

Sähkömagnetismi IV

Induktio vuorovaikutuksena, pyörrevirrat

Jo ennen Faradayn kokeita löydettiin vuorovaikutusilmiöitä magneetin ja ei-ferromagneettisen metallin välillä. Vuonna 1824 François Arago havaitsi että kompassineulan heilahtelu vaimenee kuparikotelossa nopeammin kuin ilmassa, ja että pyörivä kuparilevy ”vetää mukaansa” levyn ylle ripustettua magneettia.

Putoava magneetti alumiiniputkessa: putoaminen hidastuu ([video](#)), putken näennäinen paino kasvaa.

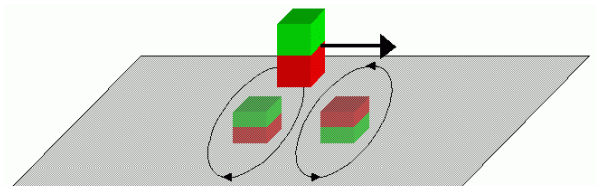
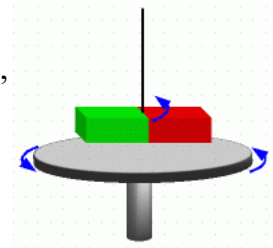
Kun liu'utetaan voimakasta magneettia pitkin alumiini- ja muovilevyjä, havaitaan että vuorovaikutus ilmenee vain sähköä johtavan kappaleen kanssa, ja vain kun magneetti ja levy liikkuvat toisiinsa nähden.

Kokeita ehjillä ja liuskoiksi saatuilla heilurilevyillä (EM-8641 + EM-8642A): vuorovaikutus on sitä voimakkaampi, mitä yhtenäisempi levy on.

Vuorovaikutus on aina keskinäistä liikettä jarruttava. Analogia kitkan kanssa: voiman tekemä työ siirtyy joksikin muuksi energiaksi.

Selitys vuorovaikutushavainnoille: magneetin liike indusoi johdekappaleeseen sähkövirtoja eli *pyörrevirtoja*, joilla on magneettinen vuorovaikutus magneetin kanssa.

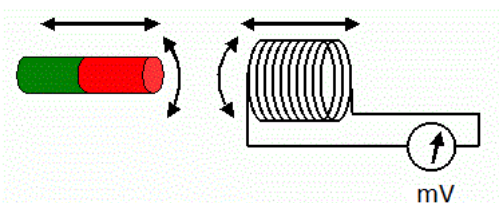
Indusoituvan pyörrevirran suunta voidaan päätellä siitä, että vuorovaikutus on aina keskinäistä liikettä vastaan. Siispä indusoituvan sähkövirran magneettikenttä on suunnaltaan sellainen, että se pyrkii heikentämään voimistuvaa kenttää, ja voimistamaan heikentyvää kenttää. Tätä sääntöä kutsutaan *Lenzin laiksi*.



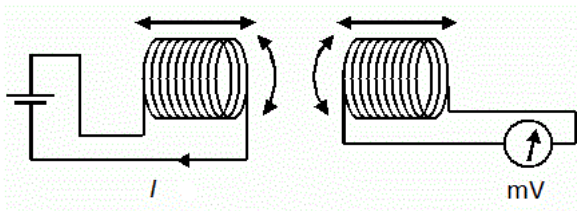
Induktiojännite, magneettivuo ominaisuutena

Faradayn lähtökohta: on havaittu että sähkövirralla voi tehdä magneetin, voiko siis magneetilla tehdä sähkövirtaa? Kyllä voi, ilmiö on todettu kokonaisuudessa Sähkömagnetismi I.

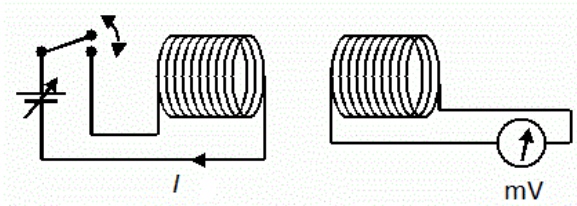
Toisaalta tiedämme että sähkövirran syntyyyn tarvitaan jännite. Kun kokeissa pitäisi tutkia mistä tekijöistä induktioilmiön voimakkuus riippuu, kannattaa alkaa mitata induktiojännitettä. Tällöin käämin resistanssi ei vaikuta havaintoihin.



Käämi ja magneetti. Havainto: käämiin indusoituu jännite, kun käämin ja magneetin etäisyyttä muutetaan, tai kun käämiä ja magneettia käännetään toisiinsa nähden.

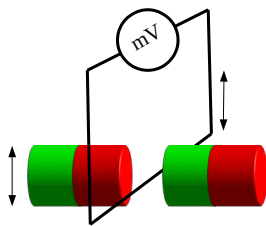


Ensiökäämi, jonka sähkövirta pidetään vakiona, ja toisiokäämi, johon indusoituva jännite mitataan. Havainto: toisiokäämiin indusoituu jännite, kun käämejä liikutetaan toisiinsa nähden kuten edellä käämiä ja magnetia.



Ensiökäämi kuten edellä, mutta nyt ensiökäämin läpi kulkevaa sähkövirtaa muutetaan¹. Havainto: toisiokäämiin indusoituu jännite, kun ensiökäämin sähkövirta muuttuu.

Yleistys: käämiin indusoituu jännite, kun käämin läpäisevä "magneettikentän määrä" eli *magneettivuon* muuttuu. Jännite on sitä suurempi, mitä nopeampi on magneettivuon muutos.



Johdin ja magneetti. Havainto: johtimeen indusoituu jännite, kun johdin "leikkaa" magneetin kenttäviivoja, riippumatta siitä liikkuuko johdin vain magneettikenttä.

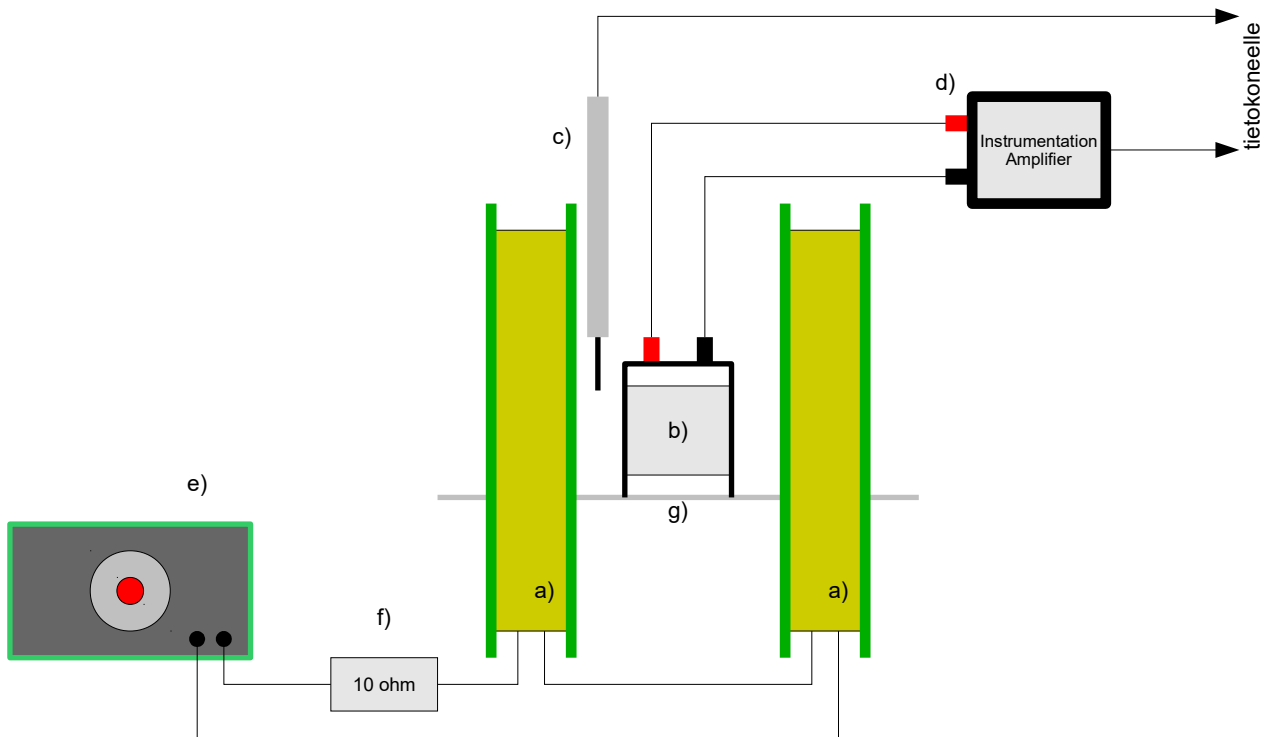
Tämä on tärkeä havainto, koska se osoittaa että induktioilmiötä ei voi selittää pelkästään johtimen varauksenkuljettajiin vaikuttavan magneettisen Lorentzin voiman avulla – jos johdin ei liiku, varauksenkuljettajatkään eivät liiku sen mukana, jolloin niihin ei kohdistu magneettista voimaa. Tällöin indusoituvan jännitteen ja sähkövirran saa aikaan muuttuvan magneettikentän indusoima *pyörteinen sähkökenttä*.

Induktiolaki

Esikvantifointi: käämiin indusoituva jännite riippuu käämin kierrosten lukumäärästä, käämin pinta-alasta, käämin asennosta voimakkuudeltaan muuttuvan kentän suuntaan nähden, ja siitä kuinka nopeasti kentän voimakkuus muuttuu, eli kenttäkäämien vaihtovirran taajuudesta ja aaltomuodosta.

Kvantifointi. Käytetään kuvan mukaista laitteistoa, jolla voidaan varioida hallitusti kaikkia indusoituvaan jännitteeseen vaikuttavia tekijöitä.

¹ Jos jännitettä mitataan kiertokäänimittarilla, sähkövirran vaihtelemiseen ei kannata käyttää on-off -kytkintä. Sillä muutokset ovat niin nopeita ettei mittari pysty niitä seuraamaan. Kannattaa kytkeä ensiökäämi säädettävään virtalähteeseen ja muuttaa sähkövirtaa säätönupista.



Induktiolain tutkimuslaitteisto. a) kenttääämit, b) testikäämi, c) mg-vuon tiheys -anturi, d) vahvistin, e) signaaligeneraattori, f) vastus, g) astelevy.

Syöttämällä kenttääämeihin kolmiomuotoista vaihtovirtaa ja vaihtelemalla virran taajuutta, havaitaan että indusoituva jännite on verrannollinen magneettivuon tiheyden muuttumisnopeuteen. Normaaleilla variointikoesarjoilla havaitaan, että indusoituva jännite on verrannollinen käämin kierrosten lukumäärään ja käämin pinta-alaan. Indusoituva jännite riippuu myös käämin akselin asennosta magneettikentän suuntaan nähden siten, että jännite on verrannollinen magneettikentän ja käämin akselin välisen kulman kosiniin. Näistä saadaan induktiolaki $U = -NA \cos \alpha \frac{\Delta B}{\Delta t}$, joka pätee tasaisesti muuttuvalle magneettikentälle (miinusmerkki tulee Lenzin laista).

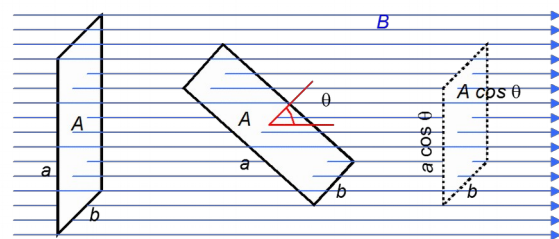
Laki voidaan yleistää korvaamalla kentän tasainen muuttumisnopeus hetkellisellä

muuttumisnopeudella $\frac{dB}{dt}$, yhdistämällä pinta-

ala, käämin akselin ja magneettikentän välinen kulma ja magneettivuon tiheys uudeksi, käämin läpäisevän magneettikentän määrää kuvaavaksi suureeksi nimeltä *magneettivuo* $\Phi = AB \cos \alpha$, ja

kirjoittamalla laki koskemaan vain yhtä johdinsilmukkaa. Tällöin saadaan lakiennuste

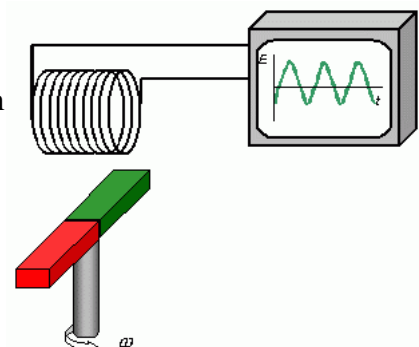
johdinsilmukkaan indusoituvalle jännitteelle: $U = -\frac{d\Phi}{dt}$.



Induktiolain päteminen erityyppisissä induktioilmiöissä.

Esimerkiksi: käämi on voimakkuudeltaan tunnetussa vakiokierrosnopeudella pyörivässä magneettikentässä. Ennustetaan ja testataan induktiojännitteen muoto ja huippuarvo magneetin kulmanopeuden funktiona.

Koe on samalla demonstraatio vaihtojännitteen ja -virran tuottamisesta.



Itseinduktio ja induktanssi

Koe: rautasydämellä varustettu käämi, jossa kulkee muutaman ampeerin virta. Kun sähkövirta katkaistaan, esiintyy voimakas katkaisukipinä. Jos katkaisimen tai käämin yli on kytketty hohtolamppu, se välähtää katkaisuhetkellä. Hohtolampun syttymiseen tarvitaan n. 100 V jännite!

Käämi on itse omassa magneettikentässään. Jos käämin sähkövirta muuttuu, sen magneettikenttäkin muuttuu, ja käämiin indusoituu jännite joka vastustaa magneettikentän (ja sähkövirran) muutoksia. Ilmiö on nimeltään *itseinduktio*. Kun käämin läpi kulkevaa virtaa kasvatetaan, käämiin indusoituu jännite, joka vastustaa virran kasvua; vastaavasti kun käämin virtaa pienennetään, käämiin indusoituu jännite joka pyrkii pitämään virtaa yllä.

Koe: kytketään signaaligeneraattoriin hehkulamppu. Muutetaan vaihtojännitteen taajuutta, havaitaan että lamppu palaa taajuudesta riippumatta yhtä kirkkaasti. Kytketään sitten käämi lampun kanssa sarjaan. Nyt lamppu palaa sitä himmeämmin, mitä korkeampi on taajuus.

Itseinduktioin voimakkuutta kuvaa suure *induktanssi*, jota ryhdytään kvantifioimaan.

Ilmiötä voidaan tutkia kvantitatiivisesti syöttämällä käämiin kolmiomuotoista vaihtovirtaa (sähkövirran muutosnopeus vakio), ja mittaamalla käämin navoista indusoituvan jännitteen suuruutta. Esikvantifioivana havaintona huomataan, että indusoituva jännite on sitä suurempi, mitä nopeammin sähkövirta muuttuu. Havaitaan myös että samalla virran muutosnopeudella indusoituva jännite on erilaisilla käämeillä eri suuri.

Idealisella käämillä itseinduktiojännite on vakio, kun käämin läpi kulkeva sähkövirta muuttuu tasaisesti. Käytännössä todellisen käämin navoista mitatun jännitteen muoto on yleensä aika kaukana suorakulmiosta. Käämin sisäinen resistanssi aiheuttaa jännitehäviötä, ja tämä näkyy käämin napajännitteessä summutuneena itseinduktiojännitteen kanssa. Lisäksi käämi on itseinduktiojännitteen vuoksi signaaligeneraattorille hankala ”kuorma”, joten sähkövirta ei välttämättä muutu aivan tasaisesti. Itseinduktiojännite kannattaakin lukea jännitteen kuvaajalta kohdasta, jossa käämin läpi kulkeva sähkövirta on nolla, jolloin myös käämin resistanssista aiheutuva jännitehäviö on nolla.

Mitataan virran muuttumisnopeuksia $\frac{\Delta I}{\Delta t}$ tai $\frac{dI}{dt}$, ja vastaavia induktiojännitteitä U tai $U(t)$.

Piirretään pisteet $\left(\frac{\Delta I}{\Delta t}, U\right)$ koordinaatistoon, ja havaitaan pisteiden asettuvan origon kautta kulkevalle suoralle. Toistetaan koe toiselle käämille, havaitaan että pisteet asettuvat taas suoralle, jolla on eri kulmakerroin. Määritellään uusi suure induktanssi indusoituvan jännitteen ja virran muutosnopeuden suhteeksi: $L = -\frac{U}{\Delta I / \Delta t}$ vakioiselle virran muuttumisnopeudelle. Määrittely

yleistyy muotoon $L = -\frac{U(t)}{dI/dt}$.