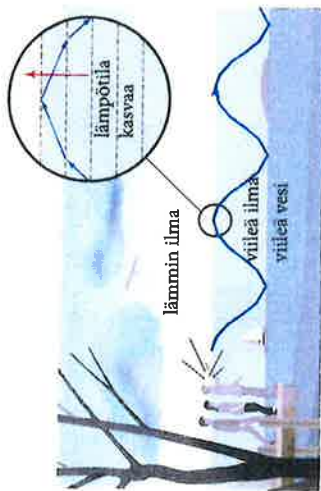
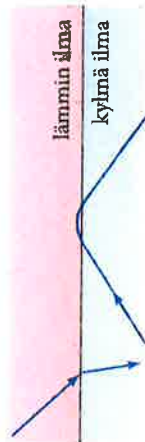


Äänen kokonaisheijastuminen

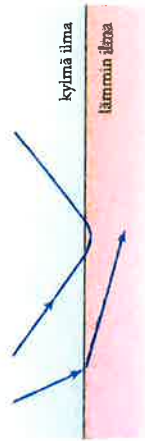


Kesäiltana veden pinnalle voi muodostua ilmakerros, jossa ääni etenee hyvinkin kauas.

Kangastus

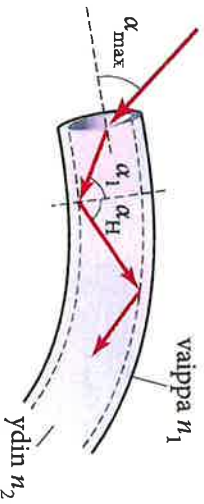


Yläpuolinen kangastus syntyy, kun meren pinnalla oleva ilma on kylmempää kuin yläpuolella oleva. Lämpimän ilma heijastaa saaresta tulevan valon, jolloin saari näkyy horisontin yläpuolella ylösalaisin kääntyneenä.



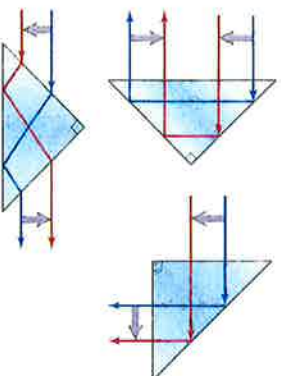
Tumma asfaltti imee tehokkaasti Auringon säteilyä, jolloin asfaltin yläpuolella oleva ilma lämpenee. Lämpimän ilman ja sen yläpuolella olevan kylmän ilman rajapinta taittaa valoa niin, että tien pinnassa näkyy taivas kangastuksena. Alapuolinen kangastus syntyy valon tullessa kylmäästä ilmakeroksesta lämpimään ilmakerokseen.

Optinen kuitu

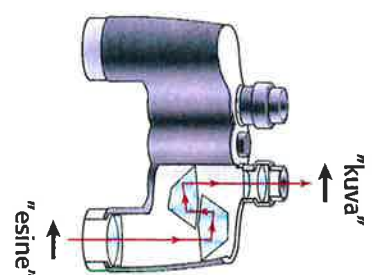


Valo etenee optisessa kuidussa niin, että se kokonaisheijastuu vaipan ja ydinten rajapinnasta.

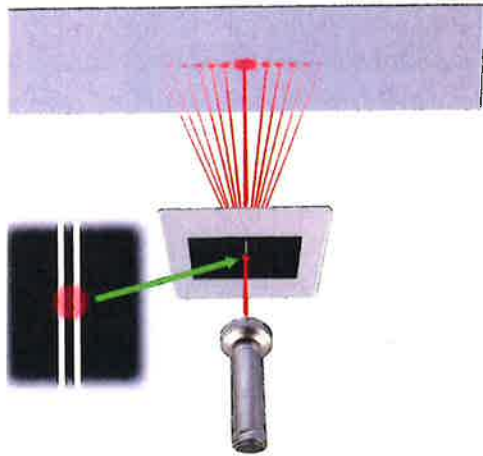
Kokonaisheijastava prisma



Valon kulкусuunta voidaan muuttaa kokonaisheijastavan prisman avulla. Kokonaisheijastavan prisman etu peiliin verrattuna on se, että kokonaisheijastuksessa ei tapahdu energiahäviötä (valon määrä ei vähene). Paksuista nuolistä nähdään, miten kuva kääntyy.



Prismakikanssa kuva kääntetään oikeinpäin kahden kokonaisheijastavan prisman avulla.



Lasersäteen käyttäytyminen kaksoisraossa. Lähdeserin lähettämä valo on monokromaattista ja koherenttia.

Kaksoisraon molemmissa raoissa tapahtuu diffraktio

Laservalo etenee lähes hajoamattomana kimppuna, joten valon osuessa varjostimelle siinä nähdään kirkas piste. Kun laservalon eteen pannaan este, jossa on kaksi yhdensuuntaista kapeaa, aallonpituuden kokoluokkaa olevaa, rakoja, tilanne muuttuu ratkaisevasti. Varjostimelle syntyy joukko kirkkaita viivoja. Tämän ilmiön havaitsi ensimmäisenä Thomas Young 1800-luvun alussa. Young esitti kokeen tulosten perusteella, että valo on aaltoliikettä. Kaksoisraon molemmissa raoissa tapahtuu diffraktio.

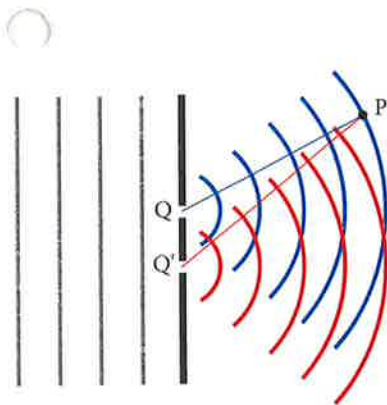
Youngin käyttämä laitteisto koostui monokromaattista valoa lähettävästä valonlähteestä, Na-purkausputkesta, ja kaksoisraosista rakoista. Tällä saatiin aikaan koherenttia monokromaattista valoa.

Eri raoista tulevat aallot interferoivat

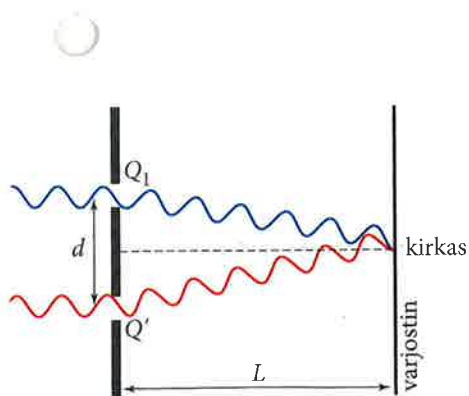
Ehto valoaaltojen interferenssille on, että valonlähde lähettää koherenttia valoa. Jos tuleva valo on epäkoherenttia, valoaaltojen vaiheerot muuttuvat jatkuvasti eikä interferenssiä pystytä havaitsemaan.

Kuvataan vasemmalta kaksoisraokoon tulevaa laservaloa tasoalatorintamalla. Jos raot ovat riittävän kapeita (pienempiä kuin tulevan valon aallonpituus), ne toimivat pistelähteiden tavoin. Tuleva aalto taipuu voimakkaasti kummankin raon takana, eli raoissa tapahtuu valon diffraktio.

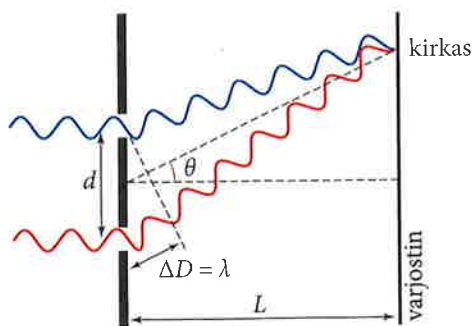
Tummat ja kirkkaat viivat syntyvät varjostimelle, kun eri raoista lähtevät aallot interferoivat varjostimella. Se, syntyykö tiettyyn kohtaan valoisa viiva eli **interferenssimaksimi** vai tumma viiva eli **interferenssiminimi**, riippuu aaltojen matkaerosta $\Delta D = Q'P - QP$ johtuvasta vaihe-erosta. Samaa ongelmaa tutkittiin aikaisemmin vesiaaltojen yhteydessä.



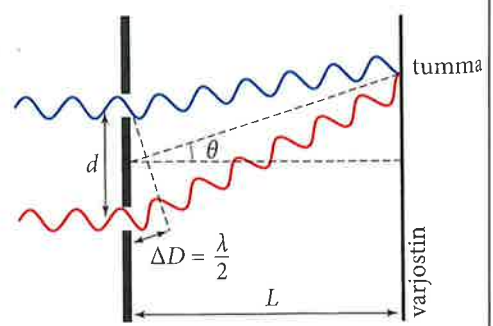
Reitit QP ja Q'P osoittavat tarkastelus suunnan. Reitin pituus ero on $\Delta D = Q'P - QP$.



Jos $\Delta D = 0$, aallot tulevat samassa vaiheessa varjostimen keskelle ja syntyy vahvistava interferenssi.



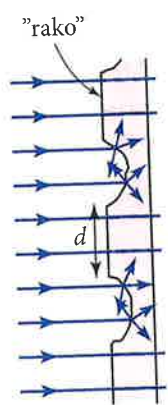
Jos matkaero $\Delta D = \lambda$, aallot ovat samassa vaiheessa. Myös nyt syntyy vahvistava interferenssi.



Jos $\Delta D = \lambda/2$ tai sen pariton monikerta, tulevien aaltojen vaihe-ero on $\lambda/2$ ja aallot interferoivat heikentäen toisensa. Koska amplitudit ovat yhtä suuret, aallot sammuttavat toisensa.



CD-levy on esimerkki heijastushilasta. Värien synty levyn pinnalla aiheutuu urista heijastuvan valon interferenssistä.



Hyvässä läpäisyhilassa voi olla esimerkiksi 500 rakoja millimet-rillä.

Hilayhtälö

Maksimien paikat hilassa saadaan yhtälöstä $d \sin \theta = k\lambda$, jossa $k = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots$, d on hilavakio, θ on taipumiskulma ja λ on valon aallonpituus.

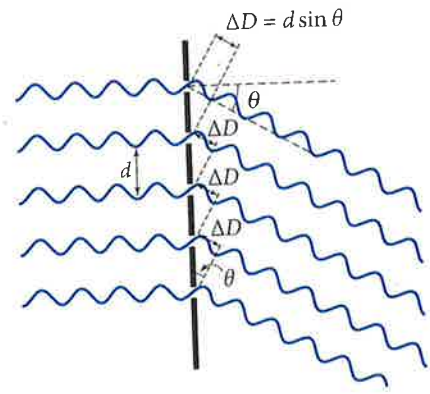
Saippuakuplan värikkyyden johtuu saippuakalvon erilaisista paksuuksista ja katselukulmasta.

Hilassa on monta rakoa

Luonnossa voi havaita monia ilmiöitä, joiden synty perustuu diffraktio- ja interferenssi-ilmiöihin. Tekniikassa on myös monia niihin perustuvia sovelluksia.

Moni on saattanut hämmästyä, kun on katsonut CD- tai DVD-levyä sopivasta suunnasta. Jos levyä kallistelee, sen pintaan näyttää syntyvän kaikki sateenkaaren värit. Levy toimii tällöin **heijastushilana**. Vastaava ilmiö havaitaan, kun valo kulkee **läpäisyhilan** läpi. Hila voidaan valmistaa esimerkiksi lasilevystä, johon naarmutetaan timantilla yhdensuuntaisia ja yhtä leveitä jälkiä. Valo kulkee naarmuttamattomien kohtien (rakojen) läpi esteettä. Rakojen välimatkaa sanotaan **hilavakioksi** d .

Tarkastellaan tilannetta, jossa monokromaattinen ja koherentti valo osuu kohtisuorasti hilaan. Jokainen rako toimii uuden aallon lähteenä. Kun vierekkäisistä raoista lähtevien aaltojen välinen matkaero $\Delta D = d \sin \theta$ on aallonpituuden monikerta, aallot interferoivat keskenään vahvistavasti.



Maksimien paikat hilassa saadaan yhtälöstä $d \sin \theta = k\lambda$, jossa $k = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots$. Arvo $k = 0$ vastaa päämaksimia, joka syntyy suoraan hilan eteen.

Ohuissa kalvoissa tapahtuu valon interferenssi

Ohut öljykerros vesilammikon pinnalla näyttää auringonpaisteessa kauniin kirjavalta. Saippuakuplan pinnalla värit vaihtelevat vallattomasti. Värit ohuiden kalvojen pinnoilla johtuvat valon interferenssistä. Valo heijastuu kalvon molemmista pinnoista A ja B. Heijastuneet aallot interferoivat pinnalla A, jolle valo tulee ja josta kalvoa myös katsellaan.

Se, vahvistuvatko vai heikentyvät aallot, määräytyy siitä, mikä on eri pinnoista heijastuneiden aaltojen vaihe-ero pinnalla A, johon valo tulee. Aaltojen 1 ja 2 interferenssi on vahvistava, jos ne ovat pinnassa A samassa vaiheessa.

Esimerkki 2

Varatun hiukkasen liike sähkökentässä

Elektroni, jonka nopeus on $3,34 \cdot 10^7$ m/s, osuu kohtisuorasti levykondensaattorin sähkökenttään. Levyjen pituus on 2,00 cm, ja sähkökentän voimakkuuden suuruus levyjen välissä on $5,00 \cdot 10^4$ N/C ja suunta alaspäin.

Kuinka paljon poikkeaa elektronin

a) kulkusuunta

b) poistumiskohta

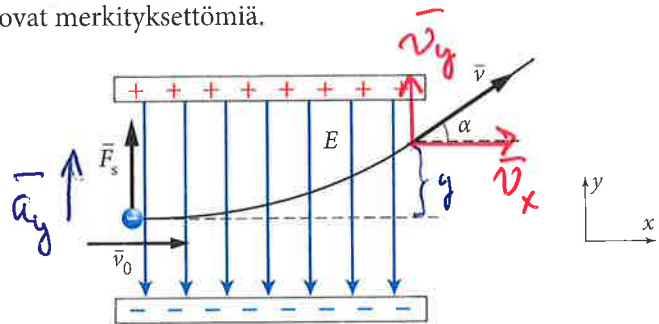
levyjen välistä verrattuna tilanteeseen, jossa levyjen välissä ei ole sähkökenttää?

Ratkaisu

$$E = 5,00 \cdot 10^4 \frac{\text{N}}{\text{C}}, \quad Q = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C}, \quad m = 9,109 \cdot 10^{-31} \text{ kg},$$

$$v = 3,34 \cdot 10^7 \text{ m/s}, \quad l = 2,00 \text{ cm}, \quad \alpha = ?, \quad y = ?$$

- a) Elektroni tulee kohtisuoraan sähkökenttään. Elektronin massa on niin pieni, että painoa ei tarvitse huomioida. Myös vastusvoimat ovat merkityksettömiä.



Poistumissuunta on laskettava loppunopeuden komponenttien avulla. x-akselin suunnassa elektronien liike ei muutu, koska sähköinen voima on kaikkialla levyjen välissä pystysuuntainen. Elektronien nopeuden x-komponentti pysyy liikkeen aikana samana (tasainen liike), mutta nopeuden y-komponentti kasvaa tasaisesti (tasaisesti kiihtyvä liike).

Elektroneihin vaikuttava sähköinen voima \vec{F}_s kaareuttaa elektronien rataa. Dynamiikan peruslain $\sum \vec{F} = m\vec{a}$ mukaan voidaan laskea elektronien kiihtyvyys.

Koska ainoa elektroneihin vaikuttava voima on y-akselin suuntainen sähköinen voima $\vec{F}_s = Q\vec{E}$, saadaan skalaarimuodossa

$$QE = ma_y.$$

Ratkaistaan kiihtyvyyden suuruus

$$\begin{aligned} a_y &= \frac{QE}{m} \\ &= \frac{1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C} \cdot 5,00 \cdot 10^4 \frac{\text{N}}{\text{C}}}{9,109 \cdot 10^{-31} \text{ kg}} \\ &= 8,7935 \cdot 10^{15} \frac{\text{m}}{\text{s}^2}. \end{aligned}$$

Huomaa!

Tasaisen liikkeen malli

$$v = \text{vakio}$$

$$x = vt$$

Tasaisesti kiihtyvän liikkeen malli

$$a = \text{vakio}$$

$$v = v_0 + at$$

$$x = v_0 t + \frac{1}{2} at^2$$

Vastaus
 a) Suunnan muutos on 8,96°
 b) Poikkeama on 1,58 mm.

$$y = \frac{1}{2} a_y t^2$$

$$= \frac{1}{2} \cdot 8,7935 \cdot 10^{15} \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot (5,9880 \cdot 10^{-10} \text{s})^2$$

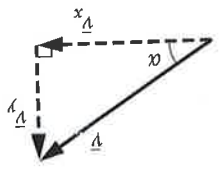
$$= 1,5765 \cdot 10^{-3} \text{m} \approx 1,58 \text{ mm.}$$

b) y-akselin suunnassa liike on tasaisesti kiihtyvää, joten poikkeaman

$$\tan \alpha = \frac{v_x}{v_y}$$

$$= \frac{5,2655 \cdot 10^6 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{3,34 \cdot 10^7 \frac{\text{m}}{\text{s}}} = 0,15765$$

$$\alpha = 8,9589^\circ \approx 8,96^\circ$$



Suihkun suunnanmuutos saadaan nyt nopeuden komponenttien avulla.

$$v_y = a_y t$$

$$= 8,7935 \cdot 10^{15} \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 5,9880 \cdot 10^{-10} \text{s}$$

$$= 5,2655 \cdot 10^6 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Liike y-akselin suunnassa on tasaisesti kiihtyvää, joten nopeuden pystykomponentin suuruus suihkun poistussa levyjen välillä on

$$t = \frac{l}{v_x}$$

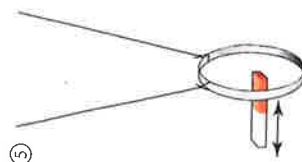
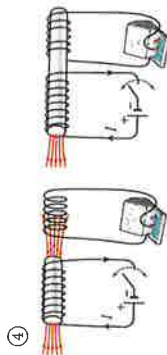
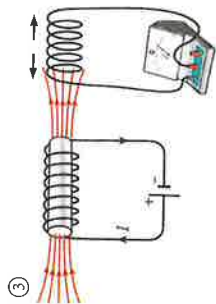
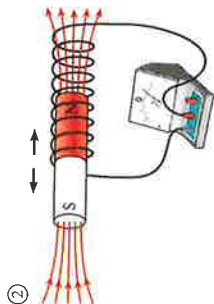
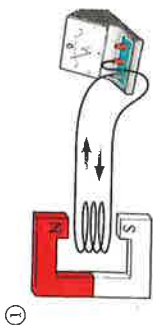
$$= \frac{2,00 \cdot 10^{-2} \text{m}}{3,34 \cdot 10^7 \frac{\text{m}}{\text{s}}} = 5,9880 \cdot 10^{-10} \text{s.}$$

x-akselin suunnainen liike on tasaista nopeudella $v_x = v_0$, joten ta-
 saisen liikkeen mallin $l = v_x t$ avulla saadaan aika, jonka elektroni
 viipyy levyjen välissä

$$y = v_{0y} t + \frac{1}{2} a_y t^2 = 0$$

Erlaisia tilanteita, joissa tapahtuu induktioilmiö

Johdinsilmukkaan indusoituu lähdejännite, jos johdinsilmukkaa tai käämiä liikutetaan epähomogeenisessa magneettikentässä. Tällöin magneettikentän voimakkuus muuttuu käämin suhteen.



Silmukkaan indusoituu lähdejännite, jos sauvamagneettia liikutetaan silmukan sisälle tai ulos. Jos magneetin napaisuus vaihdetaan, virtamittarissa näkyvät muutokset ovat vastakkaisuuntaiset.

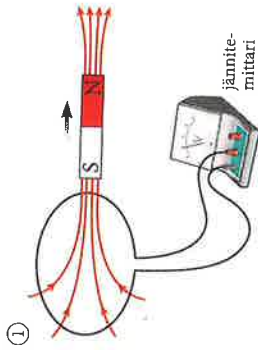
Silmukkaan indusoituu lähdejännite, jos käämiä liikutetaan sähkömagneettia kohti tai pois päin. Jos magneetin napaisuus vaihdetaan, virtamittarissa näkyvät muutokset ovat vastakkaisuuntaiset.

Silmukkaan indusoituu lähdejännite, kun sen lähellä olevan sähkömagneetin kytkin suljetaan ja avataan. Silmukkaan indusoituu suurempi lähdejännite, jos silmukalla ja sähkömagneetilla on yhteinen rautasydän.

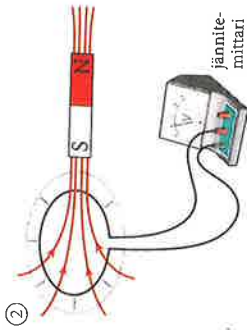
Kun sauvamagneetti viedään alumiinirenkaan sisään ja vedetään ulos, rengas heilähtää.

Havainnoista voidaan yleistää tulos, että johtimeen indusoituu lähdejännite aina niin, että se vastustaa induktion aiheuttavaa muutosta. Tämä voidaan esittää yleisesti Lenzin lakina.

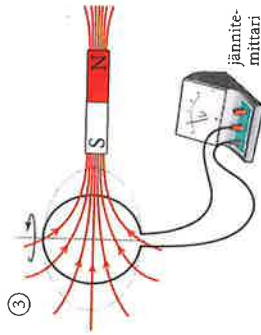
Milloin magneettivuo muuttuu?



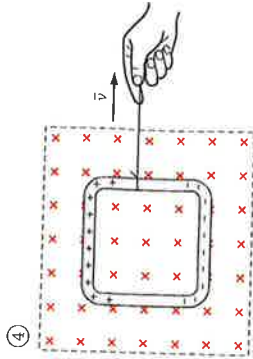
Magneettivuo $\Phi = AB$ muuttuu, kun magneetin magneettivuon tiheys muuttuu magneetin (tai silmukan) liikkeessa. Johdinsilmukkaan indusoituu lähdejännite.



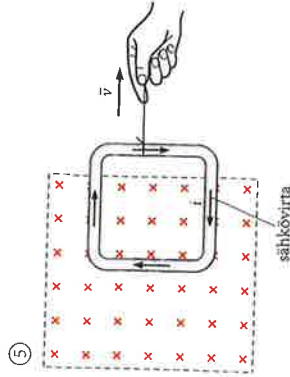
Magneettivuo $\Phi = AB$ muuttuu, kun silmukan pinta-ala A muuttuu (Silmukkaa venytetään tai kutistetaan). Johdinsilmukkaan indusoituu lähdejännite.



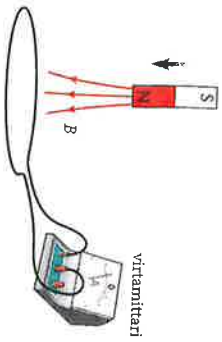
Magneettivuo $\Phi = A \cdot B$ muuttuu, kun silmukka kääntyy magneettikentän suhteen. Tällöin magneettikenttää vastaan kohtisuora pinta-ala A muuttuu ja johdinsilmukkaan indusoituu lähdejännite.



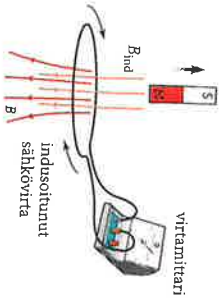
Kun suljettu johdinsilmukka liikkuu homogeenisessa magneettikentässä, silmukkaan ei indusoitu sähkövirtaa, koska silmukan läpäisevä magneettivuo ei muutu.



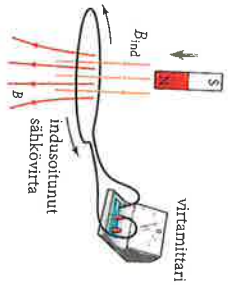
Kun osa etenevästä silmukasta on magneettikentän ulkopuolella, silmukkaan indusoituu sähkövirta, koska silmukan läpäisevä magneettivuo pienenee silmukan siirtyessä pois magneettikentästä.



Kuva 1 A. Sauvamagneetin magneettikentän magneettivuon tiheys kasvaa johdinsilmukan sisällä.



Kuva 2. Magneettivuon tiheys pienenee. Johdinsilmukkaan indusoituu sellainen sähkövirtä, että sen synnyttämä magneettikenttä B_{ind} ylläpitää magneettivuon tiheyttä silmukassa.



Kuva 1 B. Johdinsilmukkaan indusoituu lähdejännite, joka synnyttää sähkövirran. Sähkövirran synnyttämä magneettikenttä B_{ind} estää magneettivuon tiheyden kasvua silmukassa.

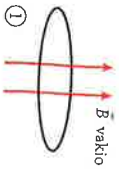
Induktioidun suunta saadaan Lenzin laista

Kuvassa 1 A sauvamagneetti lähestyy johdinsilmukkaa. Silmukan sisällä sauvamagneetin magneettikentän magneettivuon tiheys B kasvaa. Koska magneettivuon tiheys kasvaa, johdinsilmukkaan indusoituu lähdejännite.

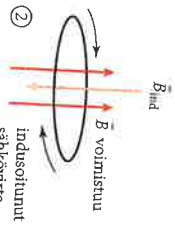
Kuvassa 1 B on esitetty indusoituneen lähdejännitteen aiheuttama sähkövirtä. Sähkövirran suunta on sellainen, että sen synnyttämä magneettikenttä B_{ind} estää magneettivuon tiheyden B kasvua silmukassa. Silmukkaan indusoituneen sähkövirran synnyttämä magneettikenttä on sauvamagneetin kentälle vastakkais suunnainen. Sähkövirran suunta voidaan päätellä oikean käden säännön avulla.

Kuvassa 2 sauvamagneetti liikkuu pois päin johdinsilmukasta. Silmukan sisällä sauvamagneetin magneettikentän magneettivuon tiheys B pienenee. Johdinsilmukkaan indusoituu sellainen sähkövirtä, että sen synnyttämä magneettikenttä B_{ind} ylläpitää magneettivuon tiheyttä silmukassa.

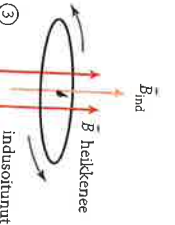
Lenzin laissa on oleellista huomata, että magneettikentän muuttuessa johdinsilmukkaan indusoituvan sähkövirran vaikutukset eivät pyri hävittämään magneettikenttää, vaan ne pyrkivät pitämään magneettikentän muuttumattomana.



Jos ulkoisen magneettikentän magneettivuon tiheys B on vakio, niin johdinsilmukkaan ei indusoidu jännitettä eikä sähkövirtää.



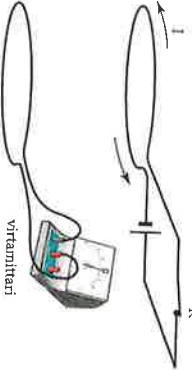
Jos ulkoisen magneettikentän magneettivuon tiheys B on ylöspäin ja voimistuu, niin indusoituvan magneettikentän magneettivuon tiheys B_{ind} on alaspäin ja indusoitunut sähkövirtä kierteää kuvan suunnassa katsottuna myötäpäivään.



Jos ulkoisen magneettikentän magneettivuon tiheys B on ylöspäin ja heikkenee, niin indusoituvan magneettikentän magneettivuon tiheys B_{ind} on alaspäin ja indusoitunut sähkövirtä kierteää kuvan suunnassa katsottuna vastapäivään.

Esimerkki 1

Kuvan ylemmässä johdinsilmukassa on ollut pitkän aikaan muuttumaton sähkövirtä. Mitä tapahtuu alemmassa silmukassa, kun ylemmässä silmukassa katkaisija avataan?



Lenzin lain käyttöohje

1. Selvitä, millainen ulkoinen magneettikenttä on tutkitavan johdinsilmukan sisällä.
2. Selvitä, miten ulkoinen magneettikenttä muuttuu. Voimistuko se, heikkeneekö se vai pysyikö se muuttumattomana?
3. Muuttuva magneettikenttä indusoi johdinsilmukkaan lähdejännitteen, joka aiheuttaa sähkövirran.
4. Päättele indusoituneen magneettikentän suunta siten, että se vastustaa ulkoisen magneettikentän muutosta.
5. Päättele indusoituneen sähkövirran suunta käyvä oikean käden sääntöä, jotta saat aiheutua kohdassa 4 pääteltyyn induktioidun aiheuttaman magneettikentän.

Huomautus

Ulkoinen magneettikenttä:

- voimistuu
 - heikkenee
 - ei muutu
- Tällöin indusoituva magneettikenttä osoittaa samaan suuntaan kuin ulkoisen magneettikentän.
- Tällöin indusoituvaa magneettikenttää ei ole.

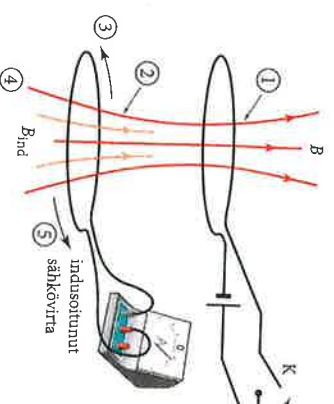
Lenzin lain käyttöohje

Ratkaisu
Alempi silmukka on ylemmän silmukan aiheuttamassa magneettikentässä, jonka suunta on alhaalta ylöspäin, kuvassa ①.

Ylöspäin suuntautuva magneettikenttä alemman silmukan läpi heikkenee nopeasti, kun sähkövirtä katkaistaan, kuvassa ②. Koska silmukan pinta-ala on vakio, voidaan tarkastella vain magneettivuon tiheyden suuruuden B muutosta.

Alemmaan johdinsilmukkaan indusoituu lähdejännite, joka aiheuttaa sähkövirran, kuvassa ③.

Silmukkaan indusoituneen magneettikentän suunta on sama kuin ulkoisen magneettikentän, eli ylöspäin, kuvassa ④, koska indusoitunut magneettikenttä vastustaa ulkoisen magneettikentän muutosta (heikkenemistä).

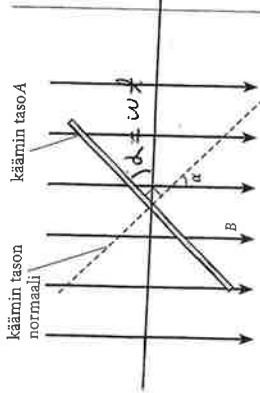


Oikean käden säännön avulla voidaan päätellä, että kuvassa vastapäivään kierteävä sähkövirtä aiheuttaa ylöspäin suuntautuvan magneettikentän, kuvassa ⑤.

Vastaus

Alemmaan silmukkaan indusoituu vastapäivään kierteävä sähkövirtä.

käämin tason normaali



Kulma α määrittelee käämin tason normaalin ja magneettikentän kenttäviivan välisenä kulmana.

Huomaa!

Kosinifunktion derivaatta on

$$D \cos x = -\sin x.$$

Yhdistetyn funktion $\cos \omega t$ derivaatta on

$$D \cos \omega t = -\sin \omega t \cdot D \omega t \\ = -\omega \sin \omega t.$$

Magneettikentässä pyörivään käämiin indusoituu lähdejännite

Kun käämi on kohtisuorassa magneettikentän kenttäviivoja vastaan (käämin normaali on yhdensuuntainen magneettikentän kanssa), käämin asentoa kuvaavan kulman α arvo on nolla. Tässä asennossa olevan käämin läpäisee magneettivuoto $\Phi = AB$.

Jos käämi pyöri tasaisesti kulmanopeudella ω , käämi kiertyy ajassa t kulman $\alpha = \omega t$. Kun käämi on kiertynyt kulman α (myös käämin normaali ja magneettikentän välinen kulma on α), magneettivuoto käämin silmukan läpi on $\Phi = BA \cos \alpha = BA \cos \omega t$.

Yleensä tarkastelun alkuhetkeksi valitaan $\alpha(0 \text{ s}) = 0^\circ$, jolloin hetkellä t käämin silmukan läpäisee magneettivuoto

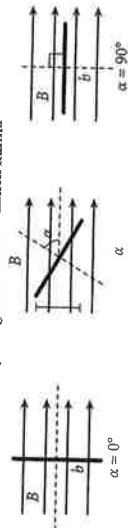
$$\Phi(t) = BA \cos \omega t.$$

Induktiolain mukaan käämiin indusoituu lähdejännite

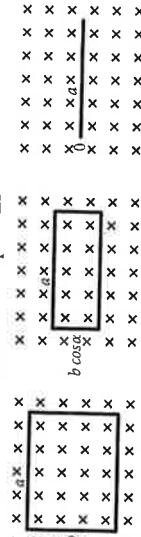
$$e = -N \frac{d\Phi}{dt} = -N \frac{d(BA \cos \omega t)}{dt} = -NBA \frac{d(\cos \omega t)}{dt} \\ = -NBA(-\sin \omega t \cdot \frac{d}{dt} \omega t) \\ = -NBA(-\sin \omega t \cdot \omega).$$

Käämiin indusoituvan hetkellisen lähdejännitteen lausekkeeksi saadaan $e = NBA\omega \sin \omega t$.

1. Silmukan normaalin ja magneettikentän välinen kulma



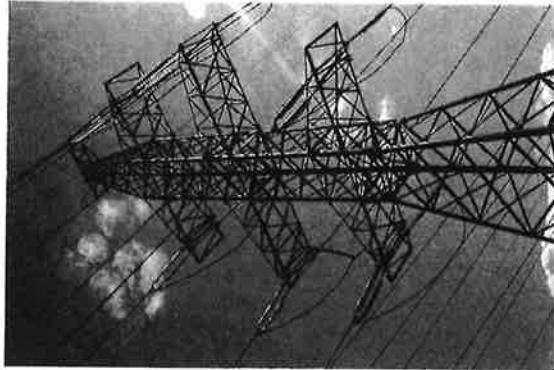
2. Magneettikenttää vastaan kohtisuora pinta-ala



3. Magneettivuoto silmukan läpi

$$\Phi = BA_n = Bab \quad \Phi = BA_n = Bab \cos \alpha \quad \Phi = 0$$

Generaattorin silmukka on kuvattu sivusta (1) ja magneettikentän kenttäviivojen suunnasta katsottuna (2). Silmukan läpäisevä magneettivuoto on suurin silloin, kun silmukan normaali on kentän suuntainen (silmukan taso on kohtisuorassa kenttää vastaan). Silmukan läpäisevä magneettivuoto on nolla, kun silmukan normaali on kohtisuorassa kenttää vastaan (silmukka on kenttäviivojen suuntaisessa tasossa). Silmukan normaalin ja magneettivuotojen tihedyyden suunnan välinen kulma α ilmaisee silmukan kiertokulman.



Vaihtovirran tuottaminen generaattorilla, siirtäminen sähköverkossa ja muuntaminen muuntajalla on yksinkertaista ja taloudellista. Lähes kaikki sähkötekniikan käytännön sovellukset perustuvat vaihtovirtaan.

Vaihtojännite on sinimuotoista

Käämiin indusoituvan hetkellisen lähdejännitteen lausekkeeksi saatiin $e = NBA\omega \sin \omega t$.

Koska sini saa arvoja välillä $-1, \dots, +1$, niin lausekkeen suurin arvo, jännitteen huippuarvo on $e = NBA\omega$. Käämiin indusoituu siis muuttuva vaihtojännite

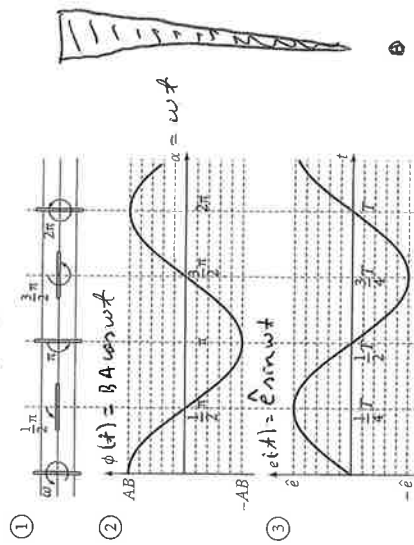
$$e = \hat{e} \sin \omega t.$$

Koska pyörivän käämin kulmanopeus pyörimistaajuuden f avulla ilmaistuna on $\omega = 2\pi f$, jännitteen huippuarvo voidaan kirjoittaa muotoon

$$\hat{e} = NBA \cdot 2\pi f.$$

Kun kulmanopeutta ω käytetään vaihtojännitteen lausekkeessa, sitä sanotaan yleensä **vaihtojännitteen kulmataajuudeksi**. Generaattorin käämiin indusoituneen lähdejännitteen taajuus f on yhtä suuri kuin käämin pyörimisnopeus n .

Kuvassa 1 on generaattorin käämin asennot, kuvassa 2 magneettivuoto ja kuvassa 3 on käämiin indusoitunut lähdejännite.



Yhden jakson T aikana käämi on pyörähtänyt yhden kierroksen eli kulman 2π . Nollahetkellä silmukka on kohtisuorassa magneettikenttää vastaan ja lähdejännite silmukassa on nolla ($\sin 0 = 0$), hetkellä $\frac{T}{4}$ silmukan läpäisevä magneettivuoto on pienentynyt maksimiarvosta nollaan ja silmukassa on hetkellisesti lähdejännitteen huippuarvo ($\sin \frac{\pi}{2} = 1$), jälleen seuraavan neljännesjakson aikana vuo kasvaa maksimiarvoonsa ja lähdejännite silmukassa pienenee nollaan.

