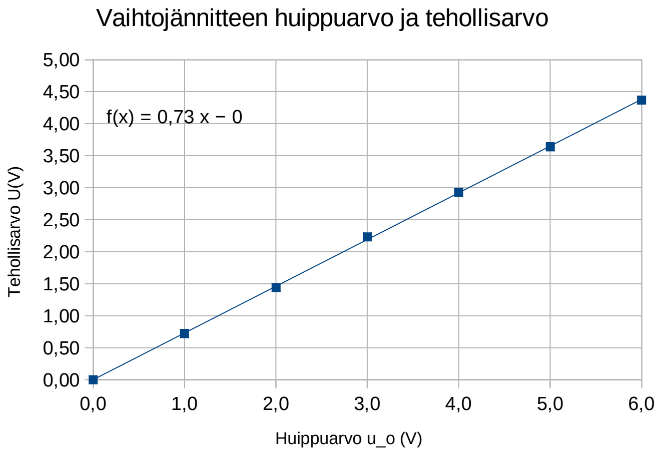
$i_o$ = vaihtovirran huippuarvo

I = vaihtovirran tehollisarvo

# Huippuarvo mitataan oskilloskoopilla. Yleismittarit näyttävät yleensä suoraan tehollisia arvoja.

Jännitteen huippuarvon ja tehollisarvon yhteys
$u_o$ = huippuarvo,  U = tehollisarvo

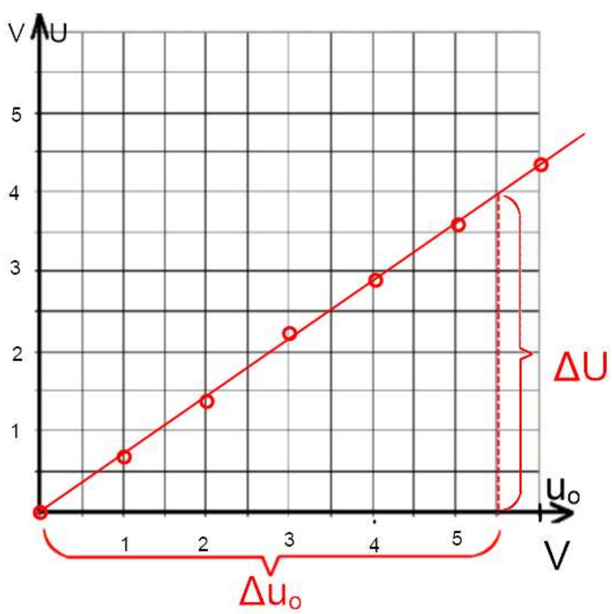
| $u_o$(V) | U(V) |
|---|---|
| 0,0 | 0,00 |
| 1,0 | 0,72 |
| 2,0 | 1,44 |
| 3,0 | 2,23 |
| 4,0 | 2,93 |
| 5,0 | 3,64 |
| 6,0 | 4,37 |




# Huippuarvo mitataan oskilloskoopilla. Yleismittarit näyttävät yleensä suoraan tehollisia arvoja.

Jännitteen huippuarvon ja tehollisarvon yhteys
$u_o$ = huippuarvo,  U = tehollisarvo

| $u_o$(V) | U(V) |
|---|---|
| 0,00 | 0,00 |
| 1,00 | 0,72 |
| 2,00 | 1,44 |
| 3,00 | 2,23 |
| 4,00 | 2,93 |
| 5,00 | 3,64 |
| 6,00 | 4,37 |



Johtopäätös: $U = ku_o$ eli verrannollisuus-kerroin saadaan kulmakertoimesta

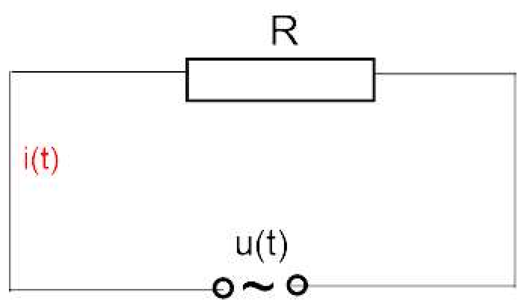
$$k = \frac{\Delta U}{\Delta u} \approx 0{,}73.$$

Teoriassa $k_{Teor} = \frac{1}{\sqrt{2}} \approx 0{,}71.$

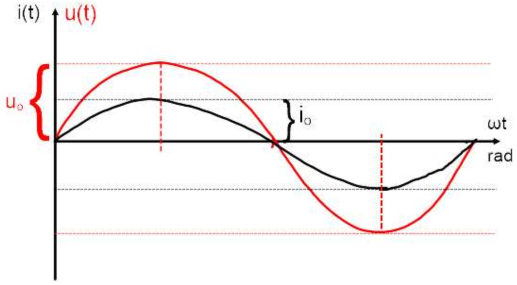
Tehollisarvojen ja huippuarvojen välinen on siis seuraava yhteys:

$$\boxed{U = \frac{u_o}{\sqrt{2}}, \quad I = \frac{i_o}{\sqrt{2}}}$$

## Vastus vaihtovirtapiirissä




Oleellista: Virta ja jännite ovat SAMASSA VAIHEESSA:




Samalla ajanhetkellä saavutetaan
- nollakohdat
- maksimit ja
- minimit

Määritellään vaihtovirtapiirin IMPEDANSSI

$$Z = \frac{u_o}{i_o}$$

eli $u_o = Zi_o \;|:\sqrt{2}$ ja $\underbrace{\frac{u_o}{\sqrt{2}}}_{U} = Z\underbrace{\frac{i_o}{\sqrt{2}}}_{I}$

eli $\boxed{U = ZI}$

Jos piirissä on vain resistanssia, niin $Z = R$ ja virtapiirille on voimassa ehdot $u_o = Ri_o$, $U = RI$

Huippuarvoja

Tehollisarvoja

## Vaihtovirtapiirin impedanssi

Vaihtovirtapiireissä virtaa rajoittava ominaisuus eli IMPEDANSSI **Z** on resistanssia yleisempi käsite ja se toteuttaa yhtälöt

$\boxed{u_o = Zi_o}$ Pätee huippuarvoille ja

$\boxed{U = ZI}$ Pätee tehollisarvoille

Impedanssin avulla voidaan määrittää esim. kondensaattorin kapasitanssi tai käämin virranmuutosherkkyyttä kuvaava ominaisuus eli INDUKTANSSI **L**.

Mittaus on helppo toteuttaa yleismittarien avulla 50 Hz verkkojännitettä käyttäen, jolloin $\omega = 2\pi f$ ja f = 50,00 1/s.

Jos vaihtovirtapiirissä on vain resistiivinen vastus,

$$\boxed{Z = Z_R = R}$$

Käämi ja vaihtovirtapiiri:

$$\boxed{Z = Z_L = \sqrt{R^2 + \omega^2 L^2}}$$

L = käämin induktanssi,
R = käämilangan resistanssi

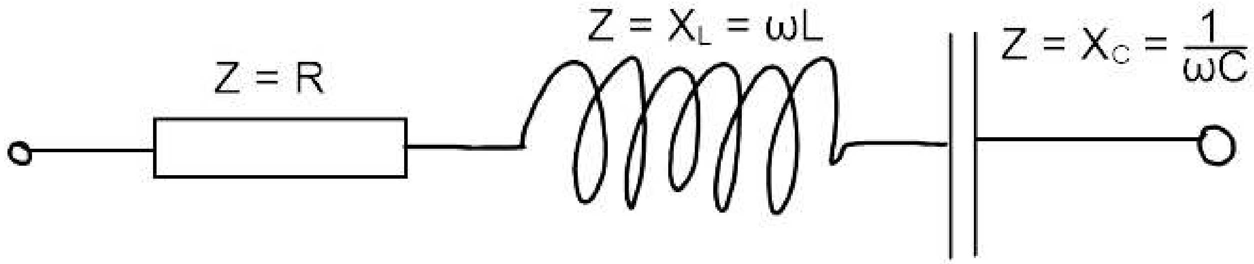
Kondensaattori ja vaihtovirtapiiri:

$$\boxed{Z = Z_C = \frac{1}{\omega C}}$$

C = kondensaattorin kapasitanssi

# Vastus, käämi ja kondensaattori sarjassa:

# X = reaktiivinen impedanssi eli REAKTANSSI




$$Z = \sqrt{R^2 + X^2} = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}$$

eli $Z = \sqrt{R^2 + (\omega L - \frac{1}{\omega C})^2}$ MAOL s.133

# ESIMERKKI: Käämin resistanssi ja impedanssi

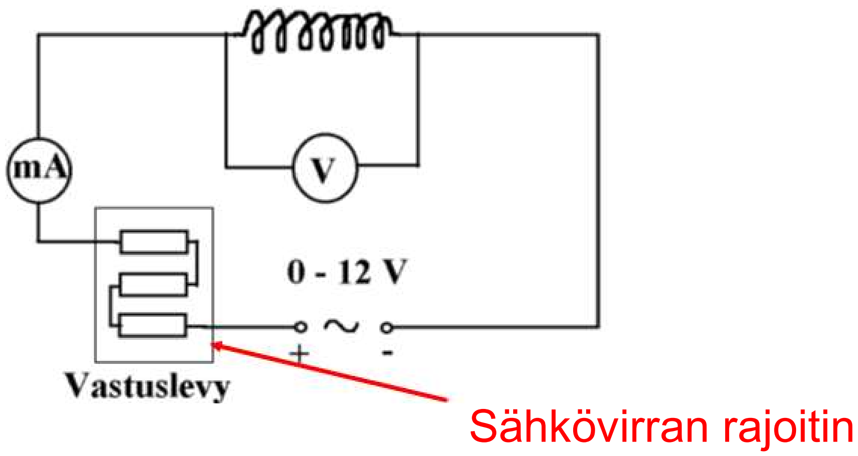
Analysointi:

R = 11,0 Ω

Z = 91,0 Ω

| $I_{DC}$(A) | $U_{DC}$(V) | $I_{AC}$(A) | $U_{AC}$(V) |
|---|---|---|---|
| 0,010 | 0,114 | 0,010 | 0,945 |
| 0,020 | 0,226 | 0,020 | 1,850 |
| 0,030 | 0,338 | 0,030 | 2,71 |
| 0,040 | 0,450 | 0,040 | 3,65 |
| 0,050 | 0,565 | 0,050 | 4,57 |
| 0,060 | 0,676 | 0,060 | 5,51 |
| 0,070 | 0,790 | 0,070 | 6,43 |

**Käämi vaihtovirtapiirissä**
Kytkentä:




- mittaa käämin jännitehäviö tasavirralla (DC) käyttäen virta-aluetta (0 - 100) mA
- vaihda mittarit ja jännitelähde vaihtovirta-alueelle (AC) ja mittaa vastaavat vaihto-jännitehäviöt

Taulukointi:

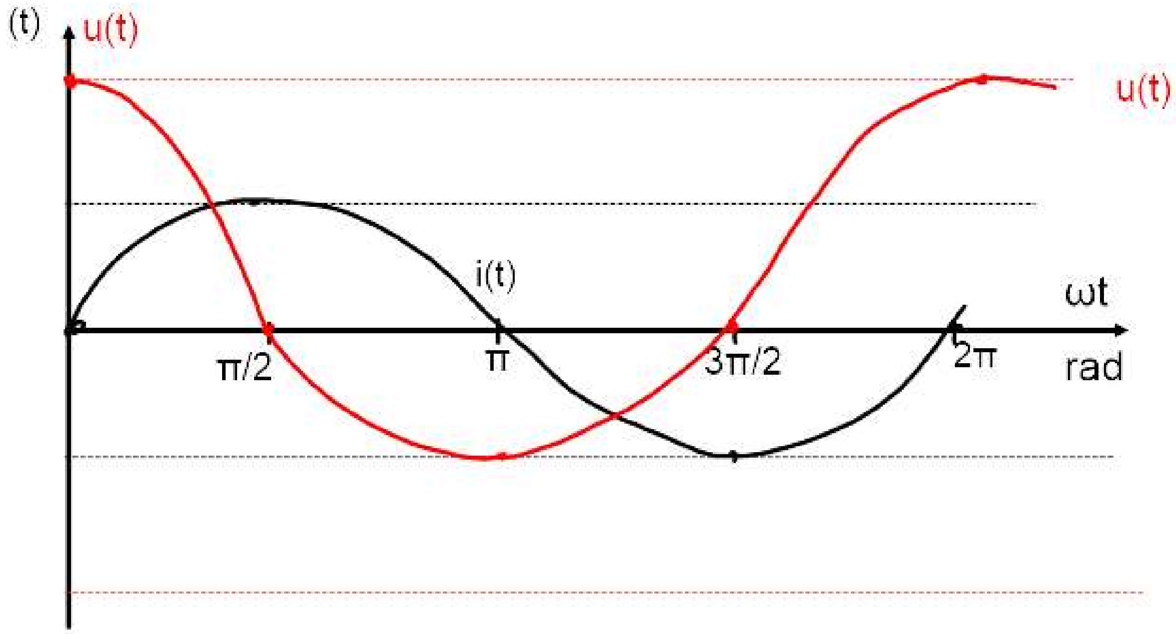
| $I_{DC}$ (mA) | $U_{DC}$ (V) | $I_{AC}$ (mA) | $U_{AC}$ (V) |
|---|---|---|---|
| 0 | 0,00 | 0 | 0,00 |
| 10 | 0,12 | 10 | 0,92 |
| 20 | 0,25 | 20 | 1,85 |
| 30 | 0,37 | 30 | 2,75 |
| 40 | 0,50 | 40 | 3,70 |
| 50 | 0,63 | 50 | 4,60 |
| 60 | 0,75 | 60 | 5,50 |
| 70 | 0,88 | 70 | 6,44 |
| 80 | 1,00 | 80 | 7,40 |
| 90 | 1,12 | 90 | 8,25 |
| 100 | 1,26 | 100 | 9,20 |

$R = 12{,}56\ \Omega$
$Z = 91{,}95\ \Omega$

Piirrä tulokset samaan kuvaan.

# Käämi vaihtovirtapiirissä

Oleellista: Jännite on "virran edellä":




Käämin virtaa rajoittava erikoisominaisuus on INDUKTIIVINEN REAKTANSSI

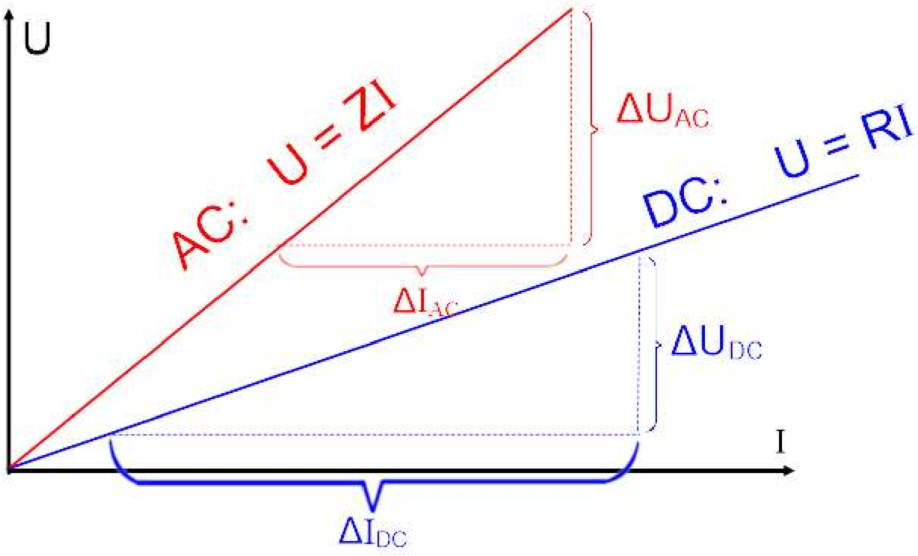
$$x_L = \omega L = 2\pi f L$$

$$[x_L] = [f][L] = \frac{1}{\cancel{s}} \cdot 1\frac{V\cancel{s}}{A} = 1V/A = 1\Omega \text{ (ohmi)}$$

Käämin IMPEDANSSI

$$\boxed{Z = \sqrt{R^2 + X_L^2} = \sqrt{R^2 + (\omega L)^2}}$$

$\omega = 2\pi f$, $f = 50$ 1/s




$$R = \frac{\Delta U_{DC}}{\Delta I_{DC}} \qquad Z = \frac{\Delta U_{AC}}{\Delta I_{AC}}$$

f = 50,0 1/s, $\omega = 2\pi f$

Tyypillisiä tuloksia:

$R \approx 12{,}56\ \Omega = 12{,}56$ V/A

$Z \approx 91{,}95\ \Omega = 91{,}95$ V/A

Tiedetään:

$$Z = \sqrt{R^2 + X_L^2} \quad | \; x_L = \omega L \qquad Z = \sqrt{R^2 + (\omega L)^2}$$

$$Z = \sqrt{R^2 + \omega^2 L^2} \quad | \; ()^2 \qquad Z^2 = R^2 + \omega^2 L^2$$

$$\omega^2 L^2 = Z^2 - R^2 \quad \mid \sqrt{\phantom{x}} \qquad \omega L = \sqrt{Z^2 - R^2}$$

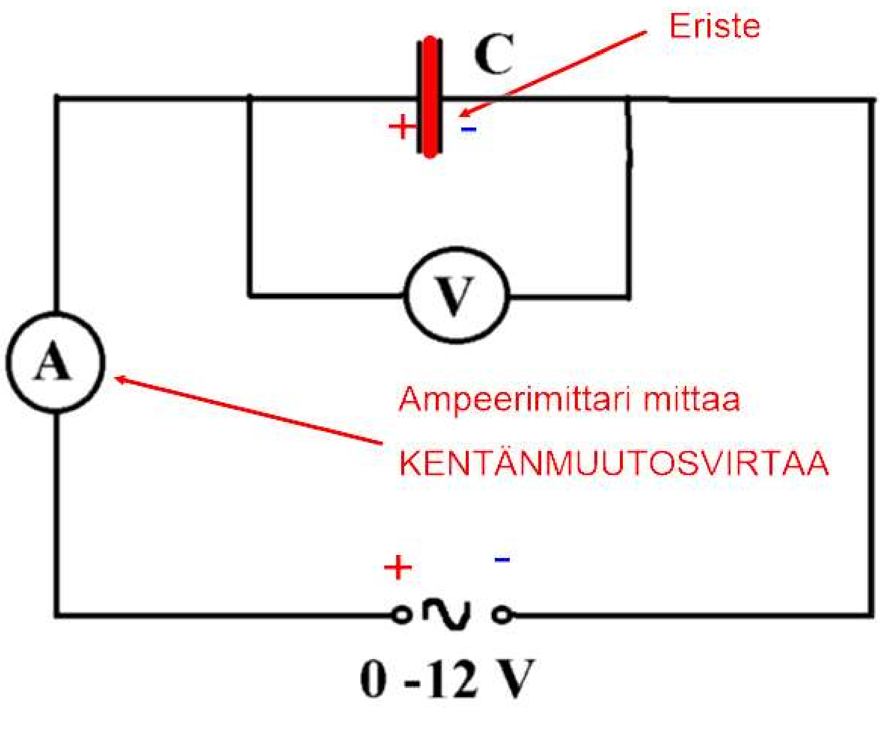
$$L = \frac{\sqrt{Z^2 - R^2}}{\omega} = \frac{\sqrt{Z^2 - R^2}}{2\pi f}$$

$$= \frac{\sqrt{91{,}95^2\ V^2/A^2 - 12{,}56^2\ V^2/A^2}}{2\pi \cdot 50\ 1/s}$$

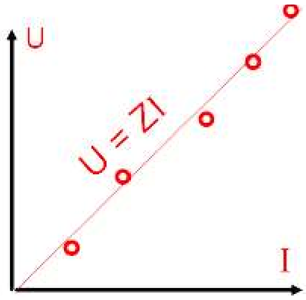
$$\approx 0{,}2899\ \underbrace{Vs/A}_{H} \approx \underline{290\ mH}$$

Kondensaattori vaihtovirtapiirissä

Kytkentä:



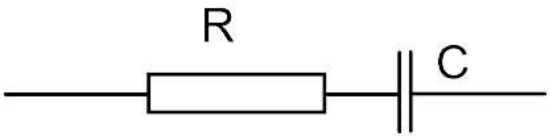
# Taulukointi:




| $I_{AC}$(mA) | $U_{AC}$(V) |
|---|---|
| 0,00 | 0,00 |
| 0,50 | 1,50 |
| 1,00 | 2,98 |
| 1,50 | 4,40 |
| 2,00 | 5,85 |
| 2,50 | 7,29 |
| 3,00 | 8,73 |
| 3,50 | 10,14 |
| 4,00 | 11,54 |
| 4,50 | 12,90 |
| | |

Tulosten perusteella
$Z \approx 2868$ V/A $= 2868\ \Omega$.

# Kondensaattorin impedanssi




$$Z = \sqrt{R^2 + X_C^2} = \sqrt{R^2 + \frac{1}{\omega^2 C^2}}$$

$$X_C = \text{kapasitiivinen reaktanssi} = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi f C}$$

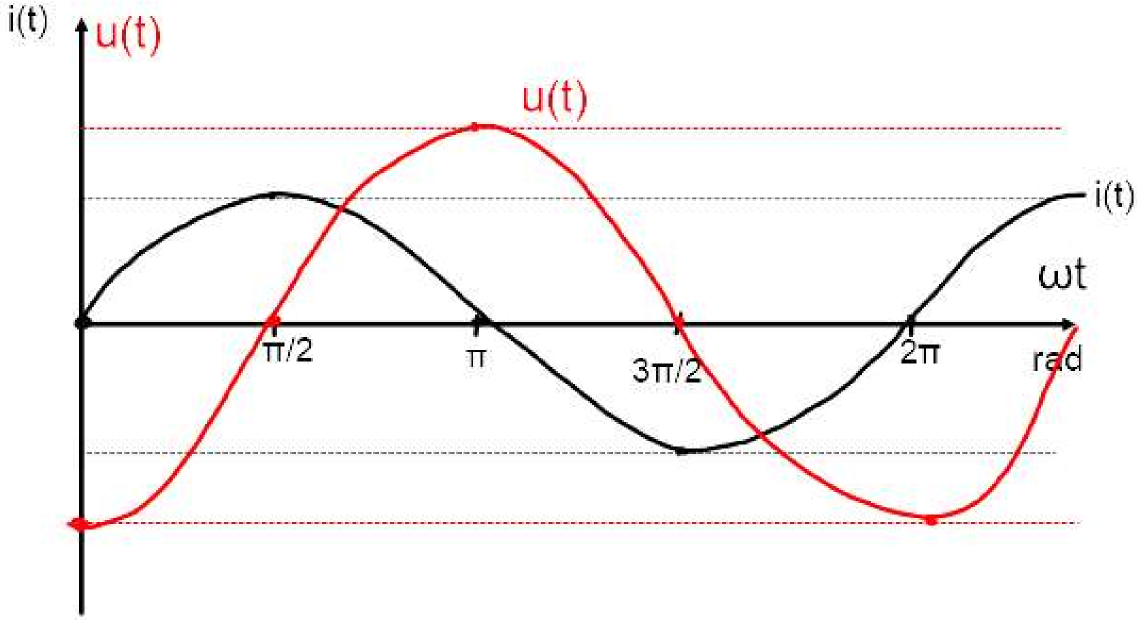
Yleensä $R \approx 0$, joten $Z = \sqrt{\frac{1}{\omega^2 C^2}} = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi f C}$

Yleismittari:
C = 1,02 μF.

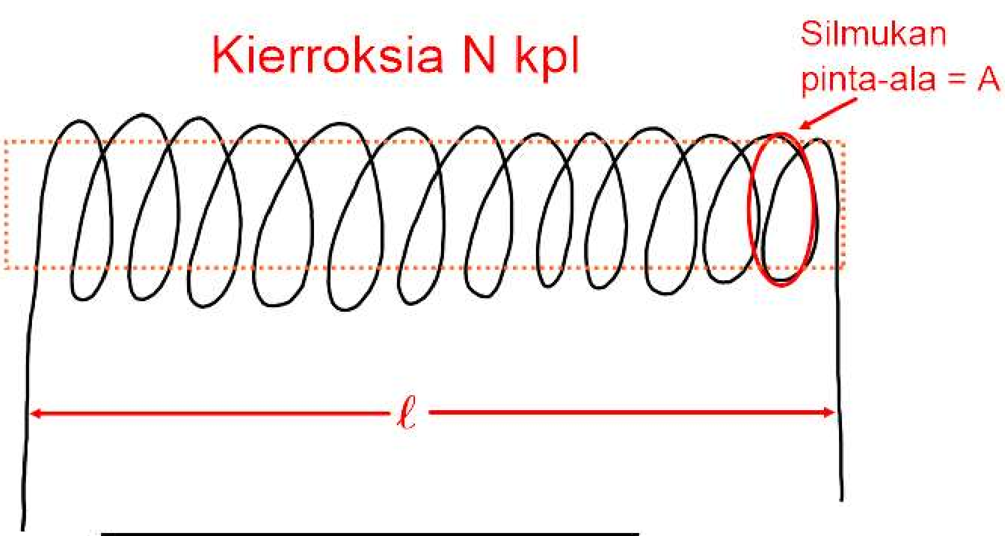
Silloin $C = \frac{1}{2\pi f Z} = \frac{1}{2\pi \cdot 50\ 1/\text{s} \cdot 2868\ \text{V/A}}$

$\approx 1{,}110 \cdot 10^{-6}\ \underbrace{\text{As/V}}_{\text{F}} \approx \underline{1{,}1\ \mu\text{F}}.$

# Kondensaattoripiirissä "jännite on jäljessä":




# Käämin induktanssin likimääräinen kaava:




$$\boxed{L \approx \frac{\mu_o \mu_r N^2 A}{\ell}}$$

MAOL s. 133

ESIMERKKI

$\ell$ = 65mm

A= 9,0 cm$^2$ = 9,0·10$^{-4}$ m$^2$

N = 12000

$\mu_o$ = 4π·10$^{-7}$ Vs/Am, $\mu_r$ = 1,0

$$L = \frac{\mu_o \mu_r N^2 A}{\ell} = \frac{4\pi \cdot 10^{-7}\ \mathrm{Vs/A}\cancel{\mathrm{m}} \cdot 1{,}0 \cdot 12000^2 \cdot 9{,}0 \cdot 10^{-4}\ \cancel{\mathrm{m}^2}}{0{,}065\ \cancel{\mathrm{m}}}$$

$$\approx 2{,}5055\ \mathrm{Vs/A} \approx 2{,}5\ \mathrm{H}$$

Yksi henry on suuri yksikkö...

## 11++ Magneettikentän energia

Käämi vastustaa (Lenzin lain mukaisesti) sitä, että siihen yritetään kytkeä sähkövirta. Sähkövirran kytkemiseksi on TEHTÄVÄ TYÖTÄ. Tehty työ jää talteen magneettikentän energiaksi:

$$\boxed{E_B = \tfrac{1}{2} L I^2}$$

Vrt. $E_k = \tfrac{1}{2} m v^2$

# 12 Sähkön välityksellä siirretään energiaa

## Muuntaja

Ongelma: Miten verkkojännite muunnetaan pieneksi tasajännitteeksi?

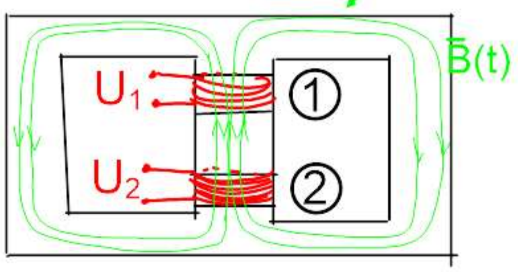
Tarvitaan

- muuntaja
- tasasuuntaaja ja
- suodatus

Simulaatio toimintaperiaatteesta

1. Muuntaja

Sama magneettivuo kulkee kummankin käämin läpi

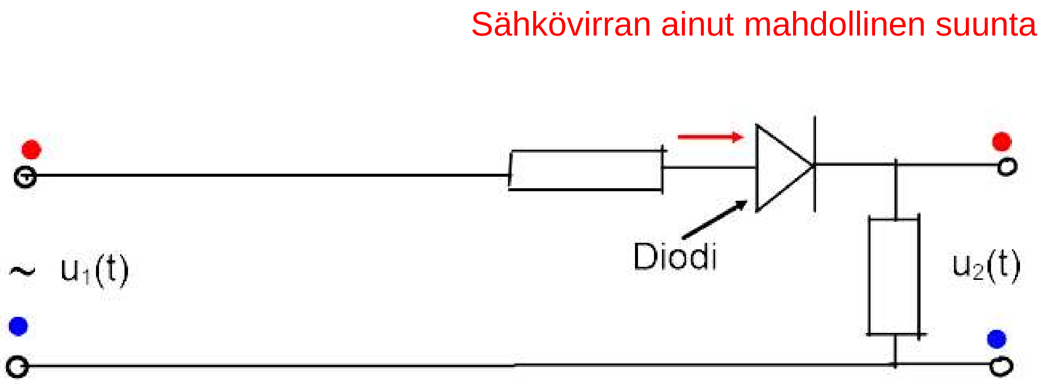


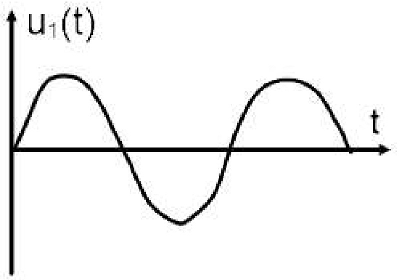

Käämi 1: $N_1$ kierrosta
Käämi 2: $N_2$ kierrosta

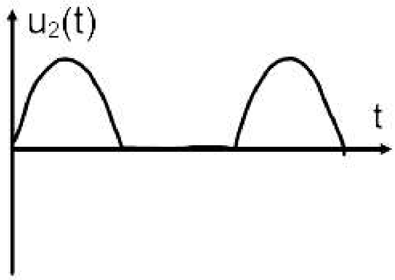
$$U_1 = N_1\left(-\frac{d\Phi}{dt}\right) \qquad U_2 = N_2\left(-\frac{d\Phi}{dt}\right)$$

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1\left(-\cancel{\frac{d\Phi}{dt}}\right)}{N_2\left(-\cancel{\frac{d\Phi}{dt}}\right)} = \frac{N_1}{N_2}, \quad \text{siis} \quad \boxed{\frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2}}$$

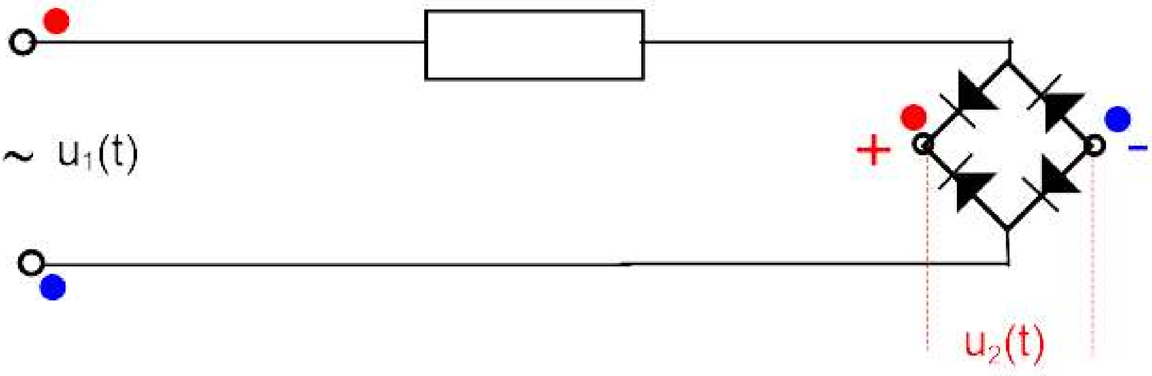
# 2. Tasasuuntaus
# 2.1 Puoliaaltotasasuuntaaja

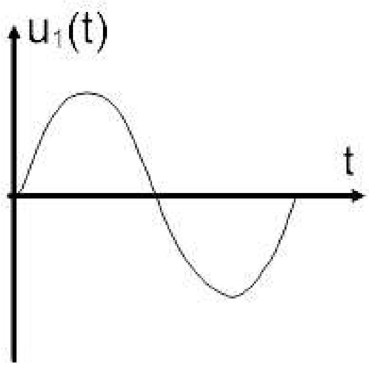


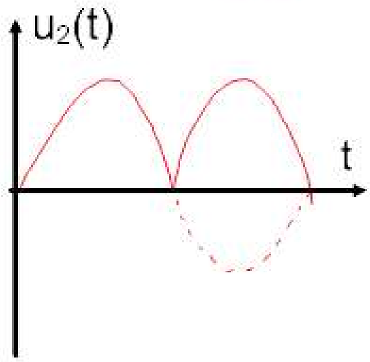



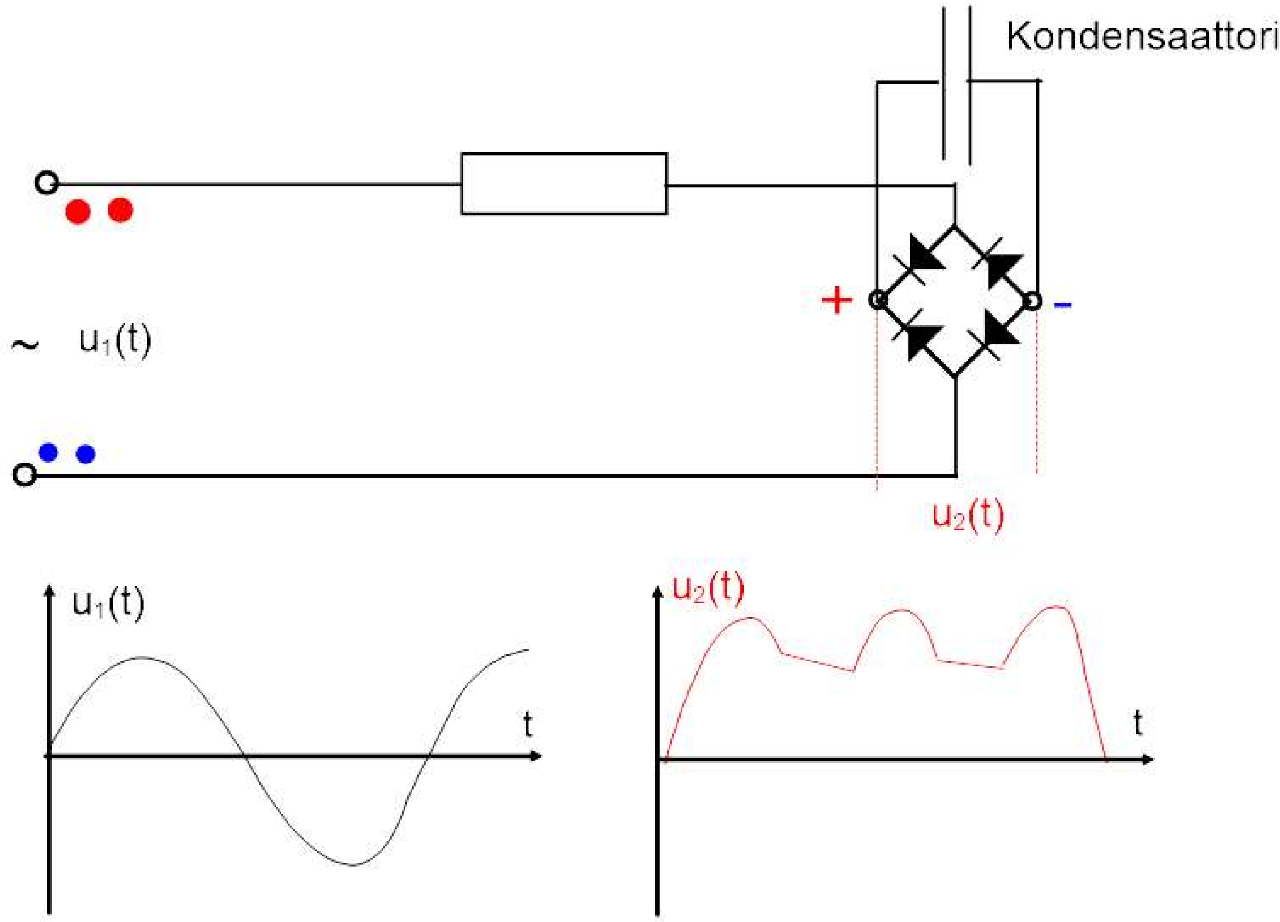

# 2.2 Kokoaaltotasasuuntaaja



# 3. Kokoaaltotasasuuntaaja + suodatus

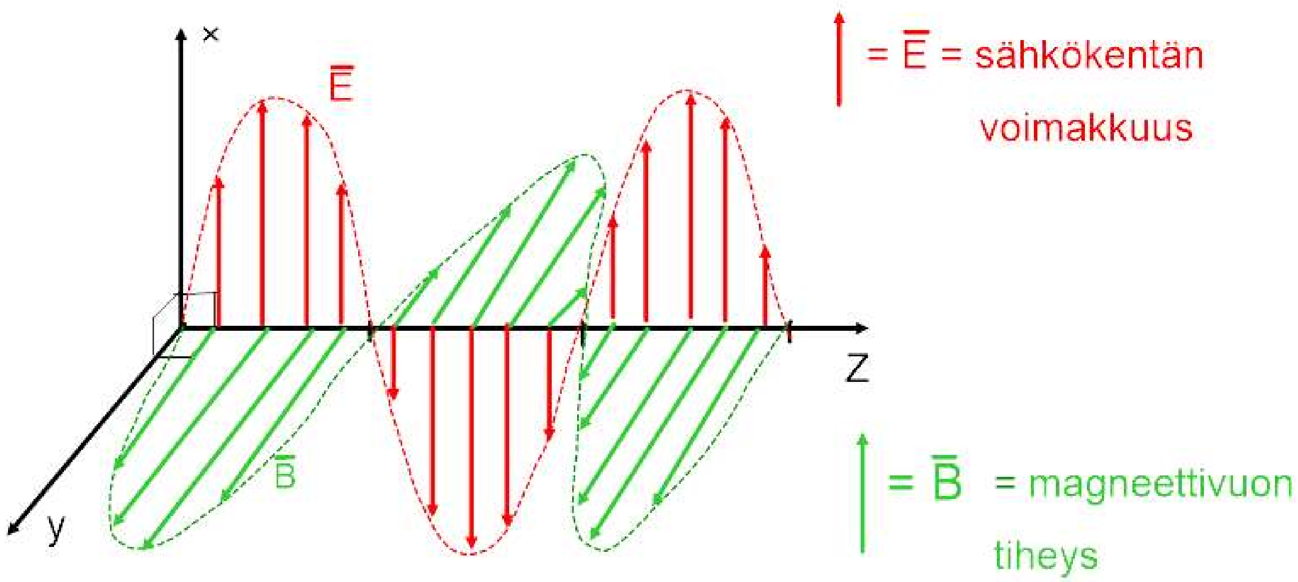



# 13 Sähkömagneettinen säteily

Työnjako:

- sähkövarauksiin liittyy aina Coulombin voima
- liikkuviin sähkövarauksiin (sähkövirtoihin) liittyy aina magneettinen voima (tämän kurssin uusi asia)
- kiihtyvässä tai hidastuvassa liikkeessä oleva varattu hiukkanen lähettää sähkömagneettista säteilyä, esimerkiksi valoa

• silloin sähkökenttä ($\overline{E}$) ja magneettikenttä ($\overline{B}$) kytkeytyvät toisiinsa ja muodostavat aallon etenemissuunnan kanssa ”oikea-kätisen systeemin” Ks. animaatio




| Säteilyn laji | Säteilyn aiheuttaja | Aallonpituusalue | Ominaisuuksia |
|---|---|---|---|
| Radioaallot | Värähtelypiirit | 10 cm – 10 km | Etenevät ilman väliainetta |
| Mikroaallot | Pyörivät molekyylit | 1 mm – 1 m | Tutka- ja kännykkäaaltoja |
| Lämpösäteily | Värähtelevät molekyylit | 1 μm – 1 mm | Aistitaan lämpönä |
| Näkyvä valo | Elektronisiirtymät[1] | 380 nm - 800 nm | Havaitaan näköaistin avulla |
| UV-säteily | Elektronisiirtymät[2] | 1 nm – 380 nm | Vaurioittaa mm. ihoa |
| Röntgensäteily | Elektronisiirtymät[3] | 10 pm - 1nm | Läpitunkevaa säteilyä, tuhoaa eläviä soluja |
| Gammasäteily | Ytimen viritykset | 10 fm – 10 pm | Läpitunkevaa säteilyä, tuhoaa eläviä soluja |

[1]Keveiden alkuaineiden atomien uloimmilla elektronikuorilla
[2]Keskiraskaiden alkuaineiden atomien uloimmilla elektronikuorilla
[3]Raskaiden alkuaineiden atomien sisimmillä elektronikuorilla

## 14 Valo sähkömagneettisena aaltoliikkeenä

Työnjako:

- sähkövarauksiin liittyy aina Coulombin voima
- liikkuviin sähkövarauksiin (sähkövirtoihin) liittyy aina magneettinen voima (tämän kurssin uusi asia)
- kiihtyvässä tai hidastuvassa liikkeessä oleva varattu hiukkanen lähettää sähkömagneettista säteilyä, esimerkiksi valoa

## Valkoisen valon spektri ja DISPERSIO

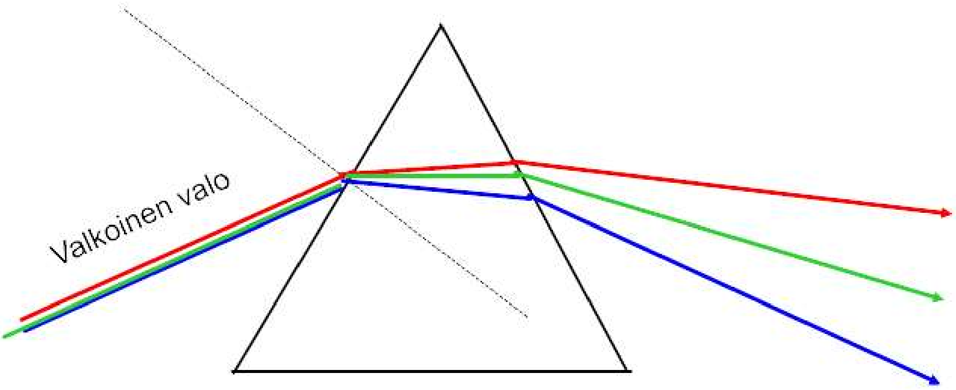
IDEA: Aaltoliikkeen eri aallonpituudet etenevät väliaineessa eri tavalla.

Seuraus: Monia värejä eli aallonpituuksia sisältävä VALKOINEN VALO hajaantuu eri väreihin.

Punainen valo: $\lambda \approx 700 \text{ nm}.$
Violetti valo: $\lambda \approx 400 \text{ nm}.$

Dispersio prismassa:

Simulaatio

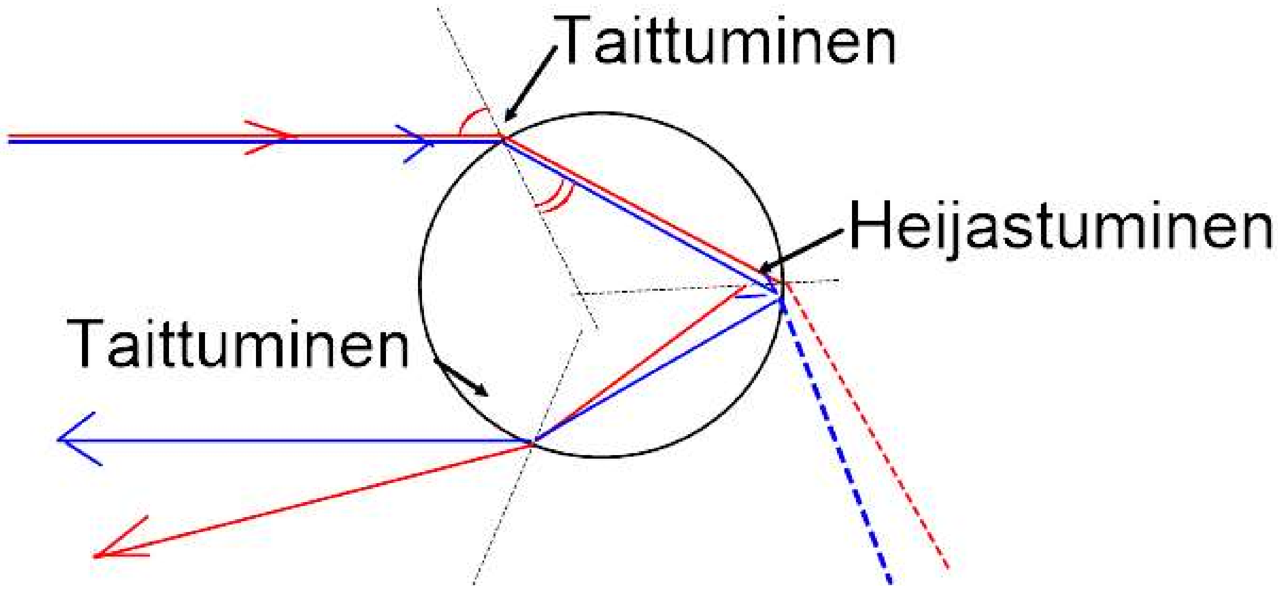



Geogebra-appletti

Lyhin aallonpituus muuttaa suuntaansa eniten.

Syy: Taitekerroin riippuu aallonpituudesta siten että pienintä aallonpituutta (= SINI-NEN VALO) vastaa suurin taitekerroin.

Sateenkaaren syntymekanismi: Valo taittuu ja heijastuu vesipisaroissa:




Lopputulos: Eri värit erottuvat!

Valo ja muu sähkömagneettinen säteily toteuttaa aaltoliikkeen perusyhtälön

$$\boxed{c = \lambda f.}$$

Valon etenemisnopeus tyhjiössä

$c_o \approx 2{,}997 \cdot 10^8$ m/s

$\approx 3{,}00 \cdot 10^8$ m/s

= 300000 km/s

**Miten valon voimakkuutta mitataan?**

**VALOVIRTA** $\Phi$ **(= "Fii")**

- mitataan valotehoa, joka suhteutetaan ihmisen silmän herkkyyteen (vrt. foni-asteikko)

- $[\Phi]$ = 1 lm (lumen)

# VALAISTUSVOIMAKKUUS E

$$\text{Valaistusvoimakkuus} = \frac{\text{Valovirta}}{\text{Pinta-ala}}$$

Kaava: $\boxed{E = \frac{\Phi}{A}}$

Valaistusvoimakkuuden yksikkö:

$$[E] = \frac{[\Phi]}{[A]} = \frac{1\,\text{lm}}{1\,\text{m}^2} = 1\,\text{lx (luksi)}$$

Sopiva työhuoneen valaistusvoimakkuus on 500 lx -2000 lx.

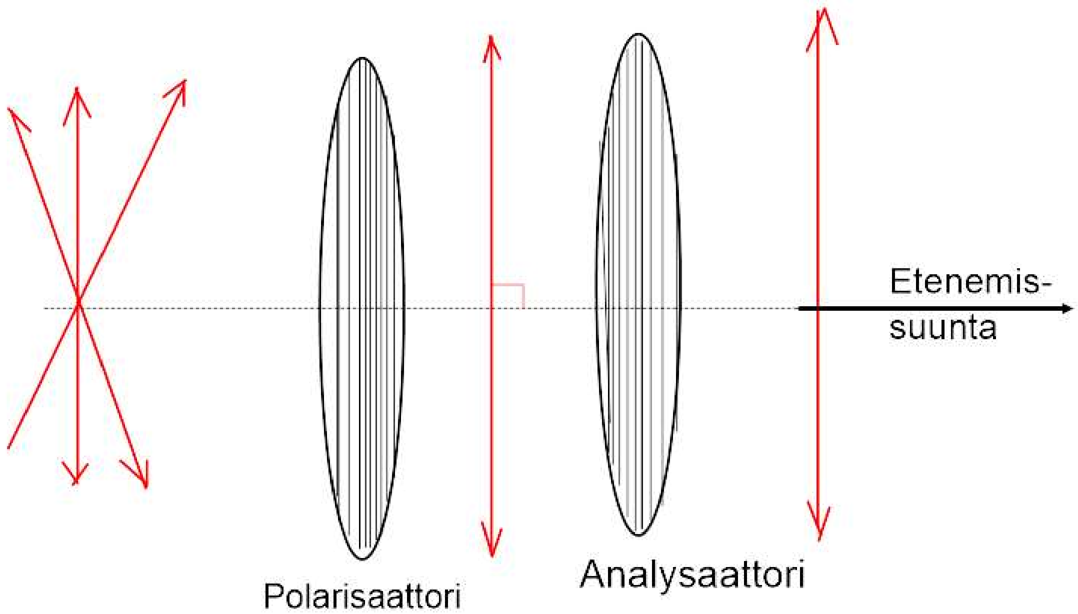
# VALOVOIMA I

- SI-järjestelmän perussuure
- kuvaa valonlähteen kirkkautta

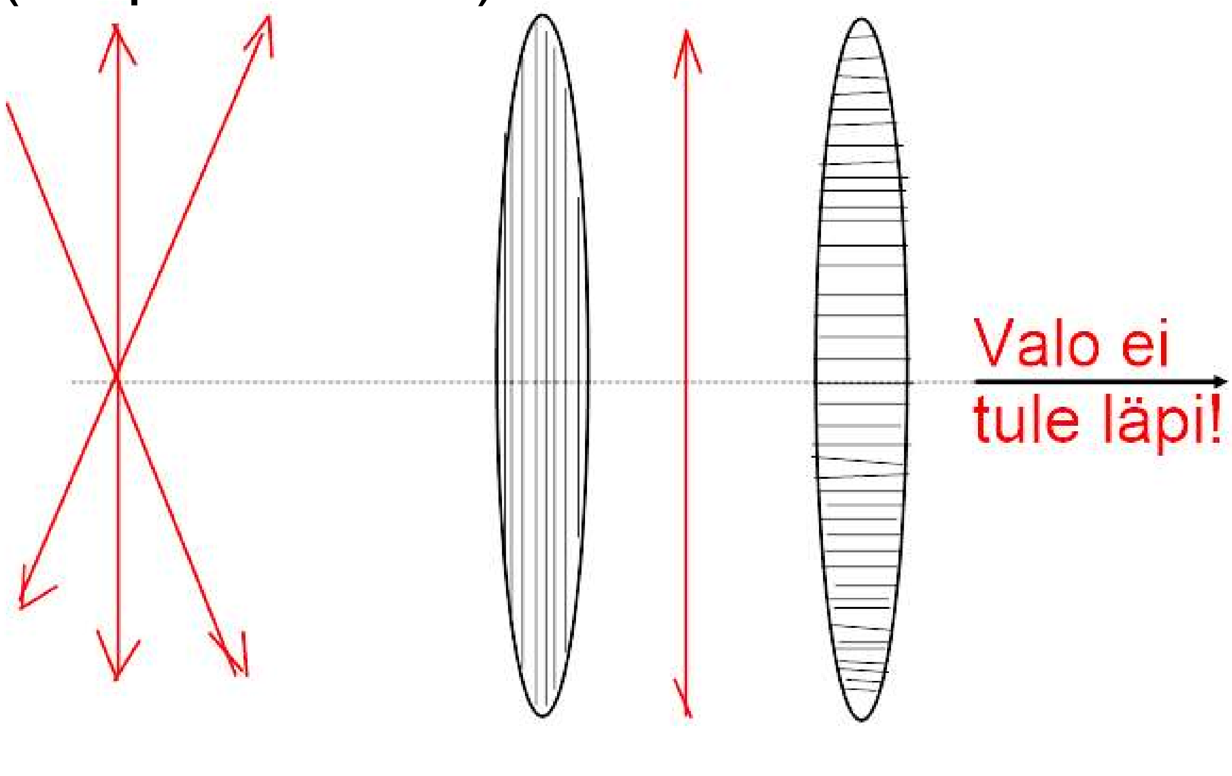
[I] = 1cd (kandela)

# Polarisaatio

- Sähkö- ja magneettikentän värähdyssuuntia rajoitetaan




- jos polarisaattori ja analysaattori ovat ristikkäin, valo ei pääse läpi (ristipolarisaatio):

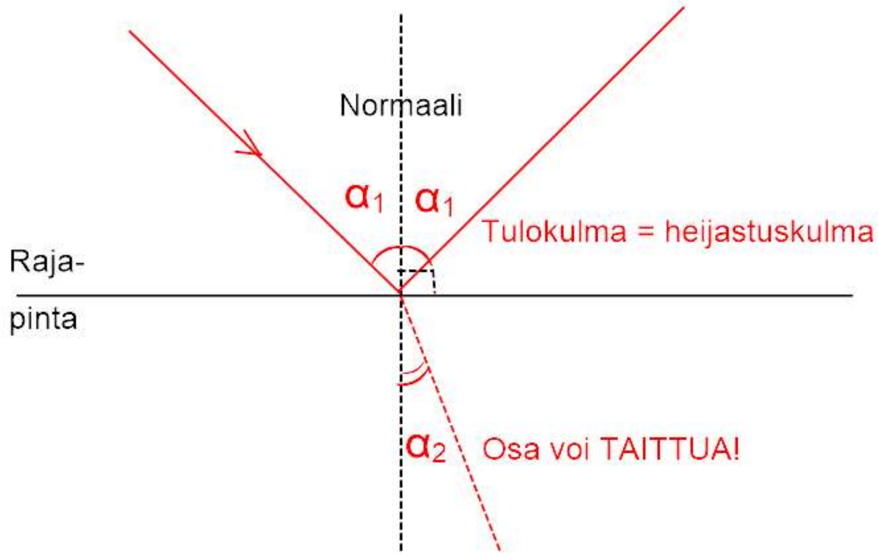


# 15 Valon käyttäytyminen aineiden raja-pinnassa

Heijastuminen ja taittuminen(Walter Fendt)

## **HEIJASTUMINEN** (engl. Reflection)

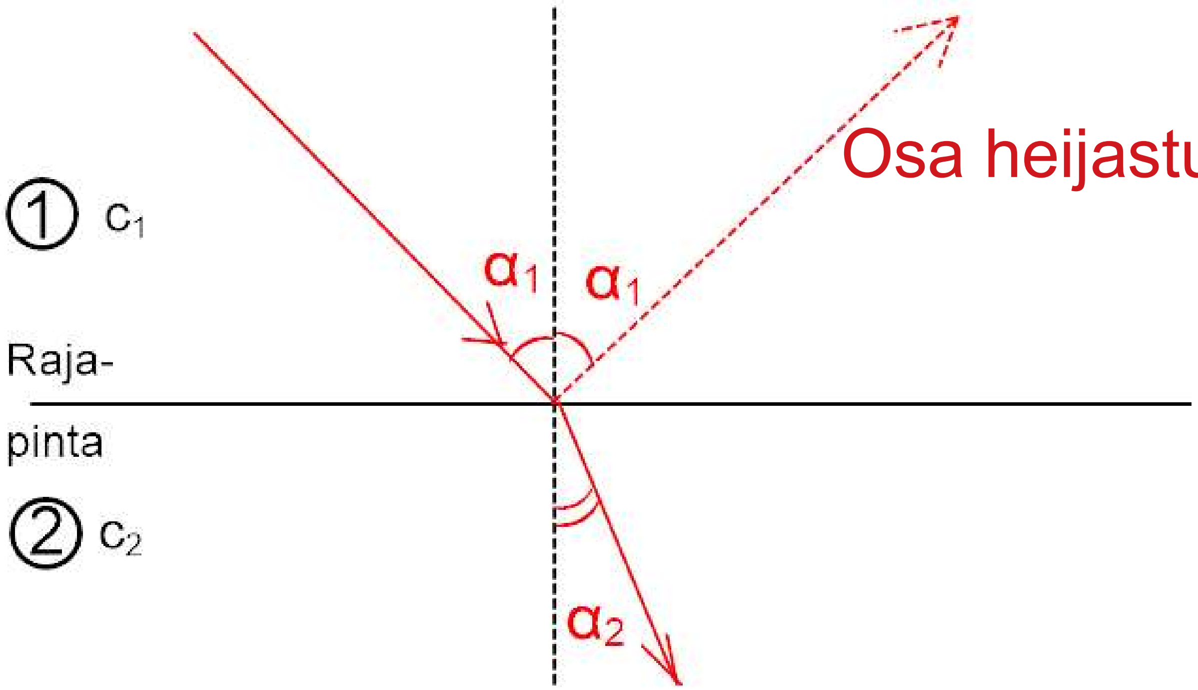
- symmetrinen rajapintailmiö:




## **TAITTUMINEN** (engl. Refraction)

- valo ylittää rajapinnan ja muuttaa yleensä suuntaansa

Taittuva valo (Phet)



# Taittumislaki:

$$\boxed{\frac{\sin\alpha_1}{\sin\alpha_2} = \frac{c_1}{c_2}}$$

Miten hallitaan valon nopeudet??!!
Ne ovat hirveän suuria...

Aineen taitekerroin n kuvaa valon etenemisnopeuden suhteellista muutosta:

Valon nopeus tyhjiössä

$$n = \frac{c}{c_{aine}}$$

eli

$$\boxed{c_{aine} = \frac{c}{n}}$$

Taitekerroin

Valon nopeus aineessa

Yleensä n $\geq 1$ eli valon nopeus ei voi missään väliaineessa olla suurempi kuin tyhjiössä.

Syötetään taittumislakiin ehdot

$$c_1 = \frac{c_o}{n_1} \qquad \text{ja} \qquad c_2 = \frac{c_o}{n_2}\,.$$

Sijoitetaan taittumislakiin:

$$\frac{\sin\alpha_1}{\sin\alpha_2}=\frac{c_1}{c_2}=\frac{\cancel{c_o}/n_1}{\cancel{c_o}/n_2}=\frac{1/n_1}{1/n_2}=\frac{n_2}{n_1}$$

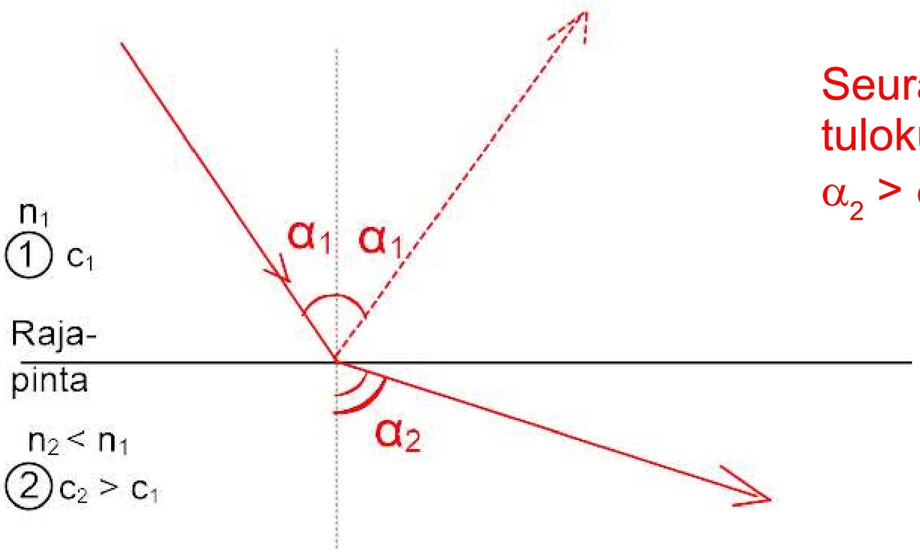
Saadaan ehto $\frac{\sin\alpha_1}{\sin\alpha_2}=\frac{n_2}{n_1}$ eli

$$\boxed{n_1\sin\alpha_1 = n_2\sin\alpha_2}$$

Snelliuksen laki

# KOKONAISHEIJASTUMINEN

Lähtökohta: Valon etenemisnopeus KASVAA rajapinnan ylittämisen jälkeen.




Seuraus: Taitekulma on tulokulmaa suurempi eli $\alpha_2 > \alpha_1$.

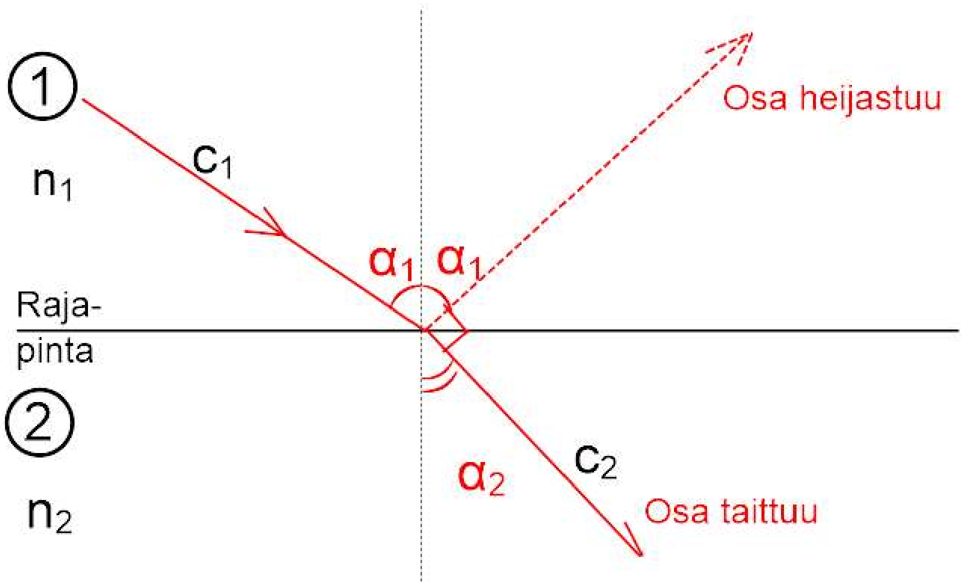
Kokonaisheijastuksen rajakulma saavutetaan, kun $\alpha_2$ = 90$^o$ eli $sin\alpha_2$ = 1. Merkitään, että silloin $\alpha_1 = \alpha_r$ eli kyseessä on rajakulma. Snelliuksen lain perusteella

$n_1 sin\alpha_r = n_2 \underbrace{sin\alpha_2}_{1}$ eli $n_1 sin\alpha_r = n_2 \quad | :n_1$

eli siis $\boxed{sin\alpha_r = \dfrac{n_2}{n_1}}$ Huomaa, että $n_2 < n_1$

## Heijastuspolarisaatio

- rajapinnassa osa valosta heijastuu ja osa taittuu



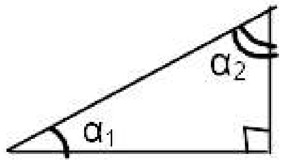
Rajapinnasta heijastunut säde on ainakin osittain polarisoitunut.

Polarisaatio on täydellinen, kun heijastuneen ja taittuneen säteen välinen kulma on 90°.

Silloin $\alpha_1 + 90^\circ + \alpha_2 = 180^\circ$ eli

$\alpha_1 + \alpha_2 = 180^\circ - 90^\circ$ eli

$\alpha_1 + \alpha_2 = 90^\circ$.




Snelliuksen laki:

$$n_1 \sin\alpha_1 = n_2 \sin\alpha_2 \quad |\alpha_2 = 90^\circ - \alpha_1$$

$$n_1 \sin\alpha_1 = n_2 \underbrace{\sin(90^\circ - \alpha_1)}_{\cos\alpha_1}$$

$$n_1 \sin\alpha_1 = n_2 \cos\alpha_1 \quad |:n_1 \cos\alpha_1$$

$$\underbrace{\frac{\sin\alpha_1}{\cos\alpha_1}}_{\tan\alpha_1} = \frac{n_2}{n_1}$$ eli siis

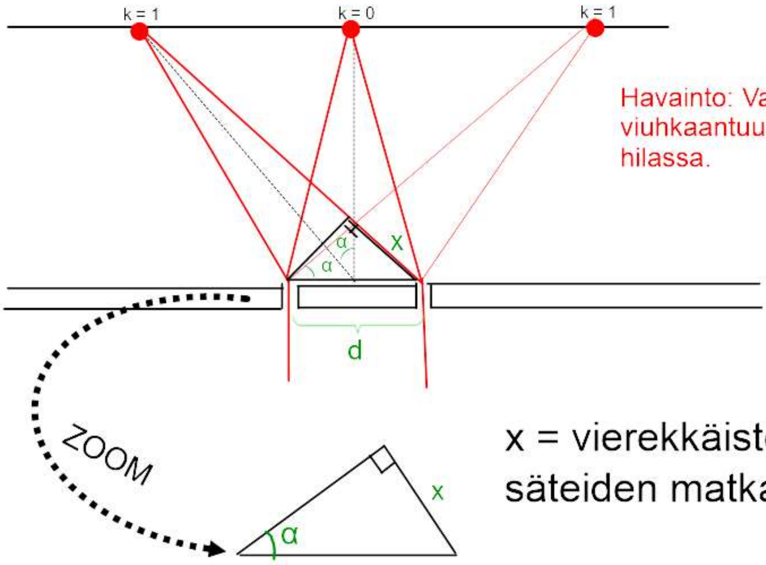
$$\boxed{\tan\alpha_1 = \frac{n_2}{n_1}}$$

Brewsterin laki MAOL s. 130

Heijastuminen tulee tapahtua sähköeristeestä.

# 16 Valon interferenssi ja diffraktio

## Valon taipuminen hilassa




x = vierekkäisten säteiden matkaero

Surendranath

$$\sin\alpha = \frac{x}{d} \quad \text{eli} \quad x = d\sin\alpha$$

Walter Fendt

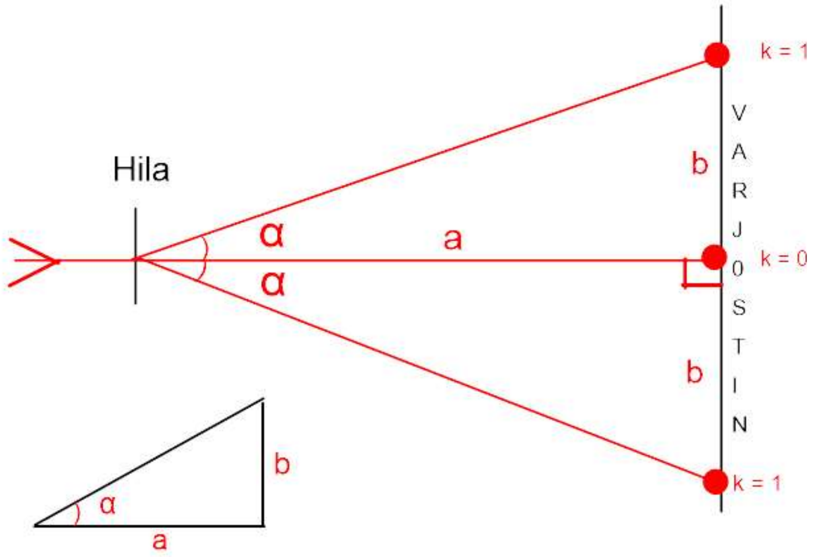
Vahvistavan interferenssin ehto:

Säteiden matkaero on aallonpituuden monikerta eli $x = k\lambda$, $k = 0,1,2,3\ldots$

Siis $\boxed{d\sin\alpha = k\lambda,\ k = 0,1,2,3\ldots}$ MAOL s. 130

# ESIMERKKI: Laserin aallonpituuden määrittäminen

Simulaatio




Hilavakio $d = \frac{0{,}0010\,\text{m}}{570} \approx 1{,}754 \cdot 10^{-6}\,\text{m}.$

b = 0,715 m   a =1,1835 m
d = $1{,}754 \cdot 10^{-6}$ m

$$\tan\alpha = \frac{b}{a} = \frac{0{,}715\,\text{m}}{1{,}835\,\text{m}} \approx 0{,}3896\ldots \quad \text{eli} \quad \alpha \approx 21{,}288^{\circ}$$

Hilayhtälö: $d\sin\alpha = k\lambda$ ja k = 1.

Silloin $\lambda = d\sin\alpha = 1{,}754 \cdot 10^{-6}\,\text{m} \cdot \sin 21{,}288^{\circ}$
$\approx 636{,}805 \cdot 10^{-9}\,\text{m} = 637\,\text{nm}.$

Todellinen aallonpituus on 635 nm.