

HELSINGIN YLIOPISTO

Pienoissähkömoottorin tutkiminen sähkömagnetismin opiskelun apuvälineenä lukiossa

Didaktinen rekonstruktio

Fysiikan opettajan koulutussuunta
Maisterintutkielma

Laatija:
Seppo Salminen

Ohjaaja:
Yliopistonlehtori Ari Hämäläinen

28.11.2022

Helsinki

Tiedekunta: Matemaattis-luonnontieteellinen tiedekunta

Koulutusohjelma: Fysikaalisten tieteiden koulutusohjelma

Opintosuunta: Aineenopettajan koulutus

Tekijä: Seppo Salminen

Työn nimi: Pienoissähkömoottorin tutkiminen sähkömagnetismin opiskelun apuvälineenä lukiossa. Didaktinen rekonstruktio.

Työn laji: Maisterintutkielma

Kuukausi ja vuosi: Marraskuu 2022

Sivumäärä: 65

Avainsanat: didaktinen rekonstruktio, fysiikan opetus, lukio, sähkömagnetismi, sähkömoottori

Ohjaaja tai ohjaajat: Ari Hämäläinen

Säilytyspaikka: Helsingin yliopiston kirjasto

Muita tietoja:

Tiivistelmä:

Opinnäytteessä pohditaan, voisiko lukion sähkömagnetismin opetuksen yhteyteen kytkeä pienoissähkömoottorin kokeellista tutkimista. Ajatuksena on, että tällainen didaktinen rekonstruktio auttaisi sähkömagnetismin aihepiirin tavoitteiden saavuttamisessa. Pienoissähkömoottori poikkeaa fysiikan opiskeluun käytetyistä koe-, havainnollistamis- ja muista apuvälineistä siten, että se on reaali maailmassa yleinen olemassa oleva sähkömagnetismin perustuva tekninen sovellus. Sen kokeellinen tutkiminen tuo toisenlaisen, eräessä mielessä autenttisen näkökulman sähkömagneettisten ilmiöiden ilmenemiseen ympäristössämme. Tämä näkökulma voisi toimia opiskelijalle vahvistavana elementtinä aihepiirin käsitteiden omaksumisessa. On eri asia tehdä empiiristä tutkimista varta vasten siihen suunnitelluilla koevälineillä, kuin aidolla reaali maailman teknisellä sovelluksella. Pienoissähkömoottorista saa käsityksen siitä, miten sähkömagnetismia sovelletaan käytännössä.

Lukion opetussuunnitelman perusteet 2019 määrittelevät lukion kurssimoduulin 7, Sähkömagnetismi ja valo, keskeiset sisällöt. Sähkömagnetismin osalta keskeiset sisällöt ovat kaikki enemmän tai vähemmän läsnä pienoissähkömoottorin toiminnan periaatteissa. Tämä tarjoaa hyvän lähtökohdan opinnäytteen pohdinnalle. Sähkömagnetismin aihepiiri käydään vaiheittain läpi ja moottorin tutkiminen kytetään jokaiseen vaiheeseen siihen soveltuvalla tavalla. Induktioilmiön suhteen hyödynnetään pienoissähkömoottorin sitä ominaisuutta, että se toimii akselistaan pyörittämällä myös generaattorina. Sähkömagneettinen säteily ja valo aihepiirinä ei sisälly opinnäytteeseen.

Oppimisteoreettisena viitekehyksenä opinnäytteessä on hahmottava lähestymistapa. Sähkömagnetismin kurssin sisällöllisen etenemisen runkona käytetään Galilei 7 – oppikirjaa vuodelta 1996. Kirja sopii tehtäväänsä hyvin erityisesti sen vuoksi, että se on konstruoitu hahmottavan lähestymistavan periaatteiden mukaisesti. Kirjan sisältö on pieniä yksityiskohtia lukuunottamatta relevantti iästään huolimatta.

Opinnäytteen johtopäätöksissä todetaan, että pienoissähkömoottorin tutkimisen kytkeminen kurssin yhteyteen on realistinen ajatus. Tutkiminen on käytännössä toteutettavissa tavanomaisessa luokahuoneympäristössä, eikä siihen pääosin tarvita erityisvälineitä. Moottorit ovat edullisia, joten kustannukset eivät ole esteenä. On perusteltua ajatella, että tutkimisen myötä opiskelijat saavat sähkömagnetismin ilmiöihin ja käsitteisiin toisen näkökulman, jolla on oppimista vahvistava rooli. Ongelmiksi tunnistetaan moottorin eräiden ominaisuuksien havainnollistamisen tekninen järjestäminen, sekä mahdollisesti opettajien valmius didaktisen rekonstruktion toteuttamiseen käytännössä.

Sisällysluettelo

1	Johdanto	7
2	Lukion opetussuunnitelman perusteet 2019 ja sähkömagnetismin kurssimoduuli 7	9
2.1	Tavoitteet ja keskeiset sisällöt	9
2.2	Oppikirja Galilei 7 moduulin sisällöllisen etenemisen esimerkkinä	11
3	Hahmottava lähestymistapa	12
3.1	Hahmottava lähestymistapa fysiikan opetuksessa	12
3.2	Hahmo	13
3.3	Käsitteiden hierarkia	15
3.4	Tieteellinen ja teknologinen prosessi	18
4	Pienoissähkömoottori	20
4.1	Mekaaninen rakenne	20
4.2	Roottorin käämien sähköinen kytkentä	24
4.3	Roottorin ja staattorin magneettikentät	25
4.4	Pienoissähkömoottorin tutkimisen kytkeminen sisällölliseen etenemiseen	29
4.4.1	Didaktinen rekonstruktio	30
5	Moottorin tutkiminen sähkömagnetismin opetuksen yhteydessä	31
5.1	Magnetismi	31
5.1.1	Magneettisia ilmiöitä	31
5.1.2	Magneettikenttä	35
5.1.3	Käämi magneettikentässä	40
5.1.4	Hiukkanen magneettikentässä	46
5.2	Sähkömagneettinen induktio	48
5.2.1	Ympäristön induktioilmiöitä	48
5.2.2	Induktiolaki	54
5.2.3	Itseinduktio	57
5.2.4	Vaihtovirtageneraattori	57
6	Pohdintaa	61
7	Johtopäätökset	64

1 Johdanto

Fysiikka luonnontieteenä ja reaalitieteenä on ainutlaatuisen kyvykäs tarjoamaan siihen perehtyvälle kokonaisvaltaisen ymmärryksen fyysisestä maailmastamme. Ympäristömme on täynnä fysiikkaa sen eri muodoissa. Niinkin arkipäiväinen asia kuin aine osoittautuu tarkemmin tutkittaessa mitä hämmästyttävimmäksi fysikaaliseksi entiteetiksi. Fysiikka tarjoaa myös avaimet tuottamansa tieteellisen tiedon soveltamiseen teknologian muodossa.

Fysiikan voi tieteenä jakaa kahteen osa-alueeseen: teoreettiseen ja soveltavaan fysiikkaan. Aineen olemukseen perehtyminen edustaa tieteen teoreettista puolta, insinöörien rakentamat laitteet soveltavaa puolta. Ne ovat olemukseltaan joskus hyvin erilaisia maailmoja, mutta niiden välillä on vahva kytkös. Ilman teoriaa ei synny laitetta, toisaalta laitteen toiminnan ymmärtäminen vaatii teoreettista osaamista.

Tämän opinäytteen idea on koettaa kytkeä yhteen fysiikan teoria ja konkreettinen tekninen sovellus opetuskontekstissa. Kontekstina toimii lukion fysiikan moduuli 7, jonka otsikko on ”Sähkömagnetismi”. Sovelluksena toimii arkielämässä hyvin tavallinen laite, tasavirtainen (pienois)sähkömoottori. Kantavana ajatuksena on, että tällöin saadaan kaksi näkökulmaa opiskeltavaan aiheeseen: yhtäältä käydään läpi sähkömagnetismin teoriaa, toisaalta tehdään empiirisiä tutkimuksia pienoissähkömoottorista. Hypoteesina on, että sovelluksen mukanaan tuoma näkökulma tukee opiskelijan käsitteenmuodostusta tässä suhteellisen vaativassa fysiikan osa-alueessa. Opinnäytteessä uuden elementin, pienoissähkömoottorin, kytkemistä opetusjärjestelyyn kutsutaan termillä ”didaktinen rekonstruktio”.

Kirjoittaja on toiminut 1990-luvulla noin 10 vuoden ajan peruskoulun silloisen oppiaineen, teknisen työn opettajana. Fysiikan opetuksessa toistuu usein se kaava, että ensin esitellään teoreettiset aspektit esimerkiksi sähkömagnetismista, jonka jälkeen esitellään teknisiä sovelluksia, joissa teoria toimii käytännössä. Taustani on osaltaan tuottanut sen ajatuksen, että tekninen sovellus voisi näytellä isompaa roolia aihepiirin opiskelussa. Se voisi tuoda opiskeluprosessiin sellaista, jota voisi kutsua relevanssiksi tai autenttisuudeksi; opiskelija saa näkökulman siihen, miten teoria on läsnä teknisessä sovelluksessa. Toisena perusteena opinnäytteen idealle voisi mainita

sen, että teknisten laitteiden purkaminen ja niiden toimintaperiaatteen ymmärtäminen tutkimalla on ollut kirjoittajalle luontaista ja varsin opettavaista. Opinnäytteen teoreettisena viitekehysenä toimii Kaarle ja Riitta Kurki-Suonion kehittämä oppimisen malli nimeltään ”Hahmottava lähestymistapa”.

2 Lukion opetussuunnitelman perusteet 2019 ja sähkömagnetismin kurssimoduuli 7

2.1 Tavoitteet ja keskeiset sisällöt

Lukion moduuli 7:n aihepiirinä on sähkömagnetismi ja valo [11]. Moduulin opintopistemäärä on 2. Tämä opinnäyte keskittyy sähkömagnetismiin, joten aiheen ”valo” käsittely sivuutetaan.

Moduulin tavoitteiksi sähkömagnetismin osalta mainitaan:

1. Opiskelija ymmärtää induktioilmiön keskeisen merkityksen magnetismissa.
2. Opiskelija ymmärtää sähköenergian tuotannon ja siirron fysikaaliset perusteet ja merkityksen yhteiskunnan toiminnan kannalta.

Keskeisiksi sisällöiksi määritellään:

- a) ferromagnetismi ja magneettinen dipoli
- b) magneettinen vuorovaikutus ja magneettikenttä
- c) varatun hiukkasen liike homogeenisessa sähkö- ja magneettikentässä
- d) virtajohtimen magneettikenttä ja kahden virtajohtimen välinen voima
- e) sähkömagneettinen induktio, Lenzin laki ja pyörrevirrat
- f) generaattori, vaihtovirran synty, muuntaja ja energian siirto sähkövirran avulla

Sisältöjä täsmennetään esim. näin:

”Tarkastellaan käämiä pyörivässä magneettikentässä tai pyörivää käämiä magneettikentässä. Induktiolain avulla perustellaan, miksi käämiin syntyy sinimuotoinen induktiojännite.”

Sähkömagnetismista todetaan myös:

”Keskeisiä sisältöjä voidaan tarkastella esimerkiksi seuraavilla kokeilla: magneettivuon tiheyden määrittäminen käämin sisällä,...”

Lisäksi on TVT -taitotavoite (Tieto ja ViestintäTeknologia) :

-piirto-ohjelmien tarkoituksenmukainen käyttö [3].

Tämän opinnäytteen aiheena on pohtia, voisiko sähkömoottorin toiminnan tutkimisen liittäminen moduulin aihepiiriin opiskeluun tuottaa parempaa oppimista. LOPS 2019 näyttäisi tarjoavan sille lupaavat edellytykset. Keskeiset sisällöt ovat jokainen enemmän tai vähemmän läsnä moottorin toiminnassa. Sisältöjen täsmennyksissä ja kokeellisuudessa tuodaan esiin käämin tuottama magneettikenttä ja magneettikentässä pyörivässä käämissä tapahtuvat induktioilmiöt. Sähkömoottorin toiminnan keskeinen elementti on käämi.

Moduulin sähkömagnetismiosuutta kokonaisuudessaan tarkasteltaessa keskeisimmäksi fysiikan ilmiöksi vaikuttaisi nousevan induktio. Didaktinen kysymys on, että miksi juuri se? Kirjoittaja arvelee, että tavoite 2 on osa vastausta, joka liittyy isompaan kysymykseen: miksi fysiikkaa ylipäätään opetetaan lukiossa? Koulutusjärjestelmällä on yhteiskunnallisessa mielessä useita tavoitteita, yksi niistä on vapaasti ilmaistuna ”opettaa nuorille ihmisille sellaisia taitoja, joita he tulevat tarvitsemaan elämänsä aikana”. Toisaalta saman asian voisi kääntää niin päin, että ”nuorille ihmisille pitää opettaa sellaisia taitoja, joita yhteiskunta tarvitsee tulevaisuudessa”. Jälkimmäiseen liittyy vahvasti se, että sähköenergian tuotanto ja jakelu muodostavat teknisen kokonaisuuden, joka on yhteiskunnallisesti kriittisen tärkeää infrastruktuuria.

Jos taas ajatellaan fysiikan opiskelua tieteen sisäisenä, sellaisesta näkökulmasta jossa fysiikan opiskelu on kiehtovaa ja palkitsevaa puhtaasti sen vuoksi, että opiskelija haluaa ymmärtää luonnon ilmiöitä, on induktioilmiö myös perusteltu valinta moduulin keskeisimmäksi aiheeksi. Siinä kytkeytyy yhteen monta muuta sähkömagnetismin ilmiötä varsin kompaktilla tavalla. Keskeiset sisällöt –luettelossa mainitut aiheet a) – d) ovat tarpeellista taustatietoa induktioilmiön ymmärtämiseksi. Kohta c) kaipaa tässä vaiheessa ehkä sellaisen tarkennuksen, että varauksen omaavan vapaan hiukkasen käyttäytyminen avaruudessa olevassa magneettikentässä ei sisällä induktion kannalta suoraan tärkeää informaatiota. Tieto muuttuu merkitykselliseksi vasta sitten, kun kontekstina on elektroni johteessa. Tällöin elektroniin kohdistuva Lorentz-voima tuottaa ilmiöitä, jotka liittyvät käämin käyttäytymiseen magneettikentässä ja generaattorin tuottamaan sähkövirtaan. Kohdan d) sisältö ”kahden virtajohtimen välinen voima” on myös hiukan kaukana induktiosta. Historiallista merkitystä sillä on, koska ampeeri määriteltiin sen avulla vuoteen 2019

asti [13]. Sen sijaan käämin tuottaman solenoidisen magneettikentän ymmärtäminen alkaa yksittäisen virtajohtimen ympärilleen tuottamasta magneettikentästä.

Yleisesti voisi todeta, että moduulin kaksi opintopistettä tarkoittavat käytännössä, että aikaa aiheen opiskeluun ei ole kovin paljon. Opintopiste määritelmän mukaan tarkoittaa 27 tuntia opiskelijan työtä [14]. Moduuli 7 sisältää sähkömagnetismin lisäksi aihepiirin valo, joten sähkömagnetismille jää käytettäväksi alle 2 opintopistettä aikaa ja resursseja. Tämä on syytä huomioida opetuksen käytännön järjestämisessä.

2.2 Oppikirja Galilei 7 moduulin sisällöllisen etenemisen esimerkkinä

Sähkömagnetismin kurssin sisällöllistä etenemistä tarkastellaan käyttäen esimerkkinä Galilei 7 oppikirjaa vuodelta 1996 [10]. Painovuoden jälkeen LOPS on muuttunut ainakin kaksi kertaa, mutta kirjan sisältö on edelleen hyvin relevantti. Kurssin sisällöllisen etenemisen rungoksi kirja on erityisen sopiva, sillä yksi sen tekijöistä on Kaarle Kurki-Suonio. Esipuheessa tuodaan esiin, että kirjan rakenne ja asioiden esittäminen noudattavat hahmottavan lähestymistavan periaatteita [9]. Havainnot ja kokeet toimivat oleellisena oppimisen lähtökohtana. Aiemmin opittua ja omaksuttua käytetään uusien käsitteiden omaksumisen tukena tekemällä rinnastuksia ja rakentamalla analogioita. Jokainen askel aiheessa etenemisen suhteen pyritään tekemään ymmärrettäväksi riittävin ja asianmukaisin taustatiedoin.

Kirja jakautuu neljään pääotsikkoon: Magnetismi, Sähkömagneettinen induktio, Vaihtovirta ja Sähkömagneettinen viestintä. Tämä opinnäyte keskittyy niistä kahteen ensimmäiseen. Kirjassa pääotsikoiden alla on kummassakin neljä alaotsikkoa. Niitä samoja käytetään tarkastelussa.

3 Hahmottava lähestymistapa

3.1 Hahmottava lähestymistapa fysiikan opetuksessa

Hahmottava lähestymistapa on nimitys didaktisen fysiikan opetusmallille, joka on kehitetty Helsingin yliopiston fysiikan laitoksen opettajankoulutusyksikössä. Lähestymistapa tutkii ja analysoi fysiikkaa tieteenä, sen merkityksiä, rakenteita, käsitteitä ja niiden muodostumista. Sana ”lähestymistapa” viittaa asian ytimeen: millä tavalla ja millaisessa järjestyksessä fysiikkaa tieteenä on mielekästä lähestyä oppimismielessä? Sana ”hahmottava” vihjaa vastauksesta; oppimisessa on kyse prosessista, jossa fysiikan ilmiöt, oliot, käsitteet ja lainalaisuudet hahmottuvat asteittain. Prosessin keskeiset elementit ovat empiria ja teoria, ja keskeistä prosessissa on niiden välinen vuorovaikutus sekä riippuvuussuhde. Kumpikin yksinään on epistemologisessa mielessä merkityksetön, vasta yhdessä ne tuottavat sen vakuuttavuuden, mikä fysiikalla tieteenä on. Hahmottavaa lähestymistapaa ovat olleet kehittämässä erityisesti Kaarle ja Riitta Kurki-Suonio.

Fysiikka tieteenä kuuluu reaalitieteiden joukkoon, joka määritelmän mukaan käsittelee todellisia objekteja. Ne tieteet, jotka käsittelevät todellisten sijaan käsitteellisiä objekteja, ovat käsitteellisiä tieteitä. [12]

Määritelmää voisi tarkentaa siten, että fysiikka ei käsittele vain todellisia objekteja, vaan myös käsitteellisiä. Matematiikka on fysikaalisen ajattelun ja ajatusten muotoilun yksi peruspilareista, vaikka onkin puhtaasti käsitteellistä. Filosofisessa ajattelussa käsite ”tosi, todellinen” aiheuttaa usein syvällisiä pohdintoja. Mikä lopulta on totta? Fysikaalisessa ajattelussa lähdetään siitä, että havaitut ilmiöt lähtökohtaisesti ovat todellisia, ellei ole erityistä syytä epäillä toisin. Jos kaksi magneettia vetävät toisiaan puoleensa, minkä voi nähdä ja tuntea, ja minkä ovat nähneet ja tunteneet lukemattomat ihmiset kautta historian, ilmiö on todellinen. Fysiikka on empiiristä ja kokeellista tiedettä, jossa havainnot käytetään lähtökohtana jatkopäätelyyn. Reaalitieteistä fysiikka on historiansa aikana osoittanut poikkeuksellisen kyvyn rakentaa havaituille luonnon ilmiöille tarkan selityksen teorioineen, matemaattisine malleineen ja ennustuskykyineen. Se on fysiikan erityinen ominaisuus tieteenä.

Kurki-Suonio näkee empiirisessä tieteessä ainekset dualismiin: on empiirinen osa ja teoreettinen osa. Fysiikassa voidaan puhua kokeellisesta fysiikasta ja teoreettisesta fysiikasta. Uhkana on se, että nämä erkaantuvat toisistaan jopa siinä määrin, että fysiikan eri suureita aletaan käsittämään joko teoreettisina tai kokeellisina. Voi syntyä myös kaksi koulukuntaa, joiden näkemykset ovat toisensa poissulkevat; toisten mielestä fysiikkaa oppii parhaiten teorian kautta, toisten mielestä kokeellisuuden myötä. Tällaista dualismia Kurki-Suonio kutsuu erottavaksi dualismiksi. Vastakkaisena näkökulmana hän näkee yhdistävän dualismin, jossa voidaan todeta jopa, että fysiikassa mikään ei ole puhtaasti kokeellista tahi teoreettista, vaan molempia on tarvittu molempien tuottamiseen. ”Kaikki käsitteet, termit, suureet, lait ja teoriat ovat perusolemukseltaan samanlaisia duaalisia empiiris-teoreettisia entiteettejä” [8]. Hahmottava lähestymistapa nojaa vahvasti tähän yhdistävään dualismiin.

Kurki-Suonio rinnastaa hahmottavan lähestymistavan oppimisprosessin lapsen luontaiseen oppimiseen. Lapsi havainnoi ympäristöään ja alkaa hahmottaa siinä erilaisia entiteettejä, asioita, ilmiöitä. Hän tutustuu esineisiin ja huomaa niissä erilaisia ominaisuuksia. Tuolin päällä voi istua, toisaalta se voi myös kaatua. Jos tuoli kaatuessaan osuu varpaaseen, voi käydä kipeää, jos tuolin ominaisuuksiin kuuluu kovuus, terävyys tai painavuus. Lapsen mieleen alkaa syntyä malli tuolista, ja tämä malli tarkentuu siinä prosessissa jossa lapsi tekee tuolista uusia havaintoja ja rakentaa mieleensä uusitun, paremman mallin siitä. Prosessi on syklinen ja tiedon karttuminen tekee siitä myös spiraalimaisen. Kierrosten nouseminen ”ylemmälle” tasolle edustaa oppimista.

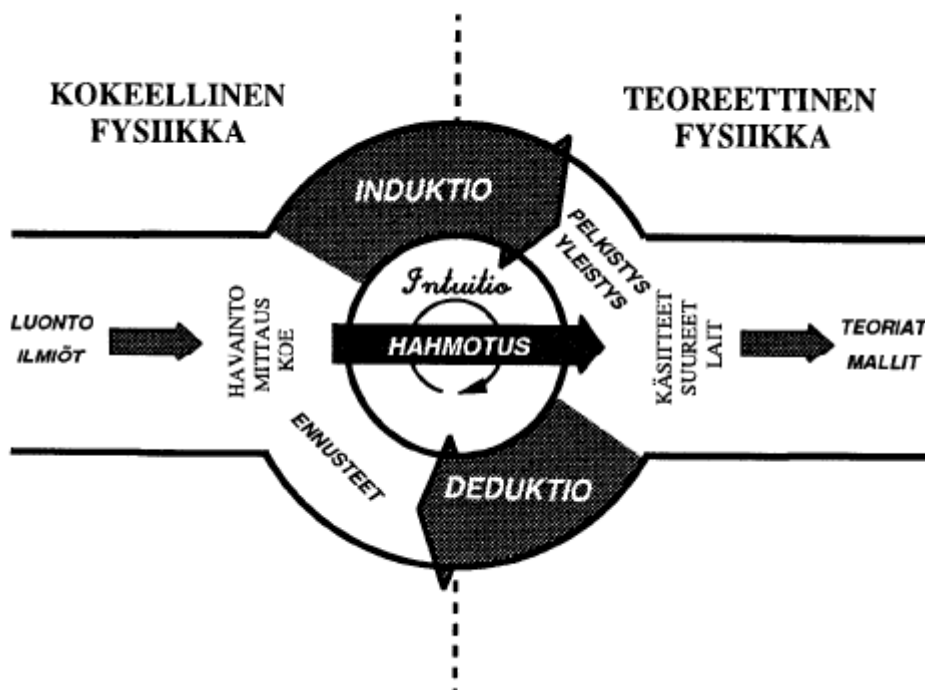
Oppimisprosessi puolestaan rinnastuu tieteelliseen prosessiin, koska molemmissa on kyse tiedon luomisesta. Tieteellinen tutkimus on tiedon yleistä luomista, oppiminen on tiedon henkilökohtaista luomista [9]. Ensin mainittua ei voi omaksua ilman viimeksi mainittua.

3.2 Hahmo

Hahmottavan lähestymistavan keskeinen termi on hahmo (myös Gestalt, ruotsiksi ”kuva”, saksaksi ”muoto”. Suomentokset tekijän). ”...jokainen fysikaalinen käsite on hahmo, Gestalt, prosessi, jossa empiria ja teoria yhdistyvät yhdeksi, jatkuvasti

kehittyväksi merkitykseksi.” Lisäksi: ”...tämä prosessi on päättymätön. Käsitteet ovat avoimia, koska niiden merkitykset ovat jatkuvan kehityksen alaisia.” Edelleen: ”...ymmärtäminen on ensin...Teoria on vain jo ymmärretyn täsmennettyä esittämistä” [8].

Kurki-Suonio korostaa ymmärryksen syntymisessä sitä prosessia, jossa empiria ja teoria vuorovaikuttavat syklisesti. Käsitteiden ymmärtämiseksi täytyy tuntee kyseinen prosessi. Koska käsitteet ovat jatkuvan kehityksen alla, niiden ”lopullisuus” on aina kyseenalaista. Niitä on parempi kutsua hahmoiksi. Ymmärrys perustuu ilmiöiden empiiriseen hahmottamiseen. Siksi ymmärtäminen on ensin ja teoria sen jälkeen. Kaavio 1 havainnollistaa käsitteenmuodostuksen prosessia.



Kaavio 1. Hahmottamisen kaksisuuntainen dynamiikka. ([9], s 149)

Kaavion 1 vasemmalla puolella on luonto ja sen ilmiöt. Havainnoimalla, mittaamalla, kokeita tekemällä ilmiötä hahmotetaan. Pelkistämisen ja intuition avulla muodostetaan jonkinlainen perushahmo, jonka merkitystä ilmiön suhteen voidaan edelleen testata, kokeilla, ennustaa. Tällöin syntyy uusia havaintoja ja sykli uusiutuu. Riittävän monen kierroksen jälkeen syntyy selkeämpiä hahmoja, käyttökelpoisia käsitteitä, suureita ja lainalaisuuksia. Nämä ovat laajemman teorian ja mallien rakennusosia. ”Hahmo on merkitys, joka syntyy ennen käsitettä” [9].

Kaaviossa on loogisen päättelyn termit ”induktio” ja ”deduktio”, joilla on toki tärkeä rooli, mutta Kurki-Suonio pitää suuressa arvossa ihmismielen intuitiota kaavion

prosessissa. Toisaalta jos ajattelee, että kyse on tiedon luomisesta, niin silloin intuitio näyttäytyy varsin relevanttina komponenttina.

Kaaviosta ilmenee myös se oleellinen seikka, että vaikka kyse on syklisestä prosessista, niin sillä on kokonaisuudessaan pääsiallinen suunta: ilmiöstä teoriaan [8].

3.3 Käsitteiden hierarkia

Kurki-Suonio jakaa fysiikan käsitteet karkeasti neljään hierarkkiseen tasoon: kieli, suureet, lait, teoria. Kaavio 2 esittää hierarkiaa.



Kaavio 2. Fysiikan käsitteiden hierarkkiset tasot. ([9], s. 149)

Ensimmäinen taso, kieli, sisältää ilmiön havainnoinnin ja sen kuvailun, parushahmottamisen kvalitatiivisesti. Tasosta suureisiin eteneminen vaatii niin sanotun kvantifiointiprosessin, jossa havaitusta ilmiöstä suodatetaan esiin mitattavia piirteitä. Kvantifiointia voidaan myös kutsua metritykseksi, mikä tarkoittaa mitan määrittämistä [8]. Prosessissa on keskeistä etsiä ilmiöstä jokin invarianssi, sellainen asia joka säilyy. Sellaista piirrettä on hyvä käyttää ilmiön selittämisen ja jatkokäsittelyn peruspilarina, suureena. Kolmas taso, lait, käsittää suureiden väliset algebralliset relaatiot. Siirtyminen teorian tasolle tapahtuu strukturointiprosessin välityksellä. Prosessi on abstrakti, eikä (enää) sisällä mittaamista tai empiriaa.

Kaaviota 2 voidaan käyttää määrittämään kaksi erilaista lähestymistapaa fysiikan opetukseen. Jos suunta on laatikosta 1 laatikkoon 4, on kyse kokeellisesta (luonnollisesta) lähestymistavasta. Päinvastainen suunta on nimeltään teoreettinen (keinotekoinen) lähestymistapa. Sanaa ”keinotekoinen” ei pidä tässä yhteydessä tulkita ilmaisemaan epäpätevyyttä. Sillä koetetaan tuoda esiin sitä, että lähtökohtana toimiva teoria on ihmisen tekemä ja siten epäluonnollinen. Kurki-Suonio katsoo, että on oleellista tunnistaa ja tiedostaa kumpaan suuntaan opetus-oppimisprosessi koulussa kulkee. Pääviesti on, että alemman tason opetuksessa kuten peruskoulu ja lukio, suunnan pitäisi olla ensin mainittu kokeellinen, luonnollinen. Se on tärkeää sen vuoksi, että tällöin käsitteiden rakentuminen on tukevalla pohjalla; niillä on empiirinen perustelu. Kun käsitteet on omaksuttu hyvin, on mahdollista siirtyä uuden tiedon omaksumisessa vaikeampaan teoreettiseen lähestymistapaan. Se vaatii omaksujalta pitkälle kehittyneitä abstraktia ajattelukykyä [7].

Kurki-Suonio mainitsee useita erilaisia esimerkkejä siitä, miten perusopetuksessa ilmenevä teoreettinen lähestymistapa voi sekoittaa oppilaiden mahdollisuutta omaksua fysiikan käsitteistöä järkevästi. Yhden esimerkin tarjoaa sähköoppi. Jos määritellään varaus elektronien ylimääräksi tai vajaukseksi, ja sähkövirta elektronien liikkeenä, on kyseessä ilmiön määrittäminen sitä selittävästä mallista. Ongelman ymmärtää sen tosiasian myötä, että aikanaan ilmiötä tutkineet Volta ja Coulomb eivät tienneet elektroneista lainkaan. Silti he havaitsivat selkeän ilmiön.

Toisena ongelmallisena lähestymistapana voisi mainita suureen määrittelyn kaavalla. Jos työ määritellään ilmoittamalla, että se on voiman ja siirtymän tulo, on oppilaalla todennäköisesti hankaluuksia sisäistää asian todellinen luonne ja olemus. Yleisenä

nyrkkisääntönä Kurki-Suonio mainitsee sen, että suureen määrittelystä pitää pystyä päättämään se, miten suureen voi mitata (vrt. kvantifointi) [7].

On pidettävä mielessä, että Kurki-Suonio ei tuomitse teoreettista lähestymistapaa itsessään. Hän vain toteaa, että se ei sovellu perusopetukseen. Teoreettinen lähestymistapa ei myöskään ole ristiriidassa hahmottavan lähestymistavan kanssa, jos tulokset voidaan verifioida empiirisesti. Kirjoittajalle muistuu kyseisestä lähestymistavasta mieleen antimaterian olemassaolon keksimisen tausta. 1920-luvulla Paul Dirac tutki Shcrödingerin yhtälöä relativistisesta näkökulmasta. Tutkimusten lopputuloksena oli yhtälö, jolla oli neljä erilaista ratkaisua. Kaksi niistä selittyi tunnetulla materiaalilla, mutta kaksi muuta ratkaisua tarkoittivat, että täytyy olla esim. elektroneja joilla on päinvastainen sähkövaraus, eli antimateriaa [1]. Sittemmin käsite positroni on vakiintunut ja antimateriaa käytetään erilaisiin tarkoituksiin. Teoreettinen lähestymistapa voi siis tuottaa vallankumouksellisia tuloksia.

Eräällä tavalla päinvastaisena esimerkkinä voisi mainita valosähköisen ilmiön. Sen suhteen ongelmana oli, että ilmiö oli olemassa ja selkeä, mutta sille ei ollut teoreettista selitystä. Se oli mysteeri. Havainnot ilmiöstä olivat ristiriidassa kaiken siihen mennessä saavutetun fysiikan tietämyksen kanssa. Arvoitus ratkesi sinnikkään tutkimustyön ja intuitiivisen oivaltamisen myötä. Valosähköinen ilmiö oli osaltaan avaamassa kokonaan uudenlaista fysiikan osa-aluetta, kvanttifysiikkaa. Kirjoittaja näkee tässä yhtymäkohdan Kurki-Suonion näkemykseen fysiikan käsitteiden avoimuudesta, keskeneräisyydestä. Voisi todeta, että niin kauan, kun emme tiedä varmasti kaikkea, niin tilanne on hyväksyttävä. Tätä kirjoitettaessa fysiikan tutkimuksessa tiedostetaan selkeästi, että on paljon asioita, joita emme ymmärrä. Polttavimpia kysymyksiä ovat esimerkiksi pimeä energia ja pimeä aine.

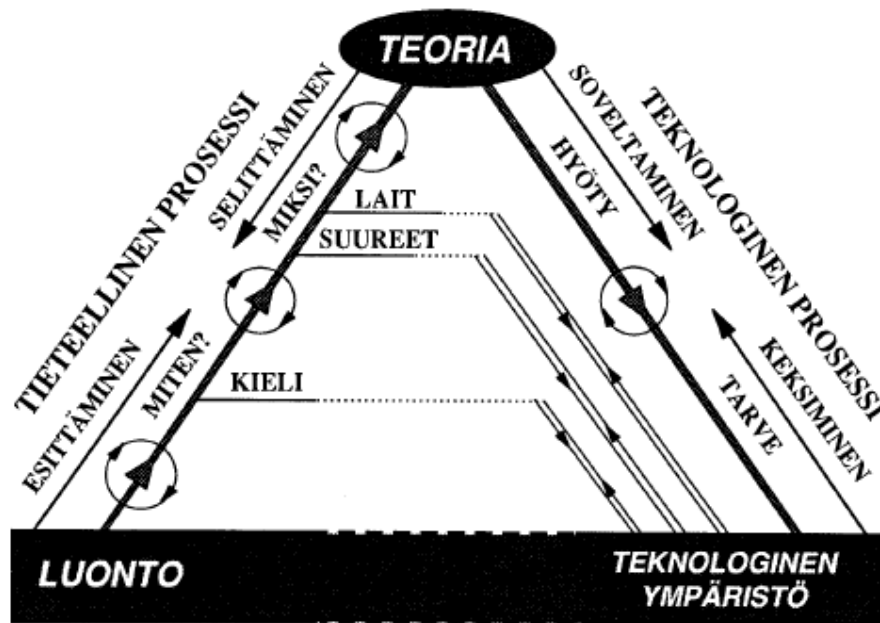
Teoreettisen lähestymistavan eräänä haittapuolena peruskoulutusta ajatellen Kurki-Suonio mainitsee ilmiön, jonka hän on nimennyt kaavataudiksi. Tällä hän viittaa siihen, että opiskelijat ovat oppineet erilaisiin fysikaalisiin tilanteisiin liittyviä matemaattisia kaavoja, mutta eivät lopulta ole syvemmin omaksuneet ja sisäistäneet fysikaalisen tilanteen luonnetta, sen empiriaa. Fysiikan opetuksen tulisi tähdätä siihen, että opiskelijat ymmärtävät luonnossa ja muussa ympäristössä esiintyviä ilmiöitä. Ymmärtämisen mittana Kurki-Suonio korostaa kykyä tunnistaa ilmiön tai tilanteen syntymisen perussyt ja muut siihen vaikuttavat tekijät. Hyvä koevastaus on

sellainen, jossa esimerkiksi sanallisesti kerrotaan nämä. Lisäksi todetaan, että kaavalla x voidaan laskea, tietyillä reunaehdoilla, tilanteeseen liittyvä tulos.

Esimerkkinä hän mainitsee kysymyksen: ”Mikä on Ohmin laki?”. Tyypillinen vastaus on $U=RI$. Tämä on Ohmin lakiin liittyvä kaava, mutta se ei vastaa kysymykseen mikä laki on. Kurki-Suonion huolena on fysiikan opetuksen ja sen myötä oppimistulosten kärsiminen sen seurauksena, että kaavat edustavat fysikaalista totuutta syvemmän ymmärryksen sijaan [6].

3.4 Tieteellinen ja teknologinen prosessi

Fysiikan erityispiirteisiin kuuluu sen vahva kytkös teknologisiin sovelluksiin. Tämän päivän länsimainen elämäntapa nojaa vahvasti erilaisiin teknisiin innovaatioihin. Tämän opinnäytteen aiheena oleva sähkömagnetismi on perustana suurelle osalle keskeisiä sovelluksia. Esimerkkeinä voisi mainita sähkömoottorin, elektroniset viestintävälineet, tietokoneen tai erilaiset laser-tekniikkaan perustuvat laitteet. Fysiikkaa tieteenä voi lähestyä tässä mielessä kahdella tavalla. Voi perehtyä olevaisen syvimpiin saloihin, avaruuden ja aineen ihmeellisyyksiin sekä kaikkeen siihen joka selittää miksi sitä mitä on, on. Toisaalta voi keskittyä miettimään, mitä kaikkea tunnetun fysiikan pohjalta voisi rakentaa, miten sitä voisi soveltaa ihmisen tarpeisiin. Kurki-Suonio jakaa nämä kaksi lähestymistapaa kahdeksi eri prosessiksi: tieteelliseksi ja teknologiseksi. Kaavio 3 havainnollistaa prosesseja.



Kaavio 3. Empiirisen tieteen perusprosessit. ([9], s. 145)

Molemmilla prosesseilla on selkeä suunta. Tieteellinen prosessi suuntautuu luonnosta teoriaan, teknologinen teoriasta luontoon. Kuvan ”teknologinen ympäristö” on tässä yhteydessä ymmärrettävä eräänlaiseksi luonnon laajennukseksi; se on osa sitä, vaikka onkin ihmisen tekemää. Tieteellinen prosessi on se, joka vertautuu oppimisprosessiin. ”Tieteellinen prosessi ... on empiirisen käsitteenmuodostuksen ydinprosessi” [8].

4 Pienoissähkömoottori

4.1 Mekaaninen rakenne



Opinnäytteessä käytetty sähkömoottori on niin sanottu pienoissähkömoottori, jota käytetään tyypillisesti leluissa. Työssä käytetyn mallin ulkohalkaisija on 21 mm ja rungon pituus 25 mm. Laitteen koko pituus on 40 mm. Moottorin nimellisjännite on 3 V, kierrosnopeus kuormittamattomana noin 15 000 rpm. Kyseessä on tasavirtamoottori.

Kuva 1. Opinnäytteessä käytetty pienoissähkömoottori.

Moottorin rakenne on yksinkertainen, minkä seurauksena hinta on tätä kirjoitettaessa euron – parin luokkaa. Laite on purettavissa helposti osiin; kokonaisuutta pitää koossa kaksi pientä taivutettua metalliliuskaa kotelon seinämän ja takaosan virroituspään yhtymäkohdassa.



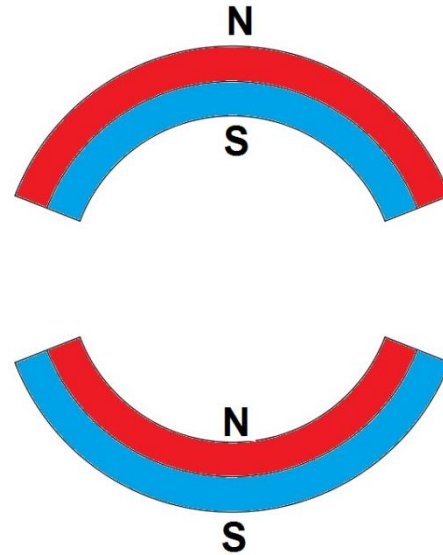
Kuva 2. Moottori purettuna.

Kuvan 2 osat ovat vasemmalta oikealle: teräksinen runko tai kotelo, jousi, kestopagneetit, roottori, virroituspään pohjalevy. Kun kestopagneetit ovat paikoillaan, ne muodostavat kotelon kanssa kokonaisuuden nimeltä staattori. Staattori viittaa staattisuuteen; moottorin tapauksessa kyse on siitä magneettisesta

osasta joka ei pyöri. Staattorin kaksi kestmagneettia ovat napaisuudeltaan päinvastaiset.



Kuva 3. Staattori.

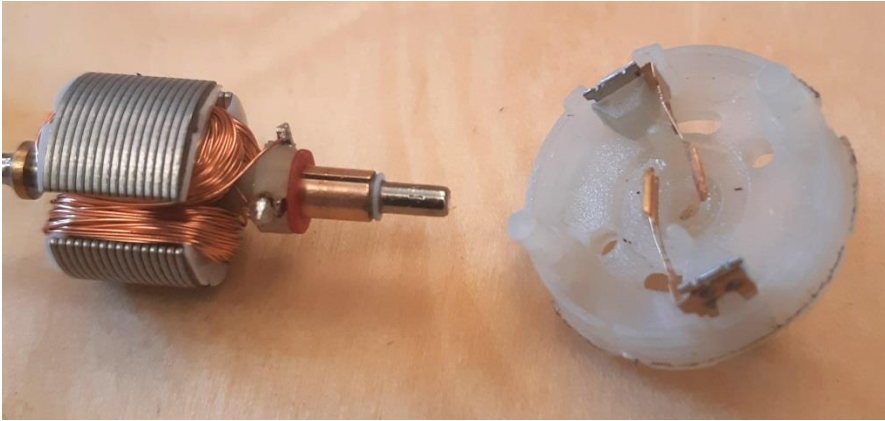


Kuva 4. Staattorin kestmagneettien napaisuus.



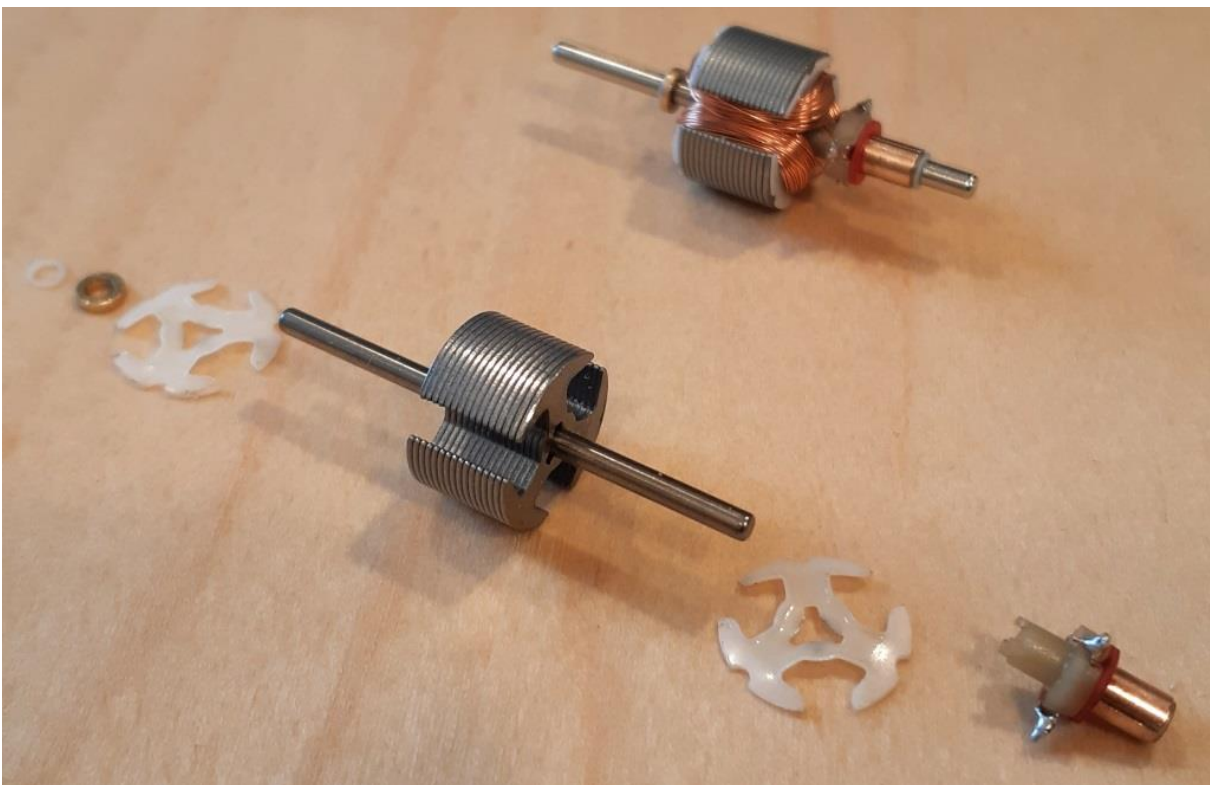
Kuva 5. Roottori.

Roottori on se osa, joka pyörii. Se koostuu akselista, ankkurikäimityksestä ja kommutaattorista. Ankkurikäänitys on kuvassa 5 keskellä oleva lankavyyhtimäinen osa. Kommutaattori on sen oikealla puolella. Käämilangat ovat juotetut sen liuskoihin.



Kuva 6. Kommutaattori ja virroituspään liukuharjat.

Kommutaattorin liuskat ovat kosketuksissa virroituspään liukuharjoihin. Niiden kautta käämitys saa sähkövirtansa. Virroituspäässä on kaksi harjaa, kommutaattorissa kolme liuskaa. Roottoria edelleen purettaessa rakenne paljastuu yksityiskohtaisemmin.



Kuva 7. Roottorin ankkuri.

Kuvassa 7 näkyy käämilankojen runkona toimiva niin sanottu ankkuri. Nimi tulee siitä, että sen poikkileikkaus muistuttaa hiukan perinteistä laivan ankkuria.

Kommutaattori on irtonaisena kuvan oikeassa alakulmassa. Käämilanka on emaloitua tai lakattua kuparia paksuudeltaan 0,2 mm. Käämejä on kolme, joissa jokaisessa on noin kaksi metriä lankaa. Kierroksia yhdessä käämissä on 65.

Kun ankkuri puretaan, ilmenee että se on koottu levyistä. Levyjen materiaali on yleensä magneettisesti ”pehmeää” rautaa. Levymäisen rakenteen keskeinen tehtävä on vähentää haitallisten pyörrevirtojen syntymistä moottorin pyöriessä [4]. Osat kiinnittyvät akseliin (halkaisija 2 mm) puristusvoiman avulla; osissa oleva reikä on aavistuksen pienempi kuin akselin läpimitta, joten kitka pitää ne paikoillaan.



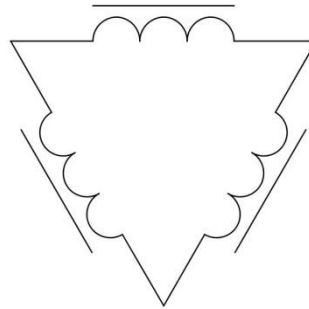
Kuva 8. Ankkuri purettuna.

4.2 Roottorin käämien sähköinen kytkentä

Käämien kytkentäkaavio on yksinkertainen.

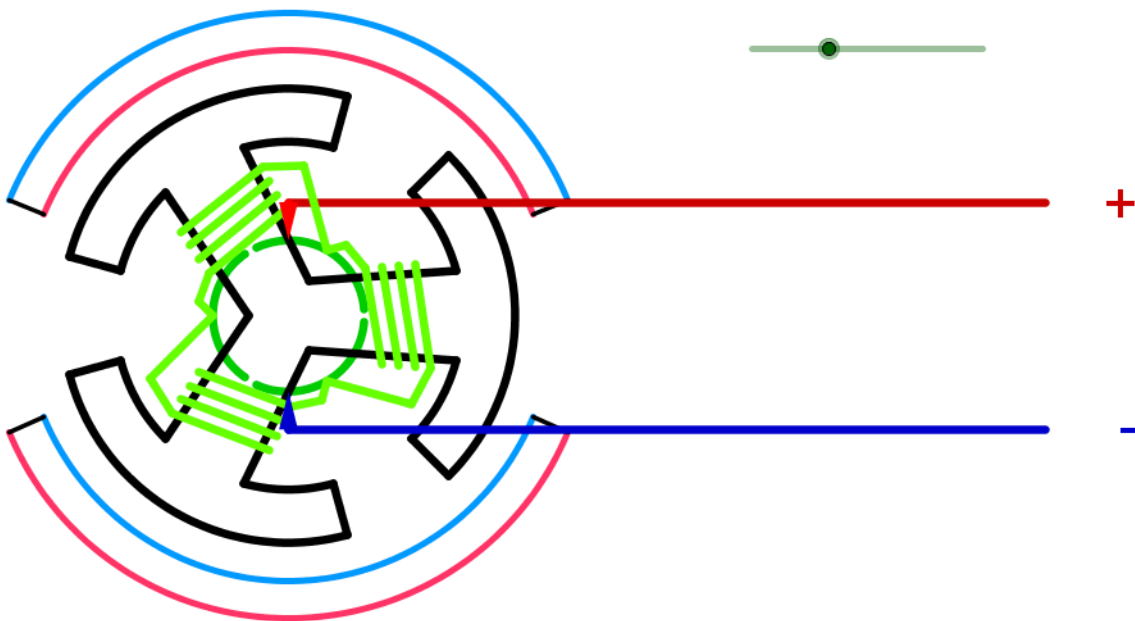


Kuva 9. Käämin tekninen piirrosmerkki.



Kuva 10. Käämien kytkentä.

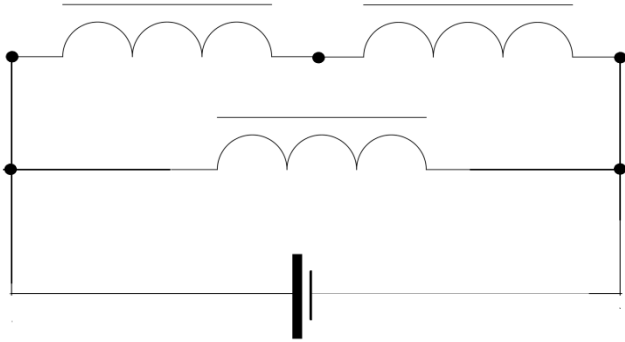
Seuraavassa kuvassa moottorista esitellään skemaattinen poikkileikkaus, jossa ovat näkyvillä toiminnan kannalta oleelliset sähköiset ja magneettiset osat.



Kuva 11. Skemaattinen kuva pienoissähkömoottorista.

Ulkokehältä lueteltuna kuvassa 11 ovat staattorin kestomagneetit, käämien ankkurirunko (musta), käämilangat (vaalea vihreä), kommutaattorin kolme liuskaa kehän muodossa (tumma vihreä) ja virroituspään kaksi harjaa, jotka ovat kontaktissa kommutaattoriin.

Kuvasta nähdään, että kommutaattorin kolmesta liuskasta vain kaksi on käytännössä jokaisessa roottorin asennossa kontaktissa virroitusharjoihin. Kytkentäkaavio näyttää silloin seuraavalta.



Kuva 12. Käämien kytkentäkaavio virtalähteen kanssa.

Kuvan 12 tilanteessa yhden käämin jännite on lähtökohtaisesti sama kuin virtalähteen. Kaksi muuta ovat sarjaan kytketyt ja jännite jakautuu niiden kesken. Sen lisäksi, että jännitteet jakautuvat edellä mainitulla tavalla, ovat käämien tuottamat magneettikentät eri suuntaisia. Suuremman jännitteen käämin kenttä on päinvastainen kahden muun kanssa. Moottorin käydessä käämeissä tapahtuu induktiota, minkä seurauksena jännitteet vaihtelevat käytännössä.

4.3 Roottorin ja staattorin magneettikentät

Roottorin tuottaman magneettikentän muoto saadaan näkyviin kytkemällä siihen sähkövirta ja asettamalla lähelle ferromagneettista jauhemaista materiaalia.

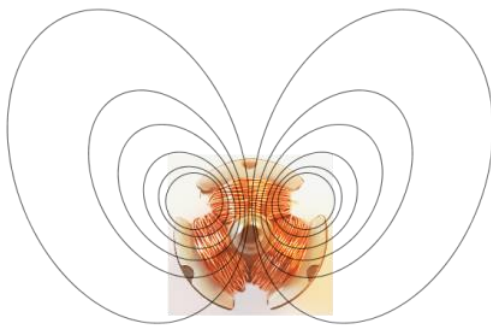


Kuva 13. Roottorin magneettikenttä.

Kuvan 13 tapauksessa kolmesta käämistä ylimmäinen saa täyden jännitteen, kaksi muuta vain puolet (roottori ei pyöri). Magneettikenttien visualisointia varten roottori asetettiin varta vasten valmistettuun muoviseen astiaan. Astia täytettiin parafiiniöljyllä ja siihen sekoitettiin rautaviilajauhoa, joka on valmistettu roottorin ankkurin metallista. Kuvassa roottorin

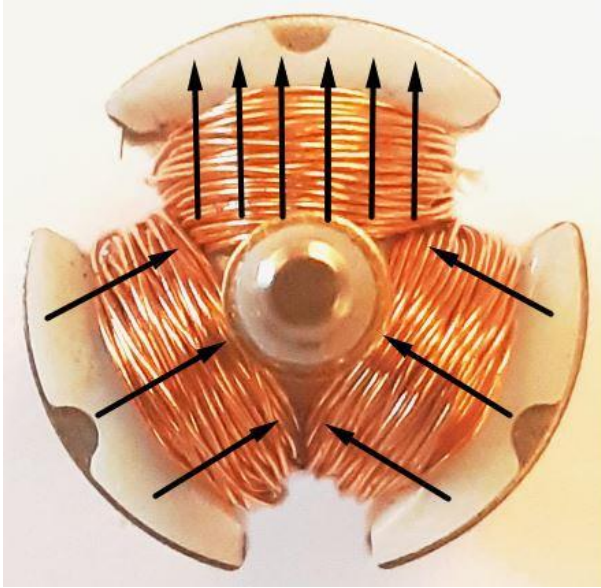
ympärillä näkyy putkimainen seinämä, joka erottaa sen öljystä. Käämeihin syötettiin

sähkövirtaa 24 voltin rengassydänmuuntajasta, jonka vaihtojännite tasasuunnattiin. Sähkövirtaa syötettiin noin sekunnin ajan. Tällöin saavutettiin riittävä sähkövirta ja riittävän voimakas magneettikenttä, jotta rautaviilajauho reagoi siihen. Käämien lämpeneminen sekunnin aikana oli huomattavaa, mutta kuitenkin sen verran vähäistä, että lankojen eristeet eivät saavuttaneet sulamispistettä. Seuraavassa kuvassa magneettikenttää on visualisoitu piirtämällä.



Kuva 14. Roottorin magneettikenttä piirrettyinä.

Kenttäviivoista on jätetty suuntaa osoittavat nuolet pois. Reaalisessa tilanteessa moottorin teräksinen kuori sieppaa ulomman kentän sisäänsä. Oleellinen asia moottorin toiminnan kannalta on se kenttä, joka on käämien sisällä. Kuva 15 havainnollistaa sitä.



Kuva 15. Magneettikenttä käämien sisällä.

Käämien sisällä magneettikenttä on solenoidinen, eli melko homogeeninen. Täyden jännitteen saavan käämin kenttä on voimakkuudeltaan lähtökohtaisesti kaksinkertainen kahden muun käämin kenttään verrattuna ja suunnaltaan päinvastainen.

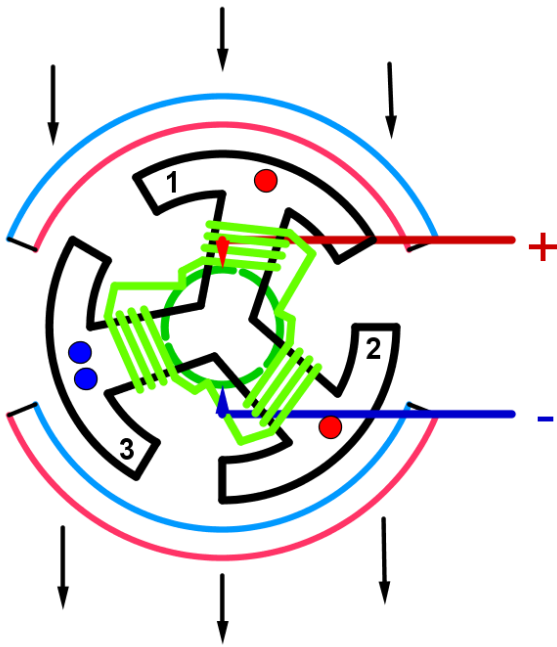
Kuva 16 havainnollistaa staattorin kenttää.



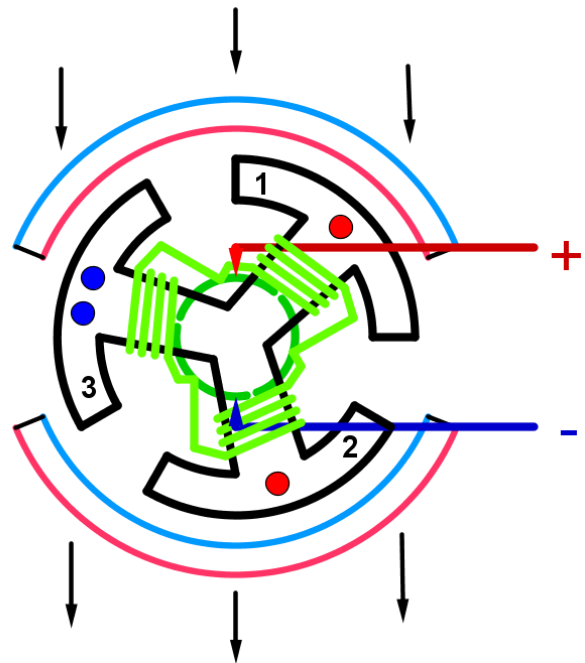
Kuva 16. Staattorin magneettikenttä.

Molemmat staattorin kestopagneetit on asetettu pienen putkimaisen astian ympärille siihen asentoon, kuin ne moottorin kotelossa ovat. Kestomagneetit näkyvät kuvassa puolikaaren muotoisina osina. Astiaan on laitettu laimennettua maalia, joka sisältää hienojakoista ferromagneettista jauhetta. Maalia nimitetään magneettimaaliksi, koska sillä maalattuun pintaan tarttuu magneetti. Maali ei kuitenkaan ole itsessään magneettista. Staattorin kenttä on varsin homogeeninen.

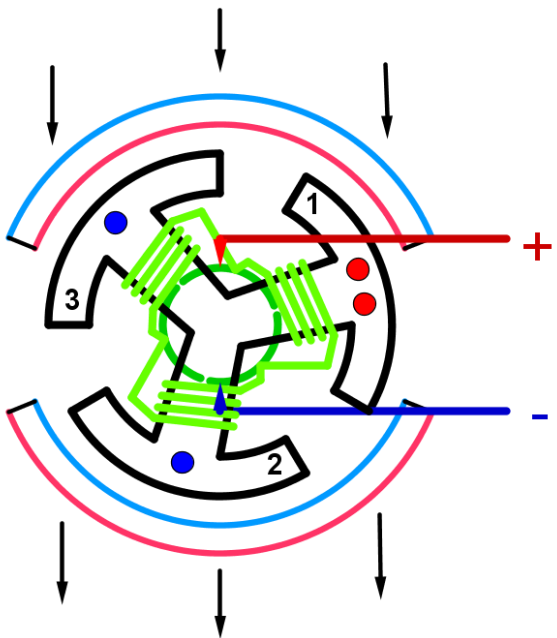
Kuvasarja 17 A – D havainnollistaa moottorin toimintaa yhden kolmasosakierroksen aikana.



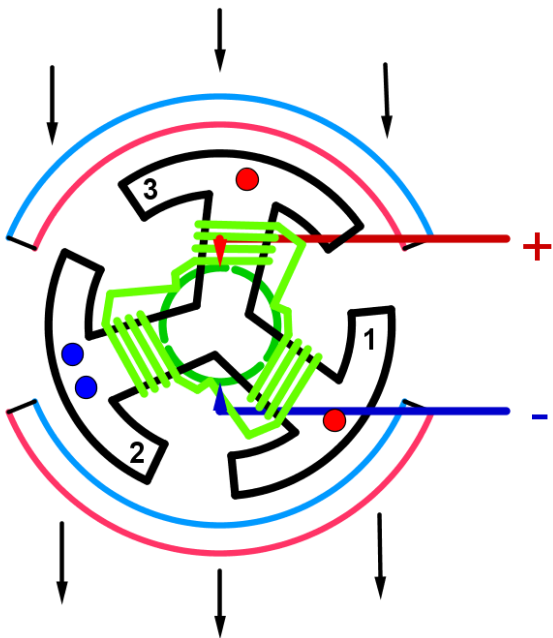
Kuva 17 A.



Kuva 17 B.



Kuva 17 C.



Kuva 17 D.

Kuvasarjassa staattorin magneettikenttää edustavat mustat nuolet. Ne on piirretty ulkopuolelle kuvan selkiyttämiseksi. Ankkurikäämit on numeroitu. Punaiset ja siniset täplät edustavat käämien magneettisia kohtioita. Kaksi täplää tarkoittaa kaksinkertaista vuontiheyttä.

Tilanteessa A havaitaan, että etenkin käämi numero 3 pyrkii kääntymään myötäpäivään ylemmän staattorimagneetin suuntaan. Käämit 1 ja 2 pyrkivät myös kääntymään myötäpäivään. Tilanteessa B kääntymistä on tapahtunut hiukan, mutta sähkövirta kulkee edelleen samojen kommutaattoriliuskojen kautta. Tilanteessa C sähkövirrat ovat muuttuneet. Käämin numero 2 magneettisuus kääntyy päinvastaiseksi, muissa tapahtuu voimakkuuden muutosta. Nyt erityisesti käämi 1 pyrkii myötäpäivään lähemmäs alempaa staattorimagneettia. Muut pyrkivät myös kääntymään myötäpäivään. Tilanteessa D sähkövirran syöttö on jälleen siirtynyt eri kommutaattoriliuskojen kautta tapahtuvaksi. Tilanne on sama kuin kohdassa A. Sykli A - D toistuu yhden roottorin kierroksen aikana kolme kertaa.

4.4 Pienoissähkömoottorin tutkimisen kytkeminen sisällölliseen etenemiseen

Opinnäytteen perusidea on kytkeä pienoissähkömoottorin empiirinen tutkiminen sähkömagnetismin opiskeluun. Tälle toiminnalle pyritään esittämään perusteet hahmottavan lähestymistavan mukaisesti. Kuten aiemmin todettua, moottori sisältää keskeiset sisällöt kurssin sisällöstä, poislukien sähkömagneettisen säteilyn. Sisällöt pitää saada näkyviksi ymmärrettävällä tavalla ja sopivissa kohdin kurssin etenemisen suhteen.

Kaavion 1 suhteen moottori voidaan ajatella sijoitettavaksi kokeellisen fysiikan puolelle. Se edustaa ilmiötä, jota tutkitaan kuten luonnonilmiötä. Kaavion 3 suhteen moottori sijoittuisi silloin sen luontevasta paikasta teknologisessa ympäristössä vasemmalle luontoa kohti. Toisaalta teknologinen ympäristökin on luontoon verrattavissa, se poikkeaa muusta ympäristöstä vain siinä suhteessa, että on ihmisen tekemää [8].

Kaavion 3 suhteen voidaan ottaa myös toisenlainen näkökulma: tutkitaan teknologista prosessia ”takaperin”, kuljetaan reittiä teknologisesta ympäristöstä teorian suuntaan. Tällöin voidaan tutkimuskysymykseksi asettaa ”miksi moottori on

tehty niin kuin se on tehty?” Kysymys on relevantti, koska on nähtävissä, että moottori toimii niin kuin sen on tarkoitus; se on omana entiteettinään onnistunut teknologinen sovellus. Se toimii sähköllä, joten on hyvin todennäköistä, että sillä on jotakin tekemistä sähkömagnetismin kanssa.

4.4.1 Didaktinen rekonstruktio

Kokeellisuudella on merkittävä rooli fysiikan opiskelussa. Sen avulla fysiikan ilmiötä voidaan tutkia konkreettisesti. Ajatuksena on, että kokeellisuuden myötä teoria ja käytäntö saadaan kohtaamaan, mikä on oppimisen kannalta hyödyllistä. On kuitenkin havaittu, että asiaan liittyy eräitä ongelmia. Opiskelijalle voi jäädä epäselväksi, miten suoritettava kokeellinen tutkiminen lopulta liittyy opiskeltavaan fysiikan teoriaan. Kokeellisuuden varsinainen idea saattaa hukkuu koelaitteiden ja annettujen ohjeiden alle, lopulta opiskelija tulee vain tehneeksi työtä käskettyä ilman sen syvempää ymmärrystä miksi [2].

Pienoissähkömoottori ei ole fysiikan opetukseen suunniteltu koelaitte, vaan aito arkipäiväisessä käytössä oleva fysiikkaan perustuva sovellus. Silti sitä voi ajatella käytettäväksi koelaitteena. Sen etuna on, että teorian kytkeytyminen sovellukseen on konkreettisesti läsnä. Moottori muistuttaa läsnäolollaan siitä, että arkipäiväisen laitteen toiminta perustuu sähkömagnetismiin.

Luonnontieteiden opetuksen tutkimuksessa tunnetaan käsite "didaktinen rekonstruktio", erityisesti saksalaisessa traditiossa. Tiivistetysti sanottuna sillä tarkoitetaan opetus- ja oppimistilanteeseen liittyvien elementtien uudelleen järjestämistä. Ajatuksena on analysoida, mitkä ovat opetuksellisesti merkittävät elementit ja konstruoida niistä tavoitteen mukainen opetusjärjestely [2].

Pienoissähkömoottorin tutkimisen liittäminen sähkömagnetismin opiskeluun on didaktinen rekonstruktio.

5 Moottorin tutkiminen sähkömagnetismin opetuksen yhteydessä

Tässä luvussa luodaan katsaus siihen, miten oppikirjassa Galilei 7 edetään kurssin sisällön suhteen. Katsaus käsittää kaksi lukua: Magnetismi ja Sähkömagneettinen induktio. Alalukujen otsikointi on sama, kuin kirjassa. Jokaisen alaluvun lopulla on kaksi osiota: Analyysi ja Moottorin tutkiminen. Analyysissa jäsennetään kirjan esille tuomia asioita hahmottavan lähestymistavan näkökulmasta. Moottorin tutkiminen keskittyy siihen, millä tavalla pienoissähkömoottori voidaan kytkeä esille tuotuihin asioihin.

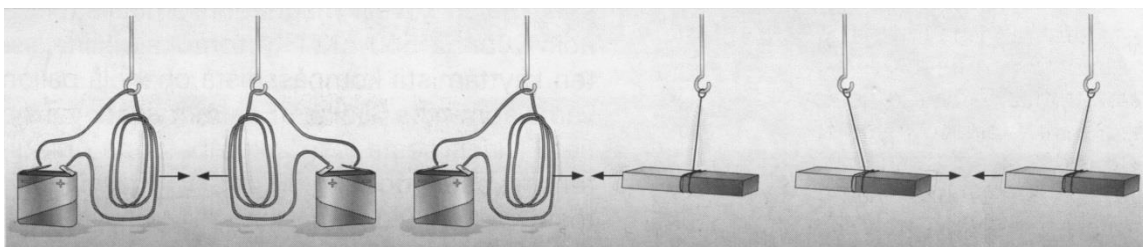
5.1 Magnetismi

5.1.1 Magneettisia ilmiöitä

Magnetismiin tutustuminen aloitetaan kirjassa Galilei 7 katsauksella historiaan.

Antiikin kreikkalaiset tiesivät malmikivet, joilla oli erikoinen ominaisuus: rautaesineet tarttuvat niihin. Kiinalaisilla oli käytössään lusikkakompassi, Euroopassa kompassi otettiin käyttöön myöhemmin. Historiatietona mainitaan Ørstedtin havainto sähkövirran vaikutuksesta kompassiin ja Amperen tutkimukset sähkövirtojen välisistä magneettisista vuorovaikutuksista.

Seuraavaksi esitellään magneettisia vuorovaikutuksia havainnollistavia yksinkertaisia koejärjestelyitä. Kuvat 18 ja 19 esittävät järjestelyt.

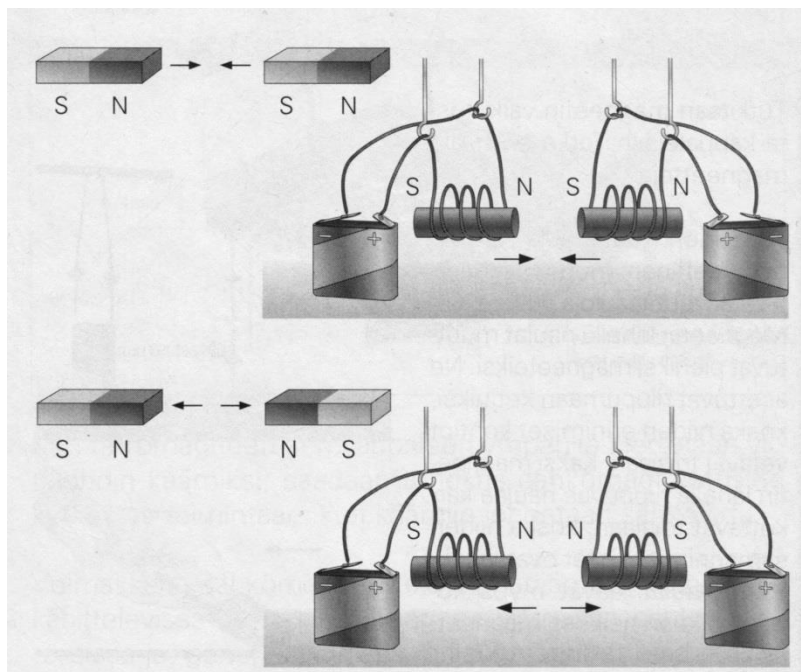


Kuva 18. Magneettiset oliot. ([10], s. 8)

Sauvamagneetti ja virtajohdin nimetään magneettisiksi olioiksi. Virtajohtimesta todetaan, että yksittäisenä sen magneettisuus on heikkoa. Siksi on hyödyllistä kietoa johdin useamman lenkin muotoiseksi. Tätä muotoa kutsutaan käämiksi. Järjestelyn avulla voidaan havaita lenkkien väliset voimavuorovaikutukset, lenkin ja magneetin väliset vastaavat, samoin kuin sauvamagneettien väliset. Vuorovaikutuksia on veto-,

poisto-, sekä vääntötyyppisiä. Todetaan, että vapaasti riippuva sauvamagneetti toimii kompassina.

Tutkimuksia jatketaan muotoilemalla käämiä hiukan erilaiseksi.



Kuva 19. Rautasydän käämissä ja kohtiot. ([10], s. 9)

Koe osoittaa, että rautasydämen työntäminen käämiin vahvistaa sen magneettisuutta. Samaten kierrosten lisääminen tai virran voimistaminen tuottaa enemmän magneettisuutta. Sähkövirran suunnan vaihtaminen muuttaa voimavuorovaikutuksen päinvastaiseksi. Näiden magneettisten olioiden päitä kutsutaan kohtioiksi; on etelä- ja pohjoiskohtio.

Kirjassa tehdään voimavuorovaikutusten suhteen vertaus moduulin 6 (Sähkö) käsitteeseen sähköinen dipoli. Dipolit vuorovaikuttavat samalla tavalla veto-, poisto-, sekä vääntötyyppisesti.

Aihepiirissä edetään tekemällä havainto sauvamagneetin ja ei-magneettisen objektin välillä. Rautanaulat tarttuvat magneetin kohtioon ripustumalla siihen ketjumaisesti. Toinen koe voidaan tehdä teräksisellä sukkapuikolla. Jos sitä sivellään magneetilla, se muuttuu itsekin magneetiksi. Sen ominaisuudet ovat samanlaiset kuin sauvamagneetin. Jos puikko katkaistaan, huomataan että molemmat osat ovat edelleen magneetteja, lyhyempiä vain.

Ilmiö nimetään magnetoitumiseksi. Raudan ominaisuuksiin kuuluu se, että magneettiin tarttuessaan se muuttuu itsekin magneettiseksi. Nikkelillä ja koboltilla on sama ominaisuus, ferromagneettisuus.

Kirjassa todetaan, että ferromagneettisen sauvan ympärille kiedottu virtajohdinkäämi tuottaa laitteen nimeltä sähkömagneetti. Sitä voidaan käyttää erilaisissa sovelluksissa, kuten sähkömoottorissa, dynamossa tai kaiuttimessa.

Analyysi

Kirjan osiossa ”Magneettisia ilmiöitä” liikutaan hahmottavan lähetymistävän näkökulmasta kaavion 2 ylimmässä laatikossa nro 1. Havaintoihin nojaten perushahmotetaan olioita, ilmiöitä ja ominaisuuksia. Niille annetaan nimiä ja niistä muodostetaan termejä. Esikvantifiointia edustaa käämin magneettisuuden riippuvuus käämin kierrosten lukumäärästä, sähkövirran suuruudesta ja suunnasta.

Analogia sähködipolin ja magneettisen dipolin välillä edustaa kaavion 1 suhteen yhtä kierrosta siinä mielessä, että teorian puolelta poimitaan olemassa oleva sähköstatiikan käsite ja tuodaan se magnetismin tutkimiseen koepuolelle mukaan. Kierros täydentyy teoriapuolelle luoden uuden käsitteen nimeltä magneettinen dipoli.

Sähkömagneetin nimeäminen ja sähkömoottorin liittäminen siihen voidaan nähdä kaavion 3 ”kieli” –nimisen polun kulkemisena luonnosta teknologiseen ympäristöön.

Moottorin tutkiminen

Ensimmäiseksi moottorista voidaan tehdä perushahmottavia havaintoja. Siinä on kotelo, jonka toisessa päässä on kaksi johdinta. Kun niihin kytkee pariston, moottorin toisessa päässä oleva akseli alkaa pyöriä. Jos paristo kytketään toisin päin, akselin pyörimissuunta vaihtuu myös. Moottorin vääntövoimaa voidaan tutkia sormenpäillä: kuinka voimakas puristus riittää pysäyttämään pyörimisen? Jos pariston jännitettä kasvatetaan, huomataan pyörimisnopeuden kasvu. Samoin vääntövoima kasvaa.

Seuraavaksi moottori voidaan purkaa ja tutkia mitä sen sisällä on.

Keskeisimmät havainnot ovat kaksi kaarevaa magneettia ja akselilla varustettu pyörivä osa, joka nimetään roottoriksi (ks. kuva 5). Magneetteja voidaan tutkia keskenään tai toisen magneetin avulla. Havaitaan, että ne eivät ole napaisuudeltaan samanlaiset, vaan päinvastaiset (ks. kuva 4). Magneettien olemassaolo laitteessa on luonteva peruste liittämällä moottori magneettisten olioiden joukkoon kuten kirjassa tehdään sauvamagneetille ja virtajohtimelle. Oliona moottori on jo ensi katsomalta selvästi monimutkaisempi kuin sauvamagneetti. Sitä ei ole syytä pitää haitallisena asiana, koska koko tulevan tutkimisprosessin ideana on selvittää miten olio toimii.

Pyörivässä osassa on hahmotettavissa käämimäisiä rakenteita yhteensä kolme erillistä, mutta samanlaista. Katsomalla voidaan havaita, että käämiä kiertää ohut kuparin värinen lanka. Kiertosuunta on jokaisessa käämissä sama. Käämin sisään ei näe, koska lanka peittää näkyvyyden. Langat näyttävät olevan jonkin teräksen värisen materiaalin ympärillä. Magneetilla voidaan todeta, että se tarttuu materiaaliin. Se on siten magnetoituvaa ainetta.

Yleismittarin avulla voidaan tutkia sähkönjohtavuutta roottorissa. Käämin johdinlankojen päät ovat kiinnitetyt kolmeen nastaan juottamalla. Juotoksen tekninen toteutus voi olla osalle oppilaista uusi asia, se on tarpeen selvittää tarvittaessa. Oleellista on tieto galvaanisesta yhteydestä langan ja nastan välillä. Nastojen vieressä on akselin ympärillä kolme liuskaa (kommutaattori). Mittarilla voidaan todeta sähköjohtavuus niiden ja nastojen välillä. Tarkastelu osoittaa, että jokaisesta nastasta ja liuskasta on galvaaninen yhteys jokaiseen muuhun. Sen sijaan akseliin ja teräsmateriaaliin sitä ei ole. Edelleen akselin ja teräsmateriaalin välillä on yhteys.

Kolmantena osana on muovinen pohjalevy, jossa kotelon ulkopuoliset virtajohtimet näkyvät jatkuvan kotelon sisällä metallisina liuskoina. Nimetään sisäpuoliset liuskat harjoiksi erotuksena akselin ympärillä olevista liuskoista. Asettamalla roottori pohjalevyyn havaitaan harjojen, joita on kaksi kappaletta, osuvan liuskoihin, joita on kolme kappaletta. Katsomalla nähdään, että harjat ovat pääasiassa kontaktissa aina kahteen liuskaan ja kolmas on ilman kontaktia.

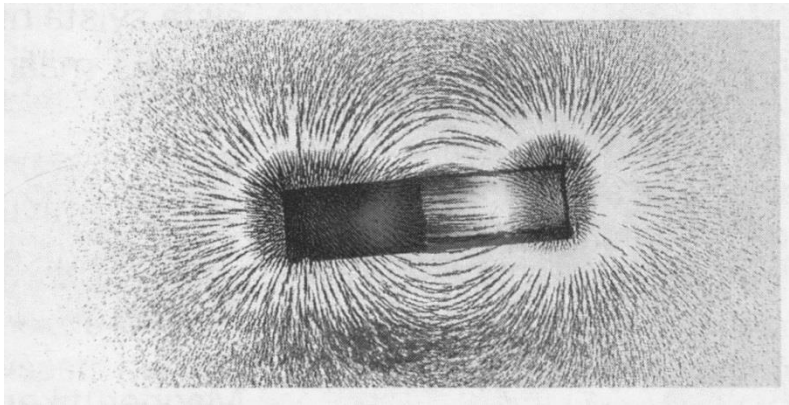
Kun pohjalevyn virtajohtimiin kytketään jännite, nähdään että osa ei lähde pyörimään. Sen sijaan havaitaan teräosissa magnetoitumista. Havaitaan myös, että magnetoituminen on erilaista eri osissa. Samoin päin asetettu magneetti kokee veto-,

tai poistovoiman riippuen osasta. Jos roottoria kiertää kolmasosakierroksen, tilanne pysyy samana. Käämit ovat vain vaihtaneet paikkaa (ks. kuva 17 A – D).

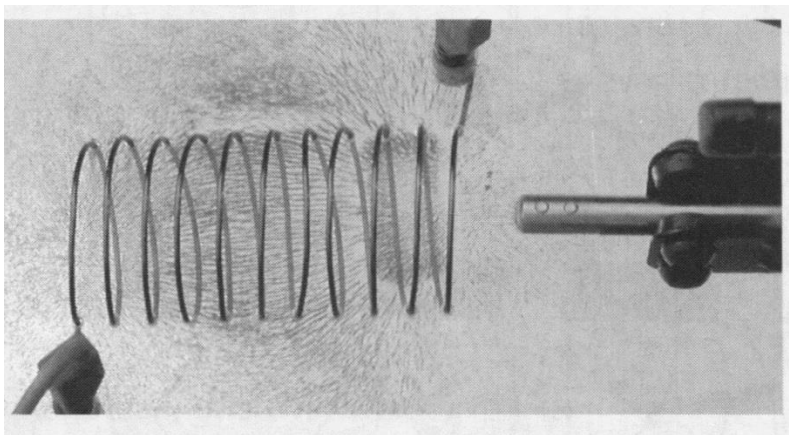
Edellä kuvailtua empiiristä tutkimusta voisi kuvailla moottorin toiminnan perushahmotukseksi. Opittavien asioiden suhteen moottorista tutkitaan ne samat, mitä kirjassakin. Moottorin käämit voidaan todeta sähkömagneeteiksi, mikä on kirjan alaluvun lopun antia sovelluksista puhuttaessa.

5.1.2 Magneettikenttä

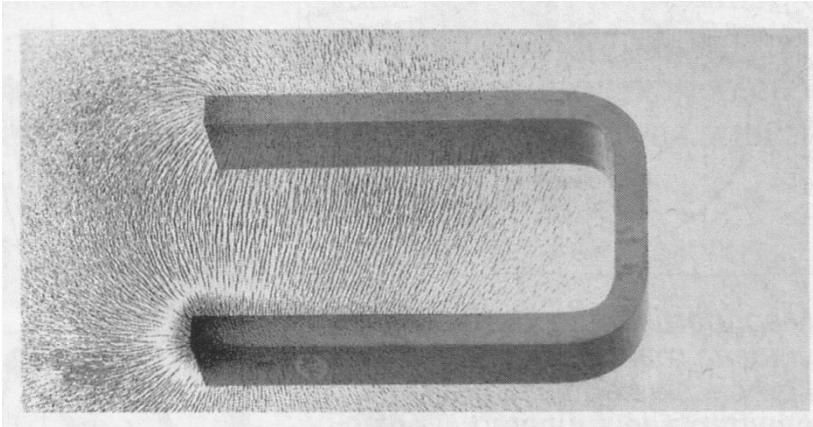
Magneettisen vuorovaikutuksen käsittelyä jäsennetään kirjassa ottamalla käyttöön magneettikentän käsite. Yksi magneettinen olio tuottaa ympärilleen kentän, johon toinen olio reagoi. Tällainen jäsennys on tuttua sähköstatiikasta ja mekaniikan gravitaatiovuorovaikutuksesta. Erilaisten magneettien kentän muotoa voidaan tutkia kompassin tai rautaviilajauheen avulla.



Kuva 20. Tankomagneetin kenttä. ([10], s. 13)

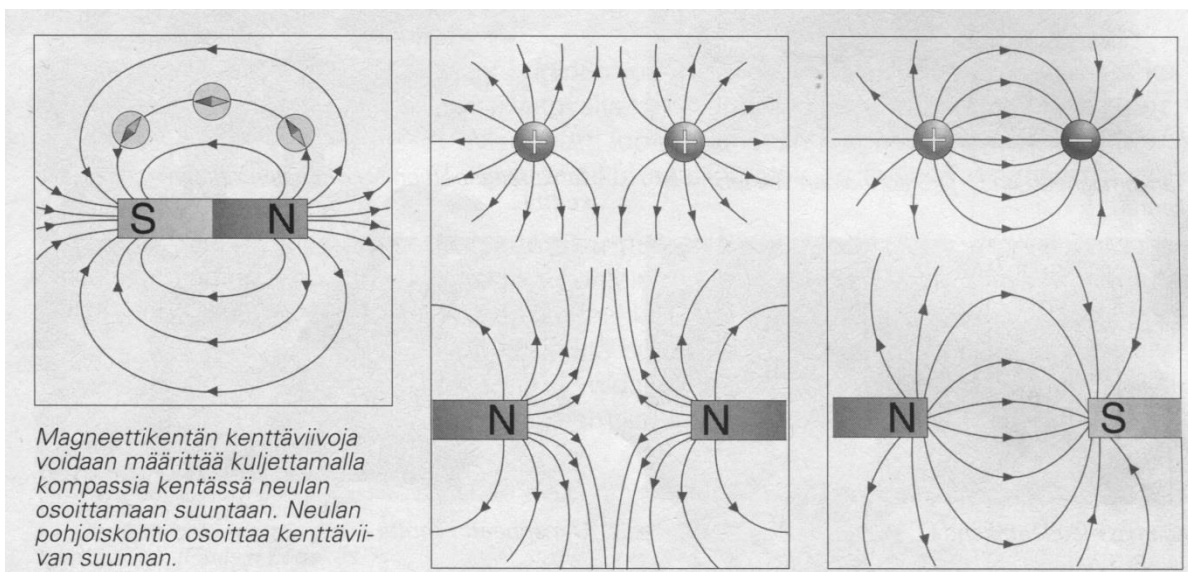


Kuva 21. Käämin kenttä. ([10], s. 13)



Kuva 22. U-magneetin kenttä. ([10], s. 13)

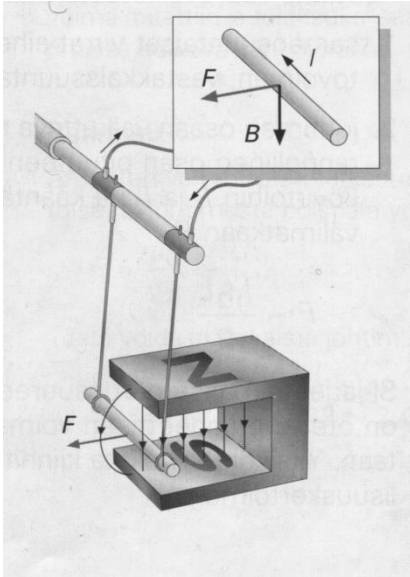
Kentän voimakkuutta kuvaava suure nimetään magneettivuon tiheydeksi B . Tässä vaiheessa sitä ei tarkastella sen enempää. Kenttäviivaesitys noudattaa sähköstatiikasta tuttuja sääntöjä. Kentän paikallinen voimakkuus korreloi viivojen tiheyden kanssa.



Kuva 23. Magneettikentän ja sähkökentän kenttäviivaesitys. ([10], s. 14)

Seuraavaksi tutkitaan magneetin ja suoran virtajohtimen välistä vuorovaikutusta. On jo todettu, että virtajohdin kääntää magneettia, mutta miten magneettikenttä vaikuttaa virtajohtimeen? Avuksi otetaan u-muotoinen magneetti, jonka muodostama kenttä on kohtioiden välillä lähes homogeeninen. Kokeella havaitaan, että virtajohtimeen kohdistuu voima, joka on kohtisuorassa sekä magneettikenttää,

että sähkövirran kulkusuuntaa vastaan. Edelleen todetaan, että voima kasvaa, jos sähkövirta suurenee tai kenttä voimistuu.



Kuva 24. Virtajohdin magneettikentässä. ([10], s. 15)

Tämän havainnon jälkeen kerrotaan, että Biot ja Savart päätyivät tutkimuksissaan suoran johtimen tuottavan magneettikentän, jonka voimakkuus on kääntäen verrannollinen etäisyyteen johtimesta: $B \sim \frac{1}{R}$. Kenttäviivat ovat johdinta kiertäviä ympyröitä johtimen normaalitasossa. Toisena tietona mainitaan Amperen tutkimukset kahden suoran virtajohtimen välisten voimien suhteen. Todetaan niiden olevan riippuvainen johtimien etäisyydestä, pituudesta ja niissä kulkevista virroista. Amperen laki esitellään kvantitatiivisesti:

$$F = \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \frac{I_1 I_2}{R} L$$

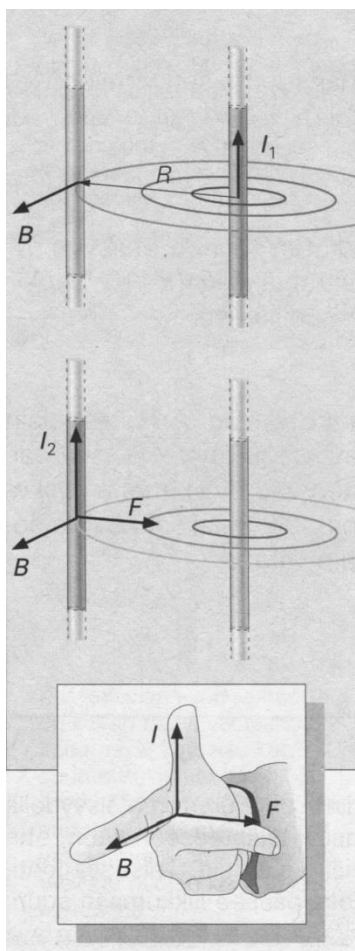
missä μ_0 on tyhjiön permeabiliteetti ja L johtimen pituus. Tämän jälkeen esitellään Biot-Savartin laki kvantitatiivisesti:

$$B = \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \frac{I_1}{R}$$

Näistä konstruoidaan yhtälö nimeltään ”Magneettikentän aiheuttaman voiman laki”:

$$F = I_2 B L$$

Laki ilmaisee, millä voimalla magneettikenttä vaikuttaa sitä vastaan kohtisuoraan virtajohtimeen. Kuva 25 havainnollistaa tilannetta.



Kuva 25. Virtajohtimet, magneettikenttä ja voimat. ([10], s. 18)

Kirjan alaluvun lopulla esitellään nk. Amperen malli, jonka mukaan kaikki magneettisuus perustuu pohjimmiltaan sähkövirtaan. Aineessa on atomiydintä ”kiertävien” elektronien muodostamia alkeisvirtasilmukoita.

Ferromagneettisissa aineissa nämä ovat järjestäytyneet isommiksi kokonaisuuksiksi, joita voidaan kutsua alkeismagneeteiksi.

Lisäksi todetaan, että tankomagneetin ja pitkän käämin magneettikentät ovat samanmuotoiset. Aiemmin mainittujen kohtioiden suhteen todetaan, että ne ovat näennäisiä napoja, koska magneettikenttä jatkuu olion sisällä katkeamattomana sulkeutuvana kenttäviivana. Kenttäviivoilla ei ole päätepistettä, toisin kuin sähköstatiikassa.

Analyysi

Magneettikentän käsite otetaan käyttöön yleistyksenä aiemmin omaksutuista kenttäkäsitteistä. Kaavion 1 suhteen käydään teoriapuolella ja palataan kokeelliselle. Käsitettä käytetään jatkossa tehtävän empiirisen tutkimisen apuna. Kenttien muotojen tutkiminen on kaavion 2 laatikon 1. mukaista perushahmotusta. Kentän voimakkuuden nimeäminen tässä vaiheessa magneettivuon tiheydeksi on hahmottavan lähestymistavan periaatteista hiukan poikkeava. Se tuodaan esiin ilmoitusasiana, johon palataan myöhemmin tarkemmin. Sitä voisi kutsua ehkä suureen perushahmotukseksi.

Aiheessa eteneminen tapahtuu empiiristen kokeiden avulla (suora virtajohdin ja magneetti). Empiirisiä kokeita edustaa myös muiden historian aikana tekemät kokeet (Biot-Savart, Ampere). Amperen laki edustaa kvantifointia, se luo uuden suureen

(permeabiliteetti μ) ja kiinnittää sen arvon tyhjiössä. Biot-Savartin laki edustaa myös kvantifiointia luomalla suureen magneettivuon tiheys B ja sen merkityksen lain käyttöalueella. Kaaviossa 2 siirrytään laatikoihin 2 ja 3. Kaavion 1 kannalta Amperen laki tuo teoriapuolelle uuden suureen μ , jonka jälkeen palataan kokeelliselle puolelle hyödyntäen sitä Biot-Savartin lain luomisessa. Kierros täydentyy teoriapuolelle uuden lain ja suureen B myötä.

Amperen lain konstruointi noudattaa hahmottavan lähestymistavan erästä oleellista sääntöä: suureen määrittelyprosessi kertoo myös sen, miten suure voidaan mitata. Yhtälö nimeltä Magneettikentän aiheuttaman voiman laki luodaan matemaattisen päättelyn myötä edellä mainituista laeista.

Alaluvun lopulla esitelty Amperen malli edustaa kaavion 2 prosessia nimeltä strukturointi. Tarkoituksena on esitellä selittävä malli aiemmin havaituille ilmiöille yleisellä teorian tasolla. Malli perustelee sen, miksi magneettiset kenttäviivat ovat aina sulkeutuvia käyriä ja miten magneetin kohtiot ovat näennäisiä napoja.

Moottorin tutkiminen

Moottorin toiminnan ymmärtämiseksi on hyödyllistä havainnollistaa sekä roottorin, että staattorin muodostamat magneettikentät. Tämä voidaan tehdä perinteisellä tavalla rautaviilajauheen tai vastaavan ferromagneettisen aineen avulla (ks. kuvat 13 ja 16).

Kytkemällä sähkövirta roottoriin pohjalevyn kautta, kuten edellisessä tarkastelussa tehtiin, havaitaan kuvassa 13 ylimmästä käämistä lähtevät kenttäviivat, jotka kulkeutuvat molempiin alempiin käämeihin. Roottorissa on siten yksi erimerkkinen kohtio, kaksi muuta ovat keskenään samanmerkkiset. Tutkimusta varten roottorille täytyy järjestää sopivan muotoinen matala astia, johon laitetaan muutama milli parafiiniöljyä helpottamaan rautaviilajauheen liikkumista. Roottorin ympärillä tulee olla seinämä, joka eristää sen öljystä.

Staattorin kentän muodon tutkiminen on helpompi järjestää. Tarvitaan sopivan paksuinen muovinen putkenpätkä pohjalla varustettuna. Staattorin magneetit asetetaan sen ympärille. Öljyssä olevan ferromagneettisen aineen on syytä olla hienojakoista, koska dimensiot ovat pienet. Koe havainnollistaa kestomagneettien

välissä olevan kentän homogeenisen muodon. Kirjaa mukailten voidaan päätellä, että kenttäviivat jatkuvat roottorin sisällä kuvan 14 esittämällä tavalla. Edelleen voidaan erikseen hahmottaa käämien sisällä olevien kenttien muotoa kuvan 15 tapaan.

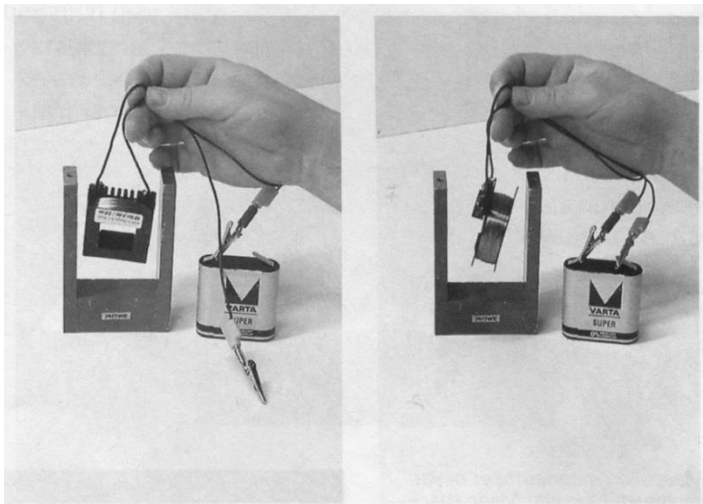
Käämitys toimii kolmen yhteen kytketyn sähkömagneetin tavoin. Tällöin palataan ajatuksissa kirjan aiempaan alalukuun, jonka lopussa esiteltiin sähkömagneetti. Moottorissa se on konstruoitu hiukan toisin. Kolmen erillisen magneetin sijasta voisi myös ajatella, että kyseessä on yksi sähkömagneetti, joka haarautuu keskeltä muodostaen toiseen päähän kaksi kohtiota.

Moottorin toiminnan ymmärtämisen suhteen sen osien tuottamien magneettikenttien visualisointi voidaan ajatella perushahmottavaksi tutkimiseksi. Eräs idea voi jo tulla ymmärryksen piiriin; moottorin pyöriminen liittyy siihen, että magneettiset kohtiot staattorissa ja roottorissa hakeutuvat toisiaan kohti. On myös mahdollista, että ilmenee myös poistovoimaa. Ehkä molempia yhtäikää.

Kaavion 3 teknologisen prosessin ”takaperin” läpikäymisen suhteen edetään hiukan. Kysymykseen ”miksi moottori on tehty niin kuin se on tehty” saadaan vastaus: ilmeisesti sen toiminnan kannalta on järkevää konstruoida kolmetahoinen sähkömagneetti.

5.1.3 Käämi magneettikentässä

Alaluku aloitetaan empiirisellä kokeella ripustamalla käämi u-magneetin sisään homogeeniseen magneettikenttään.



Kuva 26. Käämi magneettikentässä. ([10], s. 22)

Kokeessa havaitaan, että käämi pyrkii kääntymään kun siihen kytketään sähkövirta. Todetaan, että siihen vaikuttaa vääntövuorovaikutus. Käämi pyrkii kääntymään siihen asentoon, jossa magneetin ja käämin kentät ovat samansuuntaiset. Vääntö on eri vahvuista riippuen magneetin ja käämin kenttien välisestä kulmasta. Vääntö on voimakkaampi, jos magneetti on voimakkaampi. Sähkövirran suunnan vaihtaminen vaihtaa vääntövoiman suunnan. Sähkövirran lisääminen vahvistaa vääntöä. Jos koeasetelmaan lisättäisiin akseli, jonka ympäri käämi kääntyy, vääntömomentti voitaisiin mitata. Ilmiötä verrataan sähköstatiikasta tuttuun dipolimomenttiin. Kokeesta poimitaan erikseen tarkasteltavaksi käämin asennon suurin vääntömomentti ja todetaan sen olevan verrannollinen magneettivuon tiheyteen:

$$M_{max} \sim B$$

Tämä tarkennetaan muotoon

$$M_{max} = mB$$

missä m on käämille ominainen magneettimomentti.

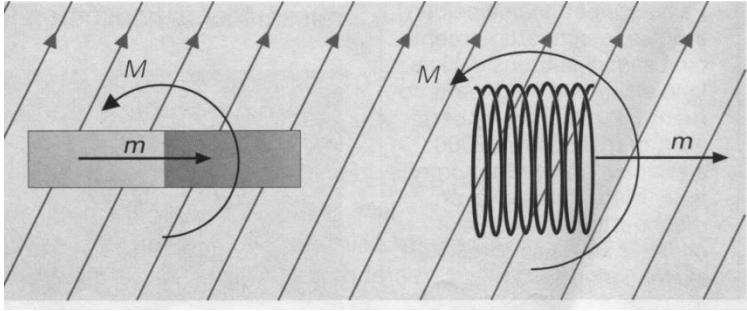
Havainnoista konstruoidaan yhtälö nimeltä Magneettisen väännön laki:

$$M = -mB \sin \alpha$$

missä α on käämin poikkeama tasapainoasemasta. Koetta jatketaan toteamalla, että jos se tehtäisiin tarkasti, niin havaittaisiin käämin magneettimomentin olevan verrannollinen käämissä kulkevaan sähkövirtaan, silmukoiden lukumäärään ja käämin pinta-alaan. Yhtälömuodossa tämä esitetään kvalitatiivisesti:

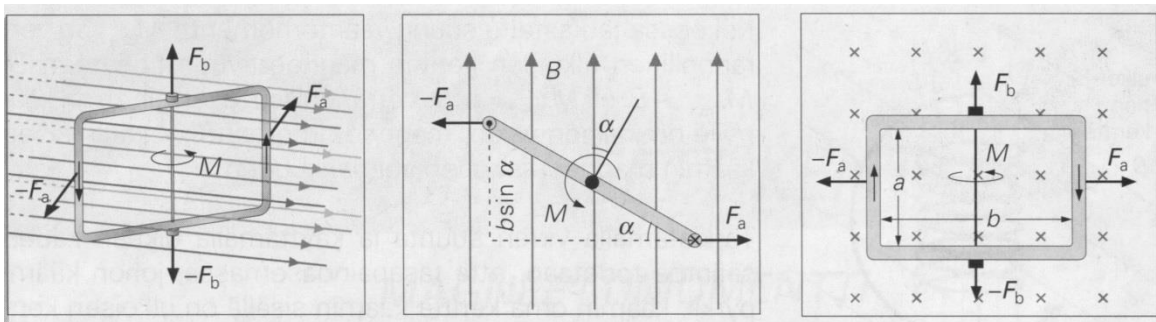
$$m \sim NIA$$

missä N on silmukoiden lukumäärä ja A on käämin pinta-ala. Kuva 27 havainnollistaa tilannetta.



Kuva 27. Käämi magneettikentässä skemaattisesti. ([10], s. 23)

Momenttia tarkastellaan aiempaan tietoon nojaten seuraavan kuvaryhmän avulla.



Kuva 28. Nelikulmainen käämi magneettikentässä. ([10], s. 24)

Momentin määrittelyssä hyödynnetään Amperen ja Biot-Savartin laeista johdettua yhtälöä $F = I_2LB$. Kuvan tapauksessa yhtälö muuttuu muotoon $F_a = IaB$.

Mekaniikan oppien avulla päätellään momentiksi

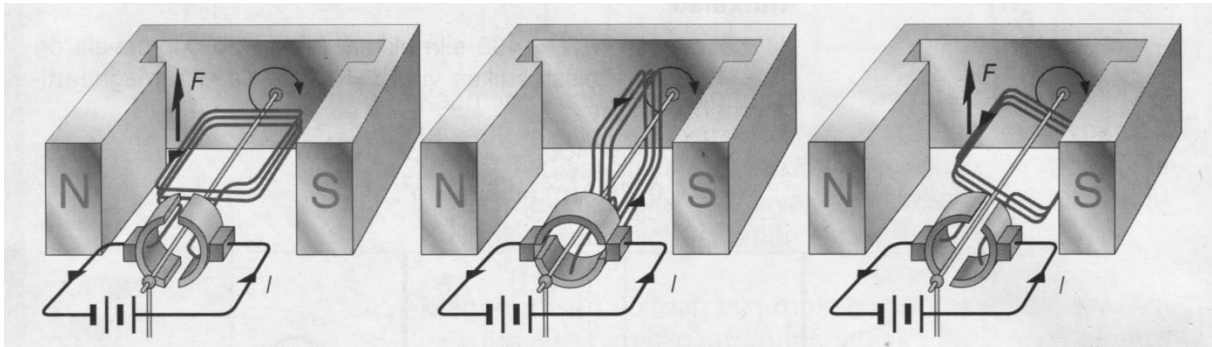
$$M = -F_a b \sin \alpha = -abIB \sin \alpha = -AIB \sin \alpha$$

missä A on käämin pinta-ala. Kuvassa on vain yksi silmukka, mutta jos niitä olisi useampia, momentti kasvaisi suoraan verrannollisesti. Käämin magneettimomentiksi päätellään siten

$$m = NIA$$

Käämin pinta-alan merkitys momenttiin yleistetään koskemaan kaiken muotoisia käämejä.

Tästä tutkimuksesta siirytään esittelemään tasavirtasähkömoottorin toiminnan yksinkertaistettua periaatetta kuvan avulla.



Kuva 29. Tasavirtamoottorin periaatekuva. ([10], s. 26)

Kuvassa esiintyy neliskulmainen käämi kuten aiemmassa tutkiskelussa. Uutena asiana on käämiin liitetty virran suunnan vaihtaja liukukytkimillä toteutettuna, eli kommutaattori.

Analyysi

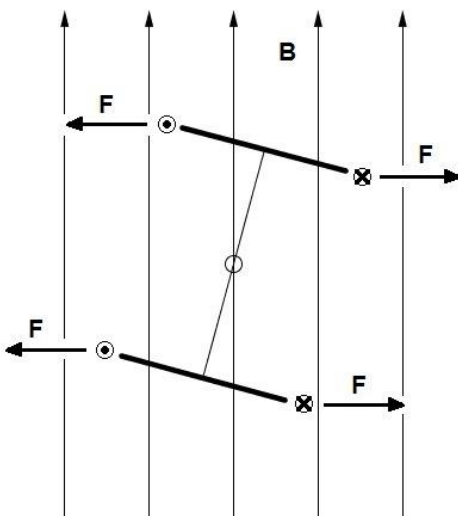
Magneettimomentin tarkastelu aloitetaan hahmottavalle lähestymistavalle uskollisesti empiirisillä kokeilla ja niistä tehtävillä havainnoilla. Osittain kokeet ovat ajatuskokeita: käämille kuvitellaan akseli ja todetaan, että sen avulla momentti M voitaisiin mitata. Käämille ominainen magneettimomentti luodaan käsitteellisesti analogiana sähköstatiikan dipolimomentille. Yhtälö nimeltä Magneettisen väännön laki konstruoidaan aluksi puuttellisesti siinä mielessä, että käämin magneettimomentti m on vielä kvantitatiivisesti määrittelemättä. Siten yhtälö edustaa esikvantifointia. Vasta yksinkertaisen neliskulmaisen käämin mekaanisiin ominaisuuksiin perehtyminen aiemman tiedon valossa tuottaa magneettimomentille kvantitatiiviset perusteet ja sen myötä myös Magneettisen väännön laille.

Sähkömoottorin toiminnan peruseriaatteiden esittely voidaan nähdä kaavion 3 teknologisen prosessin läpikäymisenä. On olemassa riittävä teoreettinen ymmärrys, jota voidaan soveltaa moottorin muodossa.

Moottorin tutkiminen

Tässä vaiheessa moottorin tutkimisella on mahdollisuus tuottaa uutta ja monipuolista näkökulmaa teoreettisesti opittuun. Ensivaikutelma kirjan kuvan yksinkertaistetusta tasavirtamoottorista on erilainen kuin todellisesta tutkittavasta moottorista. Käämejä on kolme yhden sijaan ja ne ovat eri asennossa akselin suhteen kuin yksinkertaistetussa mallissa. Yhteisiäkin asioita on. Staattorin magneettikenttä on homogeeninen, kommutaattori koostuu liuskoista jotka ovat kytketyt käämin lankojen päihin. Virran suunnan kääntymisen idea näkyy selkeästi. Jos kuvan 29 periaatemoottori olisi todellinen, sen ongelmana olisi käyntiin lähteminen. Luultavimmin kävisi niin, että käämi pyörähtäisi tasapainoasemaansa ja jäisi siihen. Roottori tarvitsisi vähintään vauhtipyörän, jotta liike jatkuisi tasapainoaseman ylitse. Kuormitettaessa moottori juuttuisi silti edelleen herkästi samaiseen asentoon. Moottorin ominaisuuksista puuttuu sitkeä kyky tuottaa vääntöä tilanteessa kuin tilanteessa.

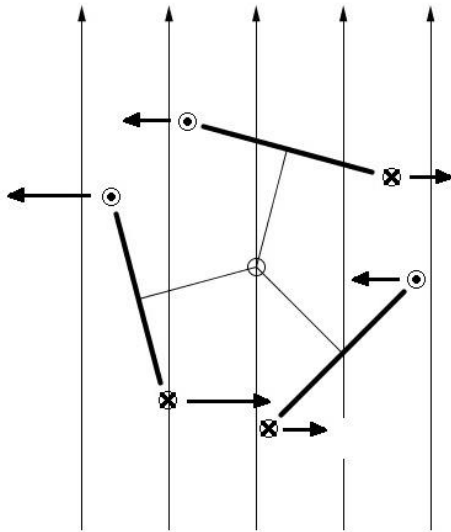
Pienoissähkömoottorin toiminnan hahmottamiseksi voidaan ottaa kaksi askelta, jotka ovat kuvan 28 (keskimmäinen kuva) muunnelmia. Käytetään edelleen nelikulmaista yhden kierroksen käämiä, mutta siirretään se pois akselilta. Samalla lisätään toinen käämi kuvaan akselin toiselle puolelle.



Kuva 30. Kaksi käämiä magneettikentässä.

Kuvaa tutkimalla voidaan geometrian avulla selvittää akseliin kohdistuvan vääntömomentin muodostuminen. Hahmottamisessa on konkreettisesti mutka, koska virtajohtimen kokema voima kulkeutuu akselille 90 asteen kulman kautta. Mekaniikasta tutulla tavalla voimavektorin alkupisteestä voidaan piirtää viiva akselille ja trigonometrian avulla hahmottaa vääntömomentti.

Toisena askeleena kuvaan lisätään kolmas käämi.



Kuva 31. Kolme käämiä magneettikentässä.

Tarkastelu on edelleen kvalitatiivinen, mutta muodostaa relevantin kuvan pienoissähkömoottorin toiminnasta. Aiempien kaavioiden ”tasapainoloukku” on pois ja akseliin kohdistuu jatkuva vääntömomentti. Kolmen käämin tilanteessa roottorille ei pääse syntymään tasapainoasemaa, koska kommutaattori kääntää silmukoissa kulkevan virran suunnan aina sellaiseksi, että vääntömomentti on olemassa.

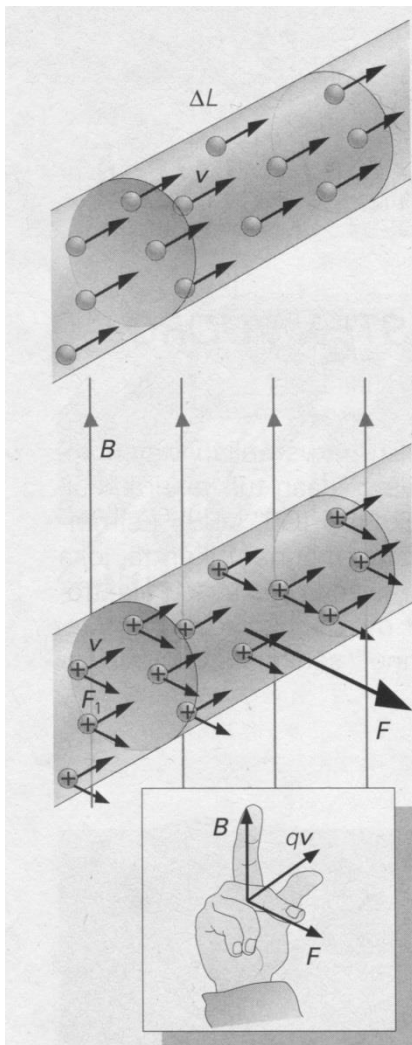
Teknologinen prosessi etenee taas askeleen. Tällä kertaa aiemmin hahmotettu täydentyy ja täsmentyy. Syntyy perustelu kolmelle käämille.

Kaavion 1. kannalta moottorin toiminnan hahmottuminen tekee kierroksen teorian puolelle ja takaisin palataan Magneettisen väännön lain kanssa. Toisena merkittävänä tietona on käämin magneettimomentin riippuvuus lankojen kierroslukumäärästä: $m = NIA$. Se tuo perustelut sille, miksi käämilankaa on paksusti, itse asiassa melkein niin paljon kuin vain ankkuriin mahtuu. Samalla voi herätä kysymys siitä, miksei lanka ole ohuempaa, koska silloin sitä mahtuisi vielä enemmän. Vastauksen voi päätellä magneettimomentin yhtälöstä, siinä esiintyy virtasuure. Jos lanka olisi ohuempaa, sen resistanssi olisi suurempi. On syytä olettaa, että laitteen valmistaja on miettinyt ja optimoinut kierrosmäärän ja virran välillä, jotta moottori olisi mahdollisimman toimiva.

Viimeksi mainittu kysymys pohdintoineen on hyvä esimerkki opinnäytteen perusidean motiiveista. Pienoissähkömoottori sisältää informaatiota enemmän, kuin ensinäkemältä voisi ajatella. Siksi se voi olla hyödyllinen muuhun opiskeluun kytkettynä tavoilla, joita voi olla vaikea muuten helposti organisoida.

5.1.4 Hiukkanen magneettikentässä

Alaluvun alussa tuodaan esiin sähkövirran yksinkertaistettu malli varauksenkuljettajien liikkeenä. Liikkuvat varaukset, elektronit, nimetään magneettisiksi olioiksi. Kokeena esitellään elektronisuihku katodiputkessa ja sen taipuminen magneetin vaikutuksesta. Kokeesta nähdään, että magneettikenttä vaikuttaa elektroneihin voimalla, joka on kohtisuorassa sekä kenttää, että suihkua vastaan.



Kuva 32. Liikkuvaan varaukseen vaikuttava voima. ([10], s. 28)

Sähkövirta tulkitaan siten, että virtajohtimen osassa pituudeltaan L on N kappaletta liikkuvia varauksia q , joilla on kaikilla sama nopeus v . Tällöin johtimessa kulkeva sähkövirta I on

$$I = N \cdot \frac{q}{t} = Nq \cdot \frac{v}{L}$$

missä $t = \frac{L}{v}$ on aika, jonka kuluessa kaikki N hiukkasta kulkevat johtimen poikkipinnan läpi. Yhtälö saadaan muotoon $IL = Nqv$. Aiemmasta yhtälöstä nimeltä ”Magneettikentän aiheuttaman voiman laki” konstruoidaan toisenlainen sijoittamalla tulos siihen.

$$F = ILB \quad \rightarrow \quad F = NqvB$$

Tästä päätellään, että magneettikenttä vaikuttaa yksittäiseen hiukkaseen voimalla

$$F = qvB$$

Seuraavaksi esitellään Hallin ilmiö, jossa virtajohdin polarisoituu magneettikentässä. Sen sovelluksena mainitaan magneettivuon tiheyttä mittaavat teslamittarit.

Homogeenisessa magneettikentässä etenevien vapaiden hiukkasten liikeradan muodoksi saadaan mekaniikan lakien avulla ympyrä. Tätä hyödynnetään sovelluksessa nimeltä massaspektrografi, jolla voidaan tutkia aineen koostumusta. Toisena sovelluksena mainitaan syklotroni, jolla hiukkasia voidaan kiihdyttää suuriin nopeuksiin. Yleisenä seikkana tuodaan esiin, että hiukkassuihkuja voidaan ohjata magneettikentän ja sähkökentän avulla.

Analyysi

Kaavion 1. suhteen osiossa tehdään ensin pelkistys sähkövirrasta varauksenkuljettajien liikkeenä. Katodisädeputken koetuloksia tulkitaan siitä näkökulmasta. ”Magneettikentän aiheuttaman voiman lain” avulla kvantifioidaan uusi laki nimeltään ”Hiukkaseen vaikuttavan magneettisen voiman laki”. Tämä tunnetaan myös osana Lorentzin voiman lakia $F = q(E + vB)$ ([5] ilman vektorimerkintöjä), mutta sitä ei tuoda esiin.

Kaavion 2. suhteen liikutaan laatikosta 1 laatikoihin 2 ja 3. Uusia suureita ei luoda, vaan laki. Hiukkaseen vaikuttava magneettinen voima antaa perusteellisemmän fysikaalisen selityksen käämin käyttäytymiseen magneettikentässä. Hallin ilmiö tukee tätä. Tässä mielessä tapahtuu strukturointiprosessi laatikkoon 4, jossa asia edustaa selittävää mallia.

Kirjan osiossa ”Magneettikenttä” konstruoitu laki $F = ILB$ osoittautuu hyödylliseksi välitulokseksi. Sitä voi kutsua esikvantifioivaksi operaatioksi.

Moottorin tutkiminen

Kyseessä olevaan kirjan osioon sähkömoottorin tutkimisella ei ole juurikaan annettavaa. Ennenmin on niin, että moottorin toiminta on hiukan tarkemmin ymmärrettävissä osion tuomien tietojen myötä.

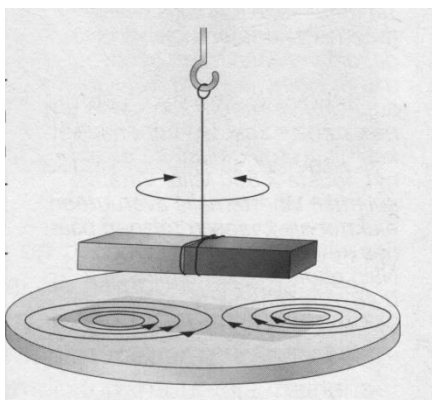
5.2 Sähkömagneettinen induktio

5.2.1 Ympäristön induktioilmiöitä

Induktioon tutustuminen aloitetaan toteamalla, että se on teknologisessa ympäristössä yleinen ilmiö, mutta sen havaitseminen ei ole helppoa. Se on piilossa laitteissa ja ilmenee eri tavoilla. Kirja luettelee kymmenisen laitetta, joissa induktio on oleellisessa roolissa, mm. generaattorin ja vaihtovirtamoottorin.

Yleisenä asiana todetaan, että induktioilmiön aiheuttaa aina muuttuva magneettikenttä. Tarkennuksena mainitaan, että kappaleen liikuessa, magneettikenttä voi olla sen kannalta muuttuva. Magneettikentän muuttuminen on syyilmiö, jonka seurausilmiönä on indusoitunut sähkökenttä, jännite tai sähkövirta.

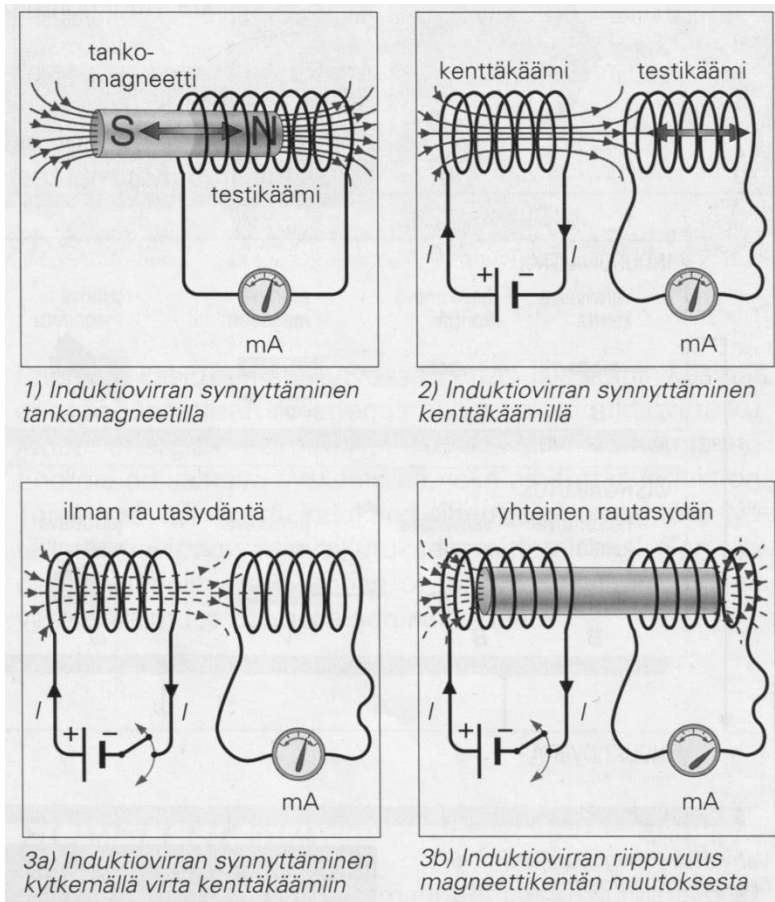
Kokeista esitellään ensin Aragon koe, jossa tutkitaan sauvamagneetin ja ei-magneettisen metallilevyn välistä vuorovaikutusta.



Kuva 33. Levyn indusoituvat pyörrevirrat. ([10], s. 40)

Jos magneetti ripustetaan levyn ylle ja levyä pyöritetään, magneetti alkaa pyöriä sen mukana. Tätä kutsutaan induktiovuorovaikutukseksi, joka johtuu levyn indusoituneista pyörrevirroista. Ne tekevät levystä magneettisen.

Perusteellisempi koe induktiovuorovaikutuksesta järjestetään sauvamagneetin ja kahden identtisen käämin avulla. Käämit nimetään kenttäkäämiksi ja testikäämiksi. Koe käsittää kolme osiota.



Kuva 34. Kokeet magneetilla ja kahdella käämillä. ([10], s. 41)

1) Työntämällä sauvamagneettia testikäämiin sisään, havaitaan indusoitunut sähkövirta, joka vaihtelee liikkeen suunnan ja nopeuden, käämin kierrosten, tai magneetin voimakkuuden mukaan. Sama tapahtuu, jos magneetin sijaan liikutetaan käämiä. Virran suuntaa tutkimalla havaitaan, että testikäämiin syntyvä magneettikenttä hylkii lähestyvää magneettia ja vetää etääntyvää magneettia.

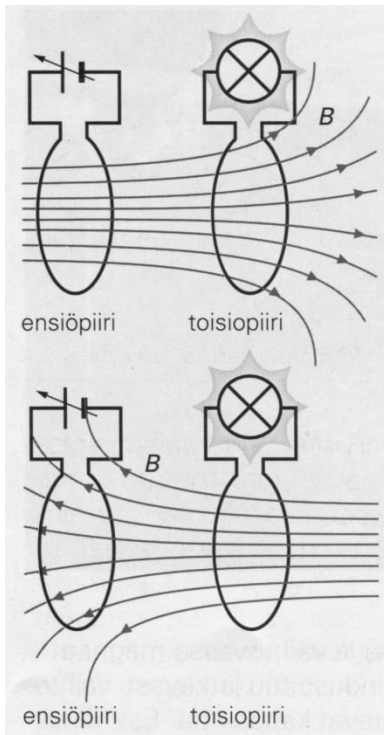
2) Jos sauvamagneetti korvataan kenttäkäämillä (käämit ovat vierekkäin, ei sisäkkäin) havaitaan samanlaista induktiovirtaa. Sen suuruus on riippuvainen kenttäkäämissä kulkevan virran suuruudesta.

3a) Pelkkä virran kytkeminen kenttäkäämiin tuottaa induktiovirtasäyksen testikäämiin. Samaten virran katkaiseminen.

3b) Lisäämällä käämeille yhteinen rautasydän, ilmiö voimistuu moninkertaiseksi.

Indusoituneen sähkövirran suuntaan liittyen esitellään Lenzin laki, jonka mukaan induktiovirran suunta on aina sellainen, että sen vaikutukset vastustavat muutosta, joka aiheuttaa induktion.

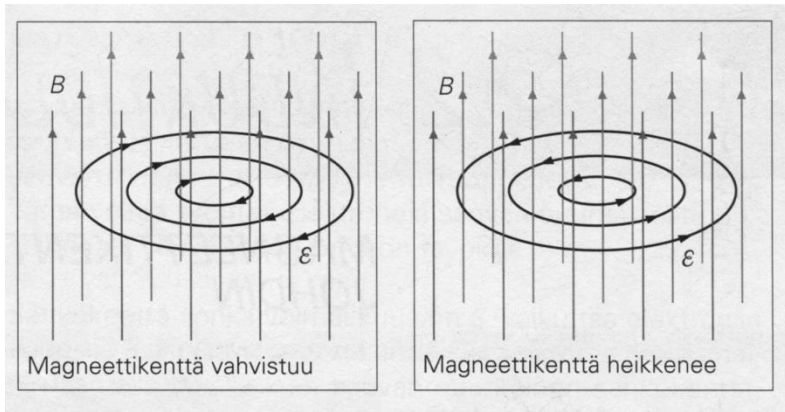
Kirja esittelee lisää sovelluksia, joissa havaitut ilmiöt ilmenevät. Näitä ovat esimerkiksi auton sytytyspuola, sähköpaimen, induktiouuni ja keraaminen liesi (ilmeisesti tarkoitetaan induktioliettä).



Aiheessa edetään ottamalla käyttöön käsite ”induktiivinen kytkentä”. Ensiöpiirin muuttuva sähkövirta synnyttää induktiovirran toisiopiiriin. Tällöin induktiovirta toisiopiirissä on myös muuttuva ja synnyttää induktiovirran ensioipiiriin. Piirien välillä tapahtuu energianvaihtoa. Kirja toteaa, että ensioipiiriin on saman vaihtojännitteen ylläpitämiseksi syötettävä energiaa suuremmalla teholla. Lisäksi todetaan, että mikä tahansa metallikappale toimii toisiopiirinä. Sovelluksena mainitaan metallinpaljastin.

Kuva 35. Induktiivinen kytkentä.
([10], s. 46)

Alaluvun lopulla päätellään pyörrevirtojen osoittavan, että muuttuva magneettikenttä tuottaa pyörteisen sähkökentän. Perusteluna on se, että varauksen kiihdyttämiseen tarvitaan aina sähkökenttä. Pyörteinen kenttä syntyy, vaikka magneettikentässä ei olisi johtavaa materiaalia. Tätä ilmiötä hyödyntävänä sovelluksena esitellään beeatroni.



Kuva 36. Indusoitunut pyörteinen sähkökenttä. ([10], s. 47)

Analyysi

Kirjan luvun ”Ympäristön induktioilmiöitä” johdattelutextissä todetaan, että luonto ei oikein tarjoa esimerkkejä induktioilmiöstä. Tässä yhteydessä luonto on ymmärrettävä sellaisena ympäristönä, joka ei ole ihmisen rakentamaa, vaan luonnontilaista. Jotta ilmiötä päästään tutkimaan, sitä on etsittävä teknologisesta ympäristöstä. Kirja luettelee erilaisia teknisiä sovelluksia, joiden toiminta perustuu induktioilmiöön. Hahmottavan lähestymistavan kannalta asia on huomion arvoinen. Jos kaavion 3 esittämä tieteellinen prosessi vertautuu oppimisprosessiin, niin lähtökohta ei ole luonnossa, vaan teknologisessa ympäristössä. Tällöin toteutuu Kurki-Suonion ajatus siitä, että teknologinen ympäristö on mahdollista tulkita luonnon laajentumaksi. Oppijan kannalta se on ympäristöä, mutta ihmisen rakentamaa.

Keskeisenä pohjatietona kerrotaan, että kaikki induktioilmiöt aiheuttaa muuttuva magneettikenttä. Asian esiin tuominen tässä vaiheessa on epätyypillistä hahmottavan lähestymistavan suhteen. Luontevinta olisi tehdä ensin joukko asiaa havainnollistavia kokeita ja todeta muuttuvan magneettikentän rooli sen jälkeen. Tietoa ei tue mikään havainto.

Induktiovuorovaikutuksen empiirinen tutkiminen aloitetaan Aragon kokeella, joka on yksinkertainen ja tuo vuorovaikutuksen kiistattomasti esiin. Se, että magneetti vuorovaikuttaa ei-magneettisen metallilevyn kanssa tuo uuden ulottuvuuden sähkömagnetismiin. Koejärjestelyn kannalta olisi hyödyllistä, jos levyn indusoituvat

pyörrevirrat saataisiin jollakin tavalla näkyviin. Kun näin ei ole, joudutaan turvautumaan asian selittämiseen sanallisesti ja havainnollistavilla piirroksilla.

Pyörrevirtaselitys saa tukea aiemmin esitellystä Amperen mallista, sekä käämin tuottamasta magneettikentästä. Poikkileikkaukseltaan pyöreässä käämissä sähkövirta kulkee ympyrärataa, mikä muistuttaa tilannetta metallilevyllä. Nämä saattavat auttaa hahmotusprosessissa. Kaavion 1 kannalta kyse on ilmiön havaitsemisesta ja sen perushahmottamisesta. Syntyy myös uusi käsite: pyörrevirta.

Sauvamagneetilla ja käämeillä tehtävillä kokeilla käydään järjestelmällisesti läpi induktiovirran syntyminen (testi)käämiin. Kaavion 1 kannalta kokeet tuottavat uuden käsitteen, induktiovirran. Induktiovirran suuruuden määrittelyn kannalta kyse on perushahmottavasta ja esikvantifioivasta prosessista. Lenzin lain määrittäminen kokeiden perusteella edustaa kvantifiointia. Uutta suuretta ei synny, mutta periaatteeltaan yksiselitteinen laki.

Induktiovuorovaikutuksen erästä ilmenemistapaa lähestytään ottamalla käyttöön käsite ”induktiivinen kytkentä”. Aiempiin tarkasteluihin verrattuna tilanne muuttuu siten, että kenttäkäämin sähkövirta muuttuu vaihtovirraksi. Käsitteellisesti ei enää puhuta käämeistä, vaan ensiö- ja toisiopiireistä. Tilannetta visualisoiva kuva antaa ymmärtää, että kyse on virtasilmuista. Vaihtovirta muuttaa tilanteen siten, että toisiopiirin muuttuva induktiovirta vaikuttaa vastavuoroisesti ensiöpiiriin. Piirit ovat induktiivisesti yhteen kytketyt.

Käsitteen esiin tuominen palvelee perushahmottavana elementtinä kirjassa myöhemmin esiin tuotavia asioita ajatellen. Näitä ovat esimerkiksi itseinduktio, vaihtovirta, muuntaja sekä erilaiset vaihtovirtapiirit komponentteineen. Induktiivinen kytkentä yleistetään koskemaan kaikkia tilanteita, joissa ensiöpiirinä on vaihtovirtapiiri. Mikä tahansa lähellä oleva johdekappale kytkeytyy siihen induktiivisesti.

Alaluvun lopulla pyörrevirtailmiötä esitellään yleisemmällä tasolla toteamalla, että muuttuva magneettikenttä tuottaa pyörteisen sähkökentän. Toteamus on oleellinen, mutta perustelu on kehäpäätelmä. Kirja toteaa pyörrevirtojen osoittavan, että sähkökenttä on pyörteinen. Ongelma on, että pyörrevirroista ei ole vakuuttavaa empiiristä näyttöä, vaan ne ovat hypoteesi jolla levyn magnetoituminen Aragon kokeessa perustellaan. Tässä suhteessa hahmottava lähestymistapa ontuu.

Moottorin tutkiminen

Pienoissähkömoottorin avulla induktiovirtojen syntyminen voidaan tuoda helposti esiin. Moottorin rakenne on sellainen, että se toimii myös generaattorina. Pyörivän roottorin käämit kokevat muuttuvan magneettikentän, vaikka staattorin kenttä ei itsessään muutu. Tällöin käämilankoihin indusoituu jännite. Moottorin akselia voidaan pyörittää esimerkiksi toisella moottorilla, kutsutaan sitä ensiömoottoriksi. Indusoitunut jännite voidaan mitata moottorin pohjan virtaliuskoista yleismittarilla. Kuvat 37 ja 38 esittävät koejärjestelyn. Moottorien akselit on kytketty yhteen pätkällä sähköjohdon joustavaa muovikuorta, ensiömoottori on oikealla puolella.



Kuva 37. Virtalähteen lähdejännite ensiömoottorille.

Kuva 38. Toisiomoottoriin indusoitunut jännite.

Moottorin avulla induktioilmiö realisoituu. Koejärjestelyssä on selvästi nähtävissä, että galvaanista yhteyttä ensiömoottorin virtalähteeseen ei ole. Käämien pyöriminen magneettikentässä on selkeästi ymmärrettävissä sähkövirran syntymisen syyksi. Kirjan koejärjestelyn 3b) myötä moottorista selviää myös se, miksi käämilangat ovat kierrettyt rautasydämen, ankkurin ympärille.

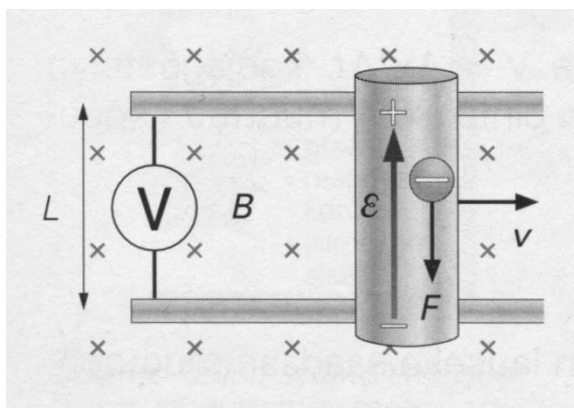
Kuvien 37 ja 38 koejärjestelyn yhteydessä havaitaan myös mielenkiintoinen ilmiö. Ensiömoottorin napajännite alkaa heittelehtiä, kun siihen kytketään sähkövirta. Kokeessa se vaihteli noin välillä 2,5 – 4 V. Vaihtelu selittyy todennäköisesti käämeihin indusoituvilla jännitteillä, jotka yhdistyvät pariston tuottamaan

jännitteeseen. Toisiomoottoriin indusoitunut jännite pysyi vakaana. Samalla havaitaan, että ensiömoottorin paristojen lähdejännite on noin voltin korkeampi, kuin toisiomoottorin tuottama. Pienoissähkömoottori toimii kyllä generaattorina, mutta tuottaa huomattavasti alhaisemman lähdejännitteen.

Pyörrevirrat voidaan ottaa esiin syynä sille, miksi ankkuri koostuu ohuista liuskoista yhtenäisen kappaleen sijaan. Niitä pyrkii syntymään ankkuriin. Pyörrevirtojen silmukoiden koko pienenee; ne rajoittuvat kukin yhden liuskan sisälle. Tällöin niiden Lenzin lain mukainen haitallinen liikettä vastustava kyky heikkenee ja moottorin teho kasvaa. Samalla pyörrevirtojen ja ankkurimateriaalin resistiivisyydestä johtuva roottorin lämpeneminen pienenee. Selitys on kvalitatiivinen, mutta tarjoaa jälleen yhden vastauksen kysymykseen ”miksi moottori on tehty niin kuin se on tehty”.

5.2.2 Induktiolaki

Induktioilmiöiden tutkimista jatketaan kirjassa kahden koejärjestelyn avulla. Ensimmäisessä käytetään pitkää virtajohdinta hyppynaruna. Sen päät kytketään herkkään volttimittariin. Havaintona on, että pyöritettäessä hyppynarua siihen indusoituu jännite, joka vaihtelee hyppyjen tahdissa. Voimakkaimillaan jännite on, jos hyppijän kädet ovat itä-länsi –suunnassa.



Kuva 39. Liikkuva sauva magneettikentässä. ([10], s. 49)

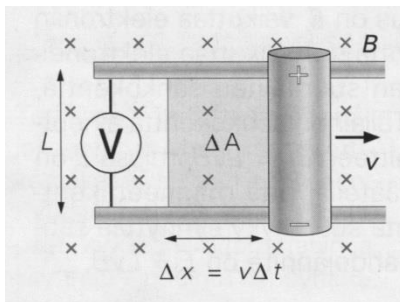
Toinen koe on ajatuskoe, koska sen toteuttaminen vaatisi laboratorio-olosuhteita. Suoraa johdinsauvaa liikutetaan kahden johdinkiskon päällä homogeenisessa magneettikentässä kuvan 39 näyttämällä tavalla. Mitattava asia on kiskojen välille syntyvä jännite.

Kokeessa voidaan todeta, että jännite on verrannollinen kiskojen välimatkaan L , sauvan nopeuteen v ja magneettivuon tiheyteen B , $E \sim LvB$. Kirjan aiemmasta luvusta

tiedetään, että sauvan elektroneihin kohdistuu voima $F = qvB$, eli elektronin tapauksessa $F = evB$. Sähköopin tiedetään, että sähkökenttä voimakkuudeltaan \mathcal{E} vaikuttaa elektroniin voimalla $F = e\mathcal{E}$. Magneettikenttä siis vaikuttaa elektroniin samalla tavalla kuin sauvan suuntainen sähkökenttä, jonka voimakkuus on $\mathcal{E} = vB$. Ottaen huomioon sauvan pituuden L , sähkökenttä aiheuttaisi pään välille jännitteen $\mathcal{E}L = LvB$. Tästä päätellään yhtälö nimeltä ”suoran johtimen induktiolaki”

$$E = LvB$$

missä E on magneettikentässä liikkuvaan sauvaan indusoituva lähdejännite. Kokeen yksinkertaistetusta tilanteesta laki johdetaan yleisempään muotoon tarkastelemalla sauvan, kiskojen ja jännitemittarin muodostaman johdinsilmukan pinta-alaa.



Sauvan liikkua nopeudella $\Delta x/\Delta t$, muuttuu pinta-ala A nopeudella $\Delta A/\Delta t = L \Delta x/\Delta t = Lv$. Indusoituneen lähdejännitteen lauseke saadaan muotoon

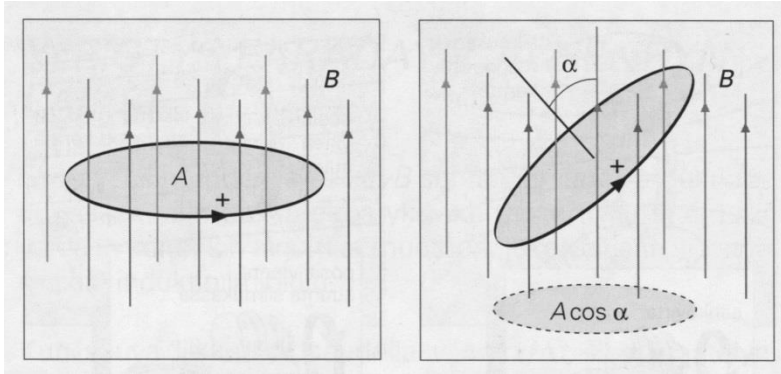
Kuva 40. Johdinsilmukan muuttuva pinta-ala. ([10], s. 50)

$$E = LvB = \Delta AB/\Delta t = \Delta\Phi/\Delta t$$

missä $\Phi = AB$ on silmukan läpäisevä magneettivuoto. Indusoituneen jännitteen suuntaissääntöjen tarkastelu ja differentiointi tuottavat laille lopullisen muodon

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

Laki nimetään induktiolaiksi. Tässä muodossa sitä kutsutaan myös Faradayn ja Henryn laiksi. Silmukan läpäisevää magneettivuotoa tarkastellaan kuvassa 41.



Kuva 41. Silmukan läpäisevä magneettivuo. ([10], s. 52)

Vasemmassa kuvassa magneettivuo on $\Phi_0 = AB$. Kun silmukka kääntyy, saadaan magneettivuoksi $\Phi = (A \cos \alpha)B = \Phi_0 \cos \alpha$.

Analyysi

Hyppynarukoe edustaa hahmottavan lähestymistavan mukaista ilmiön havaitsemista empiirisesti. Se on myös magneettikentässä (maan magneettikenttä) liikkuvaan johtimeen indusoituvan jännitteen perushahmotusta.

Hahmottamista jatketaan ajatuskokeen muodossa sauvan, kiskojen ja jännitemittarin muodostaman johdinsilmukan avulla. Kaaviota 1 ajatellen koejärjestely on pelkistys. Koe tuottaa alustavina tuloksina indusoituvan jännitteen verrannollisuuden sauvan pituuteen, sen liikkumisnopeuteen ja magneettivuon tiheyteen. Kaavion 2 suhteen tieto on esikvantifioivaa. Suoran johtimen induktiolakia varten teoreettisen fysiikan puolelta hyödynnetään sähköopin tietoja elektroniin sähkökentässä vaikuttavasta voimasta. Kaavion 1 kannalta tieto viedään takaisin kokeelliselle puolelle, jossa se yhdistetään kokeen havaintoihin. Yhdessä näistä hahmottuu edellä mainittu laki ja uusi käsite ”indusoituva lähdejännite”. Kaavion 2 kannalta prosessi edustaa esikvantifiointia. Hahmottuva laki kertoo muuttujien riippuvuuksista, eikä uutta suuretta synny.

Johdinsilmukan pinta-alan tarkastelu edustaa kvantifointiprosessia. Tuloksena on uusi suure: magneettivuo. Koe ja suure yhdistettynä tuottavat yleistetyt lain, induktiolain Faradayn ja Henryn lain muodossa. Silmukan kääntymisen ja sen

läpäisevän magneettivuon suuruuden tutkiminen toimii perushahmottavana ja esikvantifioivana tarkasteluna kirjan myöhemmän luvun otsikoltaan ”Vaihtovirtageneraattori” asioiden suhteen.

Moottorin tutkiminen

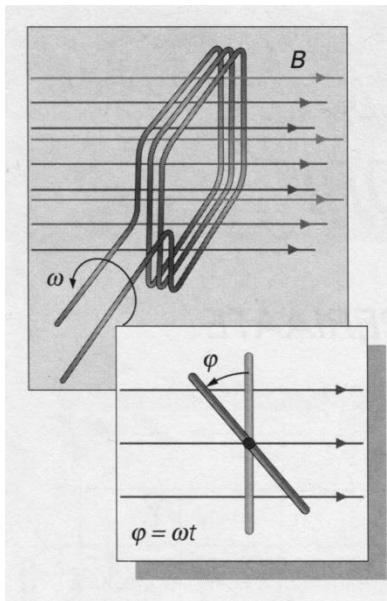
Induktiolakia voidaan testata pienoissähkömoottorin avulla. Roottorin skemaattisesta kuvasta (kuva 31) voidaan päätellä, että käämien pyöriessä niitä läpäisevä staattorin magneettivuo muuttuu periaatteessa samalla tavalla kuin kirjan silmukkatarkastelussa. Testausjärjestely on samalainen kuin edellisen osion jälkeen esitelty. Varioimalla moottorin akselin pyörimisnopeutta voidaan havaita, että indusoitunut jännite suurenee pyörimisnopeuden kasvaessa. Ensiömoottorin nopeutta voidaan kasvattaa nostamalla jännitettä. Pyörimisnopeuden kasvun voi havaita äänestä.

5.2.3 Itseinduktio

Galilei 7:n seuraava osio käsittelee itseinduktioita. Aihe ei kuulu LOPS:n keskeisiin sisältöihin, joten se sivuutetaan tässä yhteydessä.

5.2.4 Vaihtovirtageneraattori

Vaihtovirtageneraattorin toiminnan periaatteen havainnollistamiseksi kirjassa esitellään koejärjestely, jossa esim. muoviputken ympärille kiedotaan lakattua kuparilankaa käämiksi. Johtimen päät kytketään mittaustietokoneeseen tai oskilloskooppiin. Käämiä pyöräytetään voimakkaan magneetin napojen välissä. Kokeessa havaitaan mittalaitteeseen piirtyvä vaihtojännite. Sama tarkastelu suoritetaan matemaattisesti kuvan 42 avulla.



Kuva 42. Pyörivä käämi magneettikentässä. ([10], s. 62)

Käämin ollessa kohtisuorassa homogeenista magneettikenttää vastaan, sen läpäisee magneettivuo $\Phi = AB$. Käämin kiertyessä kulman φ , on magneettivuo $\Phi(\varphi) = AB\cos\varphi$. Jos käämin pyörimisen kulmanopeus on ω , on sen kiertymä ajan funktiona $\varphi = \omega t$.

Induktiolain mukaan käämiin indusoituu jännite

$$E = -N \frac{d\Phi}{dt} = -NAB \frac{d(\cos \omega t)}{dt} = NAB\omega \sin(\omega t) = E_0 \sin(\omega t)$$

missä $E_0 = NAB\omega$ on amplitudi eli huippuarvo.

Indusoituva vaihtojännite on siis sinimuotoinen ja jännite vaihtelee arvojen $-E_0, E_0$ välillä. Jännitteen lauseke voidaan kirjoittaa myös taajuuden funktiona:

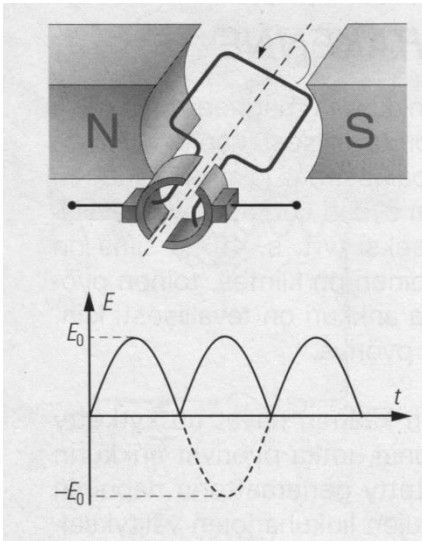
$$E = E_0 \sin(\omega t) = E_0 \sin(2\pi f t)$$

missä taajuus $f = \omega/2\pi$.

Kirja toteaa, että Suomessa sähköverkosta saatavan matalan vaihtojännitteen taajuus on 50 Hz ja huippuarvo 325 V. 230 V on nk. tehollinen jännite, johon palataan kirjassa myöhemmin.

Alaluvun lopulla kerrotaan generaattorin rakenteesta. Suora lainaus: ”Generaattorin pääosat ovat ankkuri ja magneetti, yleensä sähkömagneetti. Ankkurissa on tavallisesti useita käämejä kiedottuna samaan rautakappaleeseen, joka on käämien yhteinen rautasydän. Ankkurin sydän kootaan teräslevyistä pyörrevirtojen pienentämiseksi ... ja siinä on urat käämejä varten.”

Lisäksi esitellään tasavirtageneraattorin periaatekuva.



Kuva 43. Tasavirtageneraattorin periaatekuva. ([10], s. 66)

Tasavirtageneraattorin toiminnasta mainitaan, että kommutaattorin avulla käämin napojen välille syntyy niin kutsuttu sykkivä tasajännite.

Analyysi

Alaluku aloitetaan koejärjestelyn esittelyllä. Koe on käytännössä luultavasti hankalahko toteutettava, mutta mahdollinen. Järjestely on pelkistetty, mikä noudattaa hahmottavan lähestymistavan periaatteita.

Sinimuotoisen vaihtojännitteen syntyminen pyörivään käämiin esitellään kokoamalla yhteen aiemmin omaksutut tiedot. Kaavion 1 kannalta lähdetään liikkeelle teorian puolelta ja tehdään kierros uuden käsitteen, vaihtojännitteen luomiseksi. Kaavion 3 suhteen käydään läpi teknologinen prosessi, jossa teoriaa soveltamalla tuotetaan teknologinen sovellus, generaattori.

Moottorin tutkiminen

Pienoissähkömoottori toimii osion sisällön suhteen käytännön esimerkkinä esille tuoduista asioista. Kirjan suorat lainaukset ovat juuri sitä, mitä moottorissa on havaittavissa. Kysymys ”miksi moottori on tehty niin kuin se on tehty” saa tyhjentävän vastauksen. Vastavuoroisesti moottori vahvistaa kirjassa kuvallisesti ja teoreettisesti esitettyä.

Kun pienoissähkömoottoria käytetään moottorina, sen toiminta ei oikeastaan perustu induktioon. Toiminta on paremmin ymmärrettävissä, kun käämejä ajattelee sähkömagneetteina, jotka hakeutuvat tasapainoon staattorin magneettikentän kanssa (vrt. kuva 17 A – D). Induktioilmiö on silti läsnä, koska pyöri roottori millä voimalla hyvänsä, se koko ajan toimii myös generaattorin tavoin. Lenzin laista voidaan päätellä, että induktioilmiö käämeissä itse asiassa haittaa toimintaa moottorina; se pienentää moottorin tehoa. Tällöin voidaan päätellä, että tällaista moottoria suunniteltaessa induktioilmiö on syytä pyrkiä minimoimaan. Vaihtovirtamoottorit ovat eri asia.

Esimerkiksi tyypillisen kolmivaihevirralla toimivan oikosulkumoottorin toiminta perustuu nimenomaan niin kutsuttuun häkkikäämiin indusoituviin virtoihin. Staattori tuottaa kolmivaihevirralla vaihe-erojen avulla pyörivän magneettikentän, joka on käämin näkökulmasta siten muuttuva. Käämi alkaa pyöriä, mutta ei koskaan samaan tahtiin kuin magneettikenttä. Kierrosnopeudessa on niin kutsuttu jättämä, joka takaa induktiovirtojen syntymisen [4].

Generaattorin toiminta perustuu lähtökohtaisesti induktioon. Induktiovirtojen syntyminen käämeihin on siten syytä maksimoida erilaisilla rakenteellisilla ratkaisuilla. On siis syytä todeta, että moottorit ja generaattorit ovat lopulta eri laitteita, vaikka niissä onkin paljon yhteisiä piirteitä.

6 Pohdintaa

Sähkömagnetismi on fysiikan osa-alueena opettamisen kannalta varsin teknisesti orientoitunut. Ilmiöt ovat toki pohjimmiltaan luonnonilmiöitä, mutta ne eivät juurikaan näyttäydy ihmissilmään luonnonympäristössä. Niiden havaitsemiseen tarvitaan teknisiä apuvälineitä ja koejärjestelyitä. Sähkövirta on näkymätöntä, sen havaitseminen tapahtuu epäsuorasti tuottamiensa vuorovaikutusten kautta. Magneettikenttä on näkymätön, mutta sen havainnointi visuaalisesti on mahdollista melko yksinkertaisilla välineillä. Sähkömagnetismin opiskelu tapahtuu käytännössä erilaisten virtalähteiden, johtimien, käämien, mittareiden ja muiden teknisten laitteiden välityksellä. Teoreettinen tarkastelu tekstimuodossa tarvitsee tuekseen vähintään skemaattisen kuvan jostakin tarkoitukseen sovelletusta virtajohdinjärjestelystä. Opetuksellisesti on haastavaa tehdä näkymätön näkyväksi siten, että opiskelija saa hyvät edellytykset ymmärtää ja omaksua sähkömagnetismin käsitteet ja havaittavien vuorovaikutusten perustelut. Tästä näkökulmasta ajateltuna on luonteva toimenpide tuoda oppimisprosessiin mukaan aito ja olemassa oleva aiheeseen läheisesti liittyvä tekninen sovellus, opinnäytteen tapauksessa pienoissähkömoottori.

Periaatteessa voisi ajatella, että sähkömoottori olisi koko sähkömagnetismin opiskelun lähtökohtana. Sen tutkiminen olisi ensin, vasta sitten tuotaisiin esiin moottorin toimintaan liittyvää teoriaa, sähkömagnetismia. Tällöin opetusmetodina olisi tutkiva oppiminen. Näkemykseni on, että metodi osoittautuisi käytännössä liian vaikeaksi ja tuottaisi opiskelijoiden kannalta enemmän haittaa kuin hyötyä. On järkevämpää kytkeä moottorin tutkiminen konventionaaliseen opetukseen, jossa oppimateriaalilla on merkittävä rooli. Moottorin tutkimisen tehtävä on tukea materiaalissa esitettyä ja tuottaa siihen erilaista näkökulmaa. Tehtävä on osin haastava, koska opettajan on syytä tuntea moottorin toiminta mielellään varsin hyvin ja perusteellisesti. Vaarana on, että sopimattomalla tavalla, sopimattomassa yhteydessä moottorin tutkimisen tuottama informaatio voi sekoittaa opiskelijoiden ymmärrystä sähkömagneettisista ilmiöistä ja käsitteistä.

Galilei 7 valikoitui opinnäytteen esimerkkikirjaksi sen lukuisten hyvien puolien ansiosta. Kirjan erityiseksi ansioksi voi mainita johdonmukaisuuden. Se noudattaa

hahmottavan lähestymistavan periaatteita systemaattisesti. Aihepiirissä eteneminen on loogista. Kirjassa on kaikki tarvittava, mutta ei mitään liikaa. Jokaisella virkkeellä on tehtävä. Kvalitatiivisuuden ja kvantitatiivisuuden suhde on tasapainoinen. Opinnäytteen kannalta se on ihanteellinen teos. Sähkömagnetismin substanssin esittelyssä olisi ollut se vaihtoehto, että olisin laatinut itse tarvittavat teoreettiset tarkastelut ja kytkisin sähkömoottorin tutkimisen niihin. Tämä olisi ollut iso työ. Galilei tarjosi valmiiksi hyvän rungon asiaan, joten oli järkevää käyttää sitä.

Olen tietoinen siitä, että opinnäytteen esittämä didaktinen rekonstruktio, eli sähkömoottorin tutkimisen kytkeminen opiskeluprosessiin, voi olla opettajille haastavaa. Fysiikan substanssin hallitseminen on eri asia kuin tekninen osaaminen. Opinnäytteen idea on tuoda esiin se, että tällainenkin didaktinen järjestely on kuitenkin mahdollinen. Vastaavanlainen järjestely voisi olla mahdollinen esimerkiksi lukion moduulin 3 ”Energia ja lämpö” yhteydessä. Tällöin tutkittavana teknisenä sovelluksena voisi olla esimerkiksi ilmalämpöpumppu tai jääkaappi. Käytännössä asiaa hankaloittaisi laitteiden isohko koko. Opiskelijat eivät voisi saada tutkittavakseen omaa laitetta, jonka voisi viedä vaikka kotiinkin. Pienoissähkömoottori mahdollistaa tällaisen.

Käytännön kompastuskivinä opinnäytteessä hahmotellussa didaktisessa rekonstruktiossa näkisin roottorin magneettikentän visualisoinnin ja moottorin toiminnan kokonaisuuden visualisoinnin. Roottorin magneettikentän näkyviin saaminen on teknisesti melko vaativaa. Siihen tarvitaan erityinen astia ja huolellisuutta sähkövirran syötön suhteen. On riski, että roottori vaurioituu liiallisen lämpenemisen seurauksena. Ei ole relevanttia ajatella, että lukion oppilaat tekisivät kokeen itse.

Moottorin toiminnan visualisointi skemaattisen läpileikkauskuvan avulla on myös iso työ. Ongelmaksi muodostuu käytettävissä oleva aika. Järkevintä olisi, että materiaali olisi valmiina opettajan käytössä. Opinnäytteen yhteydessä sellainen on tehty, ratkaisuna voisi olla sen lataaminen asianmukaiseen paikkaan ja jakaminen sitä kautta. Tehty skemaattinen kuva on laadittu Geogebraa, roottoria voi pyörittää liukusäätimen avulla.

Moottorin rakenne poikkeaa kirjassa esitetyistä periaatekuvista erityisesti siten, että käämejä ja kommutaattoriliuskoja on kolme. Konstruktio on astetta vaikeampi hahmottaa, mikä voi olla ongelma. Toisaalta voi ajatella, että on relevanttia näyttää, että todellisuus teknisissä sovelluksissa voi olla eri asia kuin periaatekuvat.

Opinnäytteen suunnittelun aikana pohdin olisiko syytä suorittaa pienimuotoinen opetuskokeilu, jonka tavoitteena olisi mitata moottorin opetukseen kytkemisen oppimistuloksia. Olisi kaksi opiskelijaryhmää, joista toinen kävisi moduuli 7 kurssin ilman moottoria ja toinen sen kera. Tulosten mittaamiseksi laadittaisiin kysely molemmille ryhmille ennen kurssia ja jälkeen kurssin. Olen taannoisissa kasvatustieteen kandidaatin opinnoissani tällaisen toteuttanut. Ymmärsin sen myötä, että opetuskokeilu tekisi opinnäytteestä huomattavasti laajemman kokonaisuuden. On tietoinen valinta, että kokeilu jätettiin pois.

7 Johtopäätökset

Opinnäytteen tarkoitus on pohtia, olisiko lukion sähkömagnetismin kurssin (moduuli 7) opetuksen yhteyteen mahdollista kytkeä uusi elementti pienoissähkömoottorin empiirisellä tutkimisella. Moottorin tutkiminen toisi opiskelijoille toisen näkökulman opiskeltavaan aiheeseen ja hypoteesina on, että se mahdollistaisi vahvemman tuen aihepiirin käsitteiden omaksumiselle. Uuden elementin kytkemistä opetukseen kutsutaan tässä yhteydessä didaktiseksi rekonstruktioksi.

Johtopäätöksenä voi todeta, että idea on toteutettavissa ja realistinen.

Pienoissähkömoottorin toiminnassa näkyvät kurssin keskeiset sisällöt. Moottorin avulla niitä voidaan tarkastella varsin kattavasti. On perusteltua ajatella, että opiskelijan käsitteenmuodostus saa tutkimisprosessista tukea ja tekninen yleissivistys kehittyy. Tutkimisprosessi ei vaadi erityisiä tilajärjestelyitä ja on pitkälti suoritettavissa fysiikan opetuksen perusvälineillä. Pienoissähkömoottorit ovat varsin edullisia, joten kustannukset ovat alhaiset. Opinnäytteen tavoitteiden ja hypoteesin todentaminen vaatisi huolellisesti organisoidun opetuskokeilun vertaisryhmiä käyttäen. Sellainen ei sisälly opinnäytteeseen.

Mahdollisiksi ongelmiksi todetaan eräiden teknisten koejärjestelyjen käytännön organisointi, sekä opettajan valmiudet didaktisen rekonstruktion toteuttamiseen.

Lähdeluettelo

1. Brehm, John J., Mullin, William J. (1989). Introduction to the structure of matter. A course in modern physics. NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc.
2. Duit, R.; Schenker, H.; Höttecke, D.; Niedderer, H. Teaching Physics. In Handbook of Research on Science Education; Lederman, N.G., Abell, K.S., Eds.; Routledge: New York, NY, USA, 2014; Volume II, pp. 434-456.
3. Fysiikan tukimateriaalia. Lukion opetussuunnitelman perusteiden 2019 fysiikan moduulien sisältöjen tarkastelua. MAOL.
4. Hughes, A. (2006). Electric Motors and Drivers. Fundamentals, Types and Applications. Amsterdam ; Boston ; London : Elsevier Newnes
5. Knight, R.D. (2008). Physics for scientists and engineers (International edition). San Francisco, California: Pearson Education, Inc.
6. Kurki-Suonio, K. (1985). Kaavatauti: oireet ja hoito. Esimerkki tieteellisen ajattelun oppimisen ongelmista. <https://www.mv.helsinki.fi/home/kurkisuo/6.2.PubDidPhys.html>. Luettu 15.11.2022.
7. Kurki-Suonio, K., Kurki-Suonio, R. (1988). Kokeellisen ja teoreettisen lähestymistavan tuntomerkit fysiikan opetuksessa. <https://www.mv.helsinki.fi/home/kurkisuo/6.2.PubDidPhys.html>. Luettu 15.11.2022.
8. Kurki-Suonio, K., Kurki-Suonio, R. (1992). Empiirinen käsitteenmuodostus fysiikassa. <https://www.mv.helsinki.fi/home/kurkisuo/6.2.PubDidPhys.html>. Luettu 15.11.2022.
9. Kurki-Suonio, K., Kurki-Suonio, R. (1998). Fysiikan merkitykset ja rakenteet. Helsinki: Limes Ry.
10. Lavonen, J., Kurki-Suonio, K., Hakulinen, H. (1996). Galilei 7: Sähkömagnetismi. Porvoo: WSOY.
11. Lukion opetussuunnitelman perusteet 2019. <https://www.oph.fi/fi/koulutus-ja-tutkinnot/lukion-opetussuunnitelmien-perusteet>. Luettu 15.11.2022.
12. <https://tieteentermipankki.fi/wiki/Filosofia:reaalitieteet>. Luettu 15.11.2022.
13. <https://fi.wikipedia.org/wiki/Ampeeri>. Luettu 15.11.2022.
14. https://studies.helsinki.fi/ohjeet/artikkeli/tutkintorakenne-ja-tutkinnon-laajuus?check_logged_in=1. Luettu 23.11.2022.