

Sähkömagnetismi I: kolme ilmiömaailmaa

Tutustutaan kvalitatiivisesti sähkövaraukseen, magnetismiin ja sähkövirtaan liittyviin ilmiöihin. Pyritään mahdollisimman varhaisessa vaiheessa kytkemään nämä ilmiömaailmat yhteen niin, että ymmärretään sähkövirran olevan varauksen liikettä, sähkövirran aiheuttavan magneettista vuorovaikutusta ja magneettikentän muutoksen aiheuttavan suljetussa virtapiirissä sähkövirran. Tässä on luonnollista ottaa historiallinen lähestymistapa.

Sähkövaraus ja sähkökenttä

Varautuminen, varauksen lajit

Monissa kielissä sähkö nimitys juontuu kreikan meripihkaa tarkoittavaan sanaan *elektron*. Tämä antaa vinkin, miten sähköinen varautuminen on todennäköisesti aikanaan keksitty: hankaamalla meripihkaa kankaaseen. Tällöin meripihka alkaa vetää puoleensa kevyitä esineitä, kuten paperinpaloja. Monet muut aineet käyttäytyvät samalla tavalla. Sanotaan että kappaleet varautuvat, kappaleisiin syntyy varaus. Myös hangattujen kappaleiden välillä ilmenee vuorovaikutus, mutta se voi olla joko vetävä tai hylkivä. Systemaattisilla kokeilla havaitaan säännönmukaisuudet:

1. Kappaleet jotka ovat samaa ainetta ja joita on hangattu samanlaisella kankaalla tms, hylkivät aina toisiaan.
2. Jos kaksi varattua kappaletta A ja B hylkii toisiaan, kolmas varattu kappale C aina joko hylkii sekä A:ta että B:tä, tai aina vetää puoleensa sekä A:ta että B:tä. Vastaavasti, jos A ja B vetävät toisiaan puoleensa, C joko hylkii A:ta ja vetää B:tä, tai päinvastoin.
3. Ei löydy sellaista kolmen tai useamman varatun kappaleen systeemiä, jossa kaikki vetäisivät toisiaan puoleensa.

Havannosta 1 voidaan päätellä, että samalla tavalla varatut kappaleet, siis samanlaiset varaukset, hylkivät toisiaan. Kohdista 2 ja 3 päätellään, että erilaiset varaukset vetävät toisiaan puoleensa, ja varauksia on tasan kahta lajia. Historiallisesti silkikankaalla hangattuun lasisauvaan syntyvää varausta on kutsuttu lasisähköksi. Toinen varauslaji oli nimeltään lakkasähkö, ja sitä syntyy esimerkiksi turkiksella tai villakankaalla hangattuun eboniittiin, muoviin tai kirjelakkatankoon.

Varauksen säilyminen, siirtyminen, summautuminen ja kumoutuminen

Varaus näyttää katoavan kappaleista aikaa myöten. Tarkemmin tutkittaessa havaitaan että varaus ei häviä, vaan siirtyy pois kappaleesta. Erityisen helposti varaus näyttää siirtyvän metalliesineisiin, ja helposti myös niistä pois. Varaus myös siirtyy metallia pitkin esimerkiksi elektroskoopista toiseen. Toisia aineita kuten muovia tai lasia pitkin taas varaus ei siirry. Sanotaan varausta siirtäviä aineita *johteiksi* ja siirtymisen estäviä aineita *eristeiksi*.

Jos varattu kappale koskettaa vain eristeitä, kappaleen varaus säilyy pitkään. Ideaalitulanteessa (tyhjiössä) varaus epäilemättä säilyisi ikuisesti. Varauksen säilyminen ilmenee myös siirtymisessä; yhden

elektroskoopin varaus kasvaa ja toisen vähenee.

Elektroskooppi näyttää oman varautumisensa voimakkuuden. Jos elektrokooppiin siirretään jatkuvasti samanlaista varausta, elektroskoopin varaus näyttää kasvavan. Sama pätee sekä lasi- että lakkasähkölle. Mutta jos elektroskooppiin siirretään vuorotellen lasi- ja lakkasähköä, huomataan että eri varauksen lajit kumoavat toisiaan; ne summautuvat kuten erimerkkiset luvut. Tästä ovat peräisin nimitykset positiivinen varaus lasisähkölle ja negatiivinen varaus lakkasähkölle.

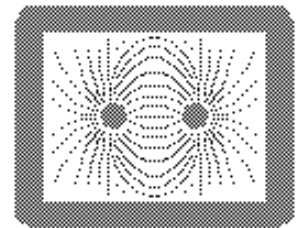
Sähkökenttä

Sähköinen vuorovaikutus on etävuorovaikutus. Otetaan käsite *sähkökenttä* käyttöön aluksi selittämään etävuorovaikutus: kenttämallin mukaan varattu kappale synnyttää ympärilleen sähkökentän, ja toinen varattu kappale vuorovaikuttaa kentän kanssa. Sähkökenttä on siis alue, jossa varattu kappale tuntee sähköisen vuorovaikutuksen. Varattu kappale ei vuorovaikuta oman kenttensä kanssa.

Kentän *suunnaksi* tietyssä kentän pisteessä sanotaan sitä suuntaa, johon positiiviseen varaukseen vaikuttava voima suuntautuu. Kentällä on ilmeisesti myös *voimakkuus*, joka määrää miten suuri voima tietyn suuruiseen varaukseen kohdistuu.

Kenttäviivaesitys on tapa kuvata sähkökentän suuntaa ja voimakkuutta.

Risiiniöljyn pinnalle sirotellut mannaryynit asettuvat sähkökentässä polarisoitumisen vuoksi kenttäviivojen suuntaisiksi ketjuiksi. Näin kenttäviivaesityksen voi visualisoida erilaisille sähkökentille, erityisesti sellaisille jotka muodostuvat pistemäisen tai pallomaisen varauksen ympärille, sekä yhdensuuntaisten levyjen välille. Muodostuvista kuvioista ilmenee sähkökentän muoto hyvin, mutta sähkökentän voimakkuudesta pystyy tekemään vain karkeita päätelmiä ryynien järjestyneisyyden asteen avulla. Muodostuvien ketjujen tiheys ei riipu kentän voimakkuudesta.



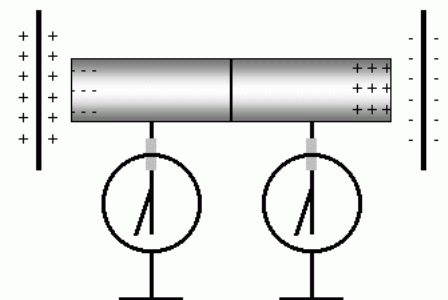
On varottava esittämästä kenttäviivoja oliona, joilla on fyysikaalinen vastine. Kenttäviivaesitys on vain esittävä malli.

Sähköinen influenssi

Aikaisemmin on huomattu varatun kappaleen vetävän puoleensa esim. paperinpaloja, vaikka ne eivät ole varautuneita. Samoin havaitaan että varaamaton metallipäällysteinen pallo tuntee sähkösen vetovoiman varatun kappaleen lähellä. Selittävä malli ilmiölle on, että varaamaton eli sähköisesti neutraali kappale sisältää yhtä suuret määrät positiivista ja negatiivista varausta; ulkoinen sähkökenttä vaikuttaa näihin varauksiin ja saa ainakin toisen niistä liikkumaan kappaleen sisällä. Tällöin kappaleen osat varautuvat eri merkkisesti, ja epähomogeenisessa sähkökentässä ilmenee koko kappaleeseen kohdistuva sähköinen vetovoima.

Testataan mallia kokeella. Sijoitetaan kuvan mukaisesti metallilevyjen väliin kaksiosainen metallisylinteri, jonka puoliskot on yhdistetty elektroskooppeihin. Metallilevyt on kytketty positiivisen ja negatiivisen varauksen tuottavaan influenssikoneeseen. Havainnot:

- Varataan levyt, jolloin elektroskoopit näyttävät sylinterin päiden varautuvan.
- Poistetaan levyjen varaus, jolloin sylinterin varaukset myös katoavat.
- Varataan levyt uudelleen, ja erotetaan sylinterin varautuneet puoliskot toisistaan. Kun levyjen varaukset nyt poistetaan, sylinterin puoliskot jäävät varautuneiksi.



- d) Yhdistetään sylinterin puoliskot, jolloin niiden varaukset häviävät.

Havainnot ovat yhteensopivia selittävän mallin kanssa. Johteessa sähkökentän vaikutuksesta tapahtuvaa varauksen jakautumista kutsutaan sähköiseksi influenssiksi. On huomattava että koe ei kerro, minkä merkin varaus pääsee metallissa liikkumaan, vai liikkuvatko molemmat.

Magnetismi

Magneettiset ilmiöt havaittiin ensimmäiseksi magnetiitti-nimisellä mineraalilla, jonka havaittiin vetävän puoleensa rautaesineitä. Kun raudasta opittiin valmistamaan teriä ja neuloja, havaittiin että tällaisten esineiden valmistamiseen sopiva ”kova” rautaseos voidaan magnetoida pysyvästi, ts. opittiin valmistamaan kestonmagneetteja. Havaittiin että niissä magneettinen vuorovaikutus näyttää keskittyvän tiettyihin kohtiin, magneettinapoihin. Havaittiin myös että maapallon täytyy olla magneetti, jonka navat ovat lähellä maantieteellisiä napoja.

Magneettisilla ja sähköstaattisilla on havaittavissa selviä yhtäläisyyksiä:

- Sähköinen ja magneettinen vuorovaikutus ovat etävuorovaikutuksia, ja kummankin vaikutus voi olla vetävä tai hylkivä.
- Magneettinapoja on tasan kahta lajia kuten varauksiakin, ja samanlaiset navat hylkivät toisiaan, erilaiset vetävät toisiaan puoleensa.

Nimitykset pohjois- ja etelänapa tulevat siitä, että vaakasuoraan ripustettu sauvmagneetti kääntyy maantieteelliseen pohjois-etelä -suuntaan. Pohjoiseen osoittavaa magneettinapaa kutsutaan pohjoisnavaksi, etelään osoittavaa vastaavasti etelänavaksi¹.

- Magneettista vuorovaikutusta voidaan mallintaa magneettikentällä, ja mallia kuvata kenttäviivaesityksellä. Magneettikentällä on suunta ja voimakkuus kuten sähkökentälläkin.
- Magneetin lähellä magnetoitumaton rautaesine muuttuu itse magneettiseksi. Esiintyy siis sähköistä influenssia vastaava ilmiö, magneettinen influenssi.

Mutta on myös selkeitä eroja:

- Magneettisuutta ei voi johtaa kappaleeseen tai kappaleesta pois, kuten sähkövarausta.
- Esine voi varautua kokonaan positiivisesti tai negatiivisesti, mutta magneetissa on aina vähintään kaksi napaa jotka ovat erimerkkiset.
- Magneettikentän kenttäviivat ovat aina suljettuja silmukoita, kun sähkökentän kenttäviivat alkavat varauksista ja päättyvät varauksiin.

Havaintojen perusteella voidaan aavistaa, että sähköstaattisissa ja magneettisissa ilmiöissä on jotain yhteistä. Kuitenkin sellaisen ilmiön esittäminen, joka selvästi yhdistäisi molemmat ilmiömaailmat, on haasteellista. Staattisessa tilanteessa varattu kappale ja magneetti eivät vuorovaikuta. Teoriassa voitaisiin havaita, että magneettikentässä liikkuvaan varattuun kappaleeseen kohdistuu voima. Käytännössä koe ei luokkatilanteessa onnistu, koska opetusvälineillä aikaansaattavilla varauksilla ja magneettikentillä voima on havaittavaksi aivan liian pieni.

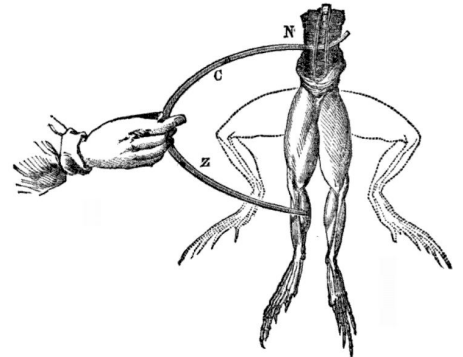
1 Tästä seuraa se hämmennystä aiheuttava seikka, että vaikka *maantieteessä* magneettiseksi pohjoisnavaksi kutsutaan sitä maapallomagneetin napaa joka sijaitsee pohjoisessa, niin *fysikaalisesti* maapallomagneetin pohjoisnapa sijaitsee lähellä maantieteellistä etelänapaa, ja vastaavasti maapallomagneetin etelänapa sijaitsee lähellä maantieteellistä pohjoisnapaa.

Sähkövirta

Historiallinen tausta

Sähköstaattisia ja magneettisia ilmiöitä esiintyy spontaanisti luonnossa sekä jo rautakautisessa teknologisessa ympäristössä, joten ilmiöt ovat olleet tunnettuja tuhansia vuosia. Sen sijaan luonnossa ei esiinny jatkuvia tarpeeksi voimakkaita pysyviä sähkövirtoja, joiden vaikutukset voitaisiin tunnistaa. Siksi sähkövirtailmiöiden löytäminen on edellyttänyt sellaista uuden teknologian tasoa, jonka vasta 1500-luvulla alkanut [tieteellinen vallankumous](#) tuotti. Sähkövirtailmiöiden tutkimus ja hyödyntäminen on myös vaatinut aivan uudenlaisen teknologian kehittämistä.

Sähkövirtailmiöiden tutkimuksen voidaan katsoa alkaneen vuonna 1790 Luigi Galvanin kokeista sammakonreisillä. Hänen ensimmäinen havaintonsa oli, että staattisen sähköön purkaus sai sammakon lihakset supistumaan. Galvanin myöhemmät kokeet osoittivat että pohjimmiltaan kemiallisilla², siis aineiden vaikutuksista toisiinsa syntyvillä ilmiöillä (kaksi eri metallia kosketuksissa toisiinsa ja sammakon kudoksiin) voitiin saada sammakon lihakset supistumaan. Oli siis alusta asti ilmeistä että kyseessä on sähköilmiö. Tästä alkoi nopea uuden ilmiömaailman tutkimus, ja jo 10 vuotta myöhemmin Volta esitteli keksimänsä sähköpariston, jolla voitiin tuottaa jatkuva sähkövirta.



Sähköön tuottaminen kemiallisesti, paristo, suljettu virtapiiri

Otetaan sitruuna ja puristellaan sitä ensin voimakkaasti niin että lohkojen väliset seinämät rikkoutuvat. Painetaan sitruunaan rinnakkain kaksi kuparinaulaa, ja kaksi sinkittyä rautanaulaa. Yhdistetään samanlaisten naulojen kannat hauenleuoilla, joissa on johtimet.

- Jos johtimien päillä koskettaa kieleensä³, aistii heikon tuntemuksen joka katoaa, kun johdin irroitetaan toisesta hauenleuasta.

Havaitaan siis sitruunan ja metallien vaikutuksesta syntyvän jotain, joka kulkee metallijohtimia pitkin ja vaikuttaa elimistöön. Havaitaan myös että ilmiö vaatii suljetun “piirin” joka koostuu metallista, siis aineesta jonka läpi varaus pystyy siirtymään. Vaikka yhteys sähköstatiikan ilmiöihin ei ole yhtä selkeä kuin Galvanin kokeissa, on kuitenkin uskottavaa että kyseessä on sähköilmiö, johon liittyy varauksen siirtymistä johtimien kautta. Ilmiö on kuitenkin erilainen kuin staattisen sähköön purkaukset, koska vaaditaan suljettu piiri ja ilmiö voi jatkua ilmeisen pitkään.

- Toistetaan koe valmiilla sauvaparistolla (vain 1,5 V!), havaitaan sama aistimus. Sauvaparisto siis tuottaa myös sähköilmiöitä.

Sähkövirran aikaansaamat ilmiöt

Kun Voltan tutkimusten myötä opittiin valmistamaan yhä voimakkaampia paristoja ja kytkemään niitä sarjaan, havaittiin lisää ilmiöitä joita sähkövirta aiheuttaa.

- Yhdistetään sauvapariston navat sopivan lyhyellä ja ohuella metallilangalla, jolloin havaitaan langan lämpenevän. Hehkulampussa on hyvin ohutta metallilankaa, joka lämpenee niin voimakkaasti että se alkaa hehkua ja lähettää valoa.

Vaikka sähköön ja magnetismin yhteys osattiin aavistaa, sähkövirran magneettisen vaikutuksen havaitsi

2 Galvani itse ajatteli että havattu sähkö syntyy elävässä kudoksessa. Volta oli eri mieltä ja rakensi paristonsa osoittaakseen, että kysymys on nimenomaan kemiallisesta ilmiöstä.
3 Hygieniaongelmat voi kiertää pyytämällä oppilaita tuomaan kotoa kaksi teelusikkaa, joihin johtimet liitetään. Kosketetaan kieleen lusikan varsilla.

ensimmäisen kerran H. C. Ørsted puolivahingossa sähköopin luentoa pitäessään.

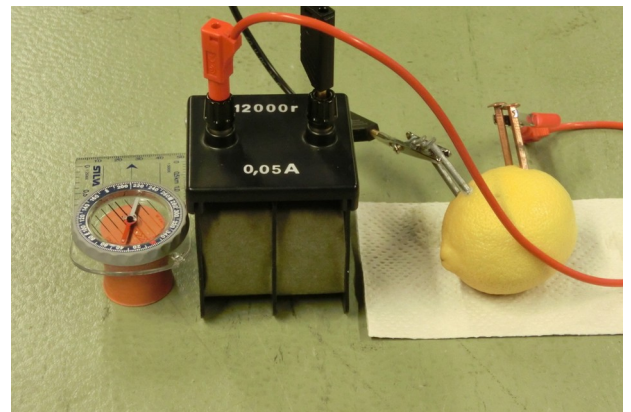
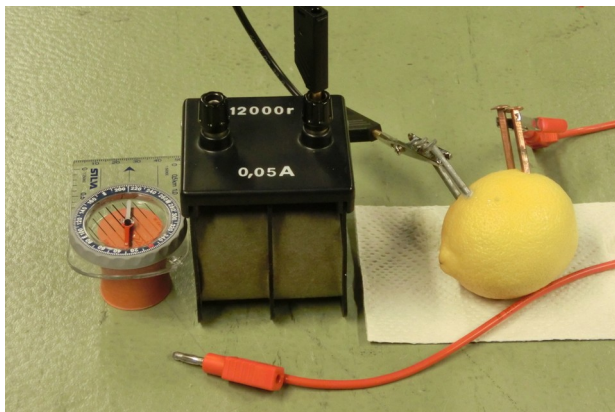
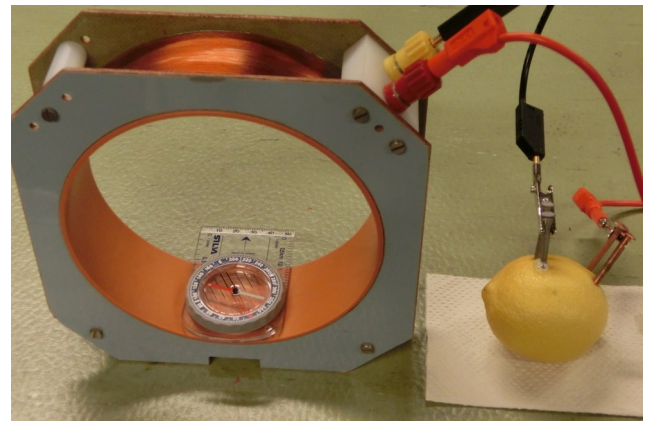
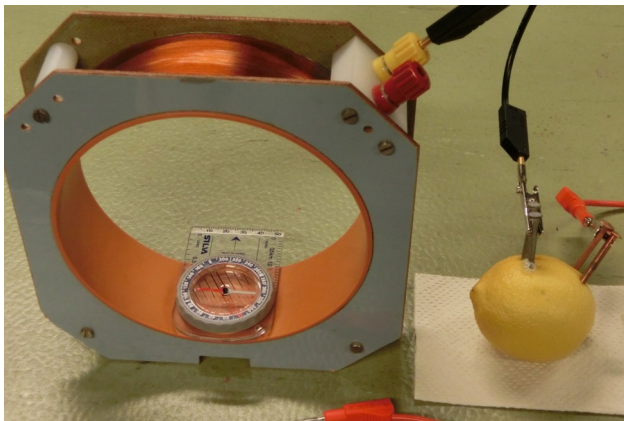
- Laitetaan johdin kulkemaan kompassineulan yli ja kytketään johdin paristoon. Havaitaan kompassineulan pyrkivän kääntymään johtimeen nähden poikittain.

Tämä oli erittäin merkittävä havainto, koska se ensimmäisenä yhdisti kolme ilmiömaailmaa: sähköstatiikan, magnetismin ja sähkövirran.

Tässä vaiheessa on hyvä palata takaisin sitruunaparistoon: onko kysymyksessä varmasti sama sähkö? Saako sitruunalla aikaan magneettisia ilmiöitä? Havaitaan että sitruunaparistolla Ørstedin koe sellaisenaan ei onnistu, kompassineula ei käänny. Mutta ei sitruunalla saa aikaan havaittavia lämpöilmiöitäkään, mikä johtaa epäilemään, että sitruunan tuottama virta on liian heikko yhden johtimen magneettikentän havaitsemiseen.

Koetetaan voimistaa sähkövirran magneettista vaikutusta niin, että sama sähkövirta kulkee monen rinnakkaisen johtimen läpi. Eli otetaan käyttöön käämi.

- Laitetaan johdinkäämin sisään kompassi. Kun käämi kytketään sitruunaan, havaitaan että kompassineula kääntyy havaittavasti. Vastaava ilmiö havaitaan myös pienemmällä käämillä, kun kompassi asetetaan käämin viereen.



Näin on kehitetty alkeellinen *galvanoskooppi*, jolla voidaan havaita heikkokin sähkövirta.

Koska sähkövirtaa voi syntyä kemiallisten ilmiöiden vaikutuksesta, herää kysymys voisiko vastaavasti sähkövirta saada aikaan kemiallisia ilmiöitä. Jos virtapiiri koostuu pelkistä metallijohtimista, niissä ei havaita kemiallisia muutoksia. Mutta jos osaksi virtapiiriä laitetaan sähköä johtavaa nestettä⁴, alkaa tapahtua.

- Kun osan virtapiiriä muodostaa ruokasuolaliuos, elektrodeilla vapautuu kaasuja ja mikäli liuos on

4 Tässä pitäisi oikeastaan ensin kokeilla, millaiset nesteet johtavat sähköä. Tämä onnistuu juuri kehitetyn galvanoskoopin avulla.

tarpeeksi väkevää, toisen elektrodin lähellä vesi värjäytyy vihreäksi. Jos käytetään kuparisulfaattiliuosta, toinen elektrodi päällystyy kuparilla. Sähkövirta siis saa aikaan kemiallisia ilmiöitä.

Sähkövirran ominaisuudet ja käyttäytyminen; jännite, resistanssi

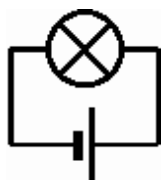
Sähkövirran aikaansaaman ilmiön voimakkuus, kuten lampun kirkkaus tai magneettisen vuorovaikutuksen voimakkuus, voi vaihdella riippuen virtapiiriin kytketystä paristosta ja myös siitä mitä komponentteja virtapiirissä on. Ilmeisesti *sähkövirralla on voimakkuus*, ja toisaalta paristolla on myös voimakkuus joka määrää sähkövirran voimakkuuden tietyssä virtapiirissä. Nimitetään pariston voimakkuusominaisuus *jännitteeksi*.

Kun paristo käännetään virtapiirissä, magneettisen vuorovaikutuksen suunta kääntyy ja elektrolyysireaktiot vaihtuvat elektrodilta toiselle. Havainnon perusteella on ilmeistä, että *sähkövirralla on suunta*, ja myös sähkövirran aikaansaavalla *jännitteellä on suunta*. Kaupallisten paristojen navat on merkitty (+) ja (-) -merkein. Kun mitkä tahansa paristot kytketään vuorotellen virtapiiriin napaisuudeltaan samaan suuntaan, magneettisen vuorovaikutuksen suunta ja siis myös sähkövirran suunta pysyy samana. Määritellään sähkövirran suunnaksi (+) -navasta (-) -napaan.

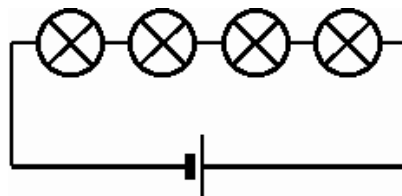
Kvalitatiivisesti sähkövirran käyttäytymistä voidaan tutkia käyttämällä lamppeja sähkövirran voimakkuuden indikaattoreina. Tähän tarvitaan lamppeja, jotka valaisevat samaan paristoon kytkettyinä yhtä voimakkaasti. Tällöin kahden lampun kirkkauksista voidaan päätellä, ovatko niiden läpi kulkevat sähkövirrat yhtä voimakkaat vai onko toinen voimakkaampi. Huom! mitään kvantitatiivisia päätelmiä (kuten onko sähkövirroilla määrätty voimakkuussuhde) lamppejen kirkkauseroista ei voi tehdä.

Kytetään useita lamppeja sarjaan. Havaitaan että lamput syttyvät ja sammuvat yhtä aikaa, ja loistavat yhtä kirkkaasti. Sähkövirta siis syntyy ja häviää yhtä aikaa koko virtapiirissä, ja on kaikkialla piirissä yhtä voimakas.

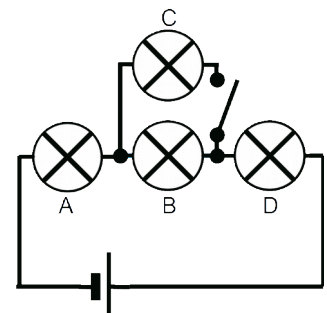
Havaitaan myös että kytkettäessä piiriin lisää lamppeja, ne palavat yhä himmeämmin. Jokainen lamppu siis vastustaa sähkövirran kulkua. Kutsutaan tätä lampun ominaisuutta *resistanssiksi*. Sarjaan kytkeminen kasvattaa resistanssia.



kuva 1.



kuva 2.



kuva 3.

Haarautuvalla virtapiirillä (kuva 3) havaitaan että kun lamppu C kytketään lampun B rinnalle ne palavat himmeämmin, mutta keskenään yhtä kirkkaasti. Lamput A ja D kirkastuvat, joten piirin kokonaissähkövirta kasvaa. Rinnankytkennässä sähkövirta jakautuu tasan samanlaisten lamppejen kesken. Rinnan kytketyt lamput vastustavat virran kulkua vähemmän kuin yksi lamppu, eli rinnan kytkettyjen lamppejen yhteinen resistanssi on pienempi kuin yksittäisen lampun resistanssi.

Induktio

Edellä on havaittu että sähkövirtaa voi tuottaa kemiallisesti, ja toisaalta sähkövirta saa aikaan kemiallisia ilmiöitä. On myös havaittu että sähkövirta tuottaa magneettisen vuorovaikutuksen, joten herää kysymys

voisiko magneettisten ilmiöiden avulla saada aikaan sähkövirtaa. Tämä oli lähtökohta Michael Faradayn tutkimuksille, jotka johtivat vuonna 1831 sähkömagneettisen induktion löytämiseen.

- Kytetään edellä esitelty kompassin ja käämin yhdistelmä (galvanoskooppi) toiseen käämiin. Ajatuksena on että koska sähkövirran aiheuttama magneettinen vuorovaikutus on voimakkaampi käämissä kuin suorassa johtimessa, niin ehkä mahdollinen magneetin aikaansaama sähkövirta on myös voimakkaampi mikäli se syntyy käämissä. Tuodaan kestopagneetti käämin lähelle. Havaitaan että jos magneetti paikallaan käämin sisä- tai ulkopuolella, sähkövirtaa ei synny. Mutta jos magneetti liikkuu niin että käämin läpi menevä magneettikenttä muuttuu, silloin galvanoskooppimme osoittaa sähkövirran kulkevan. Sähkövirta on sitä voimakkaampi, mitä nopeampi ja suurempi on magneettikentän muutos.