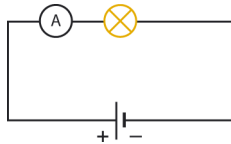


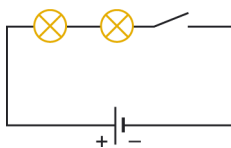
TEHTÄVIEN RATKAISUT

1-1. Kytentäkaaviot:

a)



b)

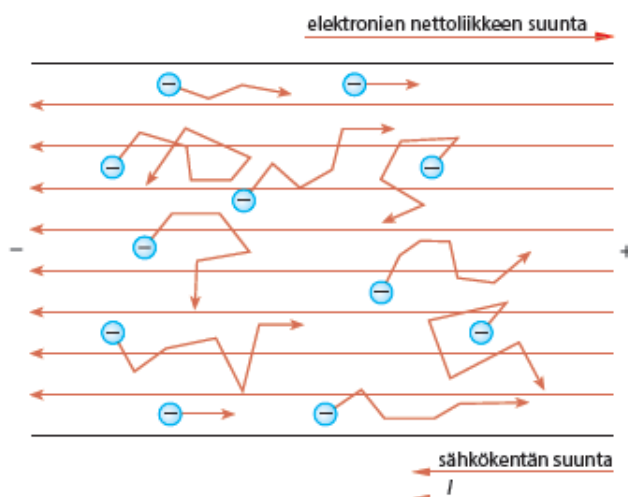


1-2. Johtimien järjestys sähkövirran suuruuden mukaan on 4, 2, 3, 1 ja 5.

1-3. a) Sähkövirta I_1 on $I_1 = I_2 + I_3 = 0,55 \text{ A} + 0,40 \text{ A} = 0,95 \text{ A}$.

b) Sähkövirta I_2 on $I_2 = I_1 - I_3 = 0,31 \text{ A} - 0,12 \text{ A} = 0,19 \text{ A}$.

1-4. Kun metallijohdin kytketään jännitelähteeseen, johtimen sisälle syntyy sähkökenttä, jonka suunta on jännitelähteen positiivisesta kohtiosta kohti jännitelähteen negatiivista kohtiota. Sähkökentän synnyn seurauksena vapaat elektronit alkavat liikkua keskimäärin samaan suuntaan eli kohti jännitelähteen positiivista napaa. Vaikka suurin osa elektronien liikkeestä on edelleen järjestäytymätöntä lämpöliikettä, liike sähkökentän suuntaan nähden vastakkaiseen suuntaan on kuitenkin hieman yleisempää. Tämä ilmenee sähkövirtana.



1-5. Kodin laitteista sähkövirran

- a) lämpövaikutukseen perustuvat mm. vedenkeitin, sähkökiuas, leivänpaahdin, sähkölieden uuninvastus, silitysrauta, sulake ja myös hehkulamppu.
- b) säteilyvaikutukseen perustuu mm. lämpöpatteri (ja jo käytöstä poistumassa olevat hehkulamput)
- c) magneettiseen vaikutukseen perustuvat mm. kaiutin
- d) kemialliseen vaikutukseen perustuu esim. (kännykän) akkujen lataaminen.

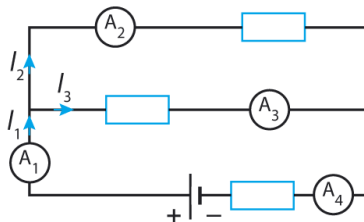
1-6. 1c, 2d, 3a, 4e, 5b

1-7. Kun kytkin suljetaan, sähkövirta kulkee lamppujen L1 ja L2 läpi, mutta ei lampun L3 läpi, koska sen osalta virtapiiri on avoin. Lamput L1 ja L2 hehkuvat yhtä kirkkaasti, koska ne ovat haarautumattomassa virtapiirissä ja niiden läpi kulkee sama sähkövirta. Kirkkausjärjestys on L1 ja L2, L3.

1-8. a) Lamppu L1 hehkuu, kun kytkimet K1 ja K2 suljetaan.

b) Molemmat lamput hehkuvat, kun kytkimet K1 ja K3 suljetaan. (Molemmat lamput hehkunevat myös silloin, kun kaikki kytkimet suljetaan, joskin lampun L2 hehkuminen lienee vaikea havaita, koska sähkövirta ”oikaisee” kytkimen K2 kautta.)

1-9. a) Sähkövirrat:



b) Ylimmässä johtimessa on 160 mA:n suuruinen sähkövirta. Koska keskimmaisessä johtimessa on samanlainen vastus, johtimessa kulkee myös 160 mA sähkövirta.

Alimmassa johtimessa kulkevan sähkövirran I_1 suuruus saadaan Kirchhoffin I lain perusteella:

$$I_1 = I_2 + I_3 = 160 \text{ mA} + 160 \text{ mA} = 320 \text{ mA}.$$

Koska virtamittarit A_1 ja A_4 ovat virtapiirin samassa haarassa, ne näyttävät samaa lukemaa.

Virtamittarin A_1 lukema on siis 320 mA, virtamittarin A_2 lukema 160 mA, virtamittarin A_3 lukema 160 mA ja virtamittarin A_4 lukema 320 mA.

- 1-10.** a) Tosi. Näiden mittarien läpi kulkee sama sähkövirta ja ne näyttävät samaa lukemaa. Mittarien sijainti ei vaikuta sähkövirran arvoon haarautumattomassa johtimessa.
- b) Epätosi. Mittari 5 on virtapiirissä haarautumiskohdassa ja näyttää tästä syystä pienempää lukemaa kuin mittari 3.
- c) Epätosi. Virtapiirissä sähkövirta alkaa kulkea yhtä aikaa kaikkialla ja siksi kaikki lamput syttyvät samanaikaisesti riippumatta siitä, kuinka kaukana jännitelähteestä ne sijaitsevat.
- d) Epätosi. Molempien lamppujen läpi kulkee yhtä suuri sähkövirta ja ne palavat yhtä kirkkaasti. Lampun sijainti ei vaikuta sähkövirran suuruuteen.
- e) Tosi. Perustelu on edellisessä kohdassa.
- f) Tosi. Sähkövirran suunta on sovittu positiivisesta kohtiosta negatiiviseen.
- g) Epätosi. Elektronien liikesuunta on sähkövirran suunnalle vastakkainen. Tämä johtuu historiallisista syistä, ts. sähkövirran suunta oli jo sovittu ennen kuin elektronien olemassaolo keksittiin.
- 1-11.** Varavirtalähteestä saadaan sähkövirtaa $\Delta t = \frac{\Delta Q}{I} = \frac{12000 \text{ mAh}}{330 \text{ mA}} \approx 36 \text{ h}$.
- 1-12.** a) Hermoston ja lihasten kuten sydämen toiminta on sähköistä ja ulkoinen sähkövirta voi sekoittaa tätä kehon omaa toimintaa. Suuri sähkövirta voi myös kuumentaa elimistöä sisältäpäin ja aiheuttaa palovammoja. Sähkövirta voi saada aikaan myös kemiallisia muutoksia soluissa, jolloin soluun voi syntyä mm. myrkyllisiä aineita.
- b) Sähkövirran avulla hoidetaan mm. sydämen rytmihäiriöitä ja hengityspysähdyksiä.
- 1-13.** Johtimen poikkipinta-alan läpi kulkenut kokonaisvaraus saadaan kuvaajan ja aika-akselin väliin jäävän fysikaalisen pinta-alan avulla.

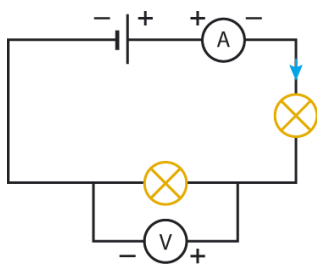
$$\begin{aligned} \text{Yksi ruutu vastaa varausta } Q &= 0,50 \text{ mA} \cdot 1,0 \text{ ms} \\ &= 0,50 \cdot 10^{-6} \text{ As} = 0,50 \text{ } \mu\text{C}. \end{aligned}$$

Arvioidaan, että pinta-ala koostuu noin 6,5 ruudusta. Näin ollen kokonaisvaraus on $Q_{\text{kok}} = 6,5 \cdot 0,50 \text{ } \mu\text{C} \approx 3,3 \text{ } \mu\text{C}$.

TEHTÄVIEN RATKAISUT

- 2-1.** a) Kodin sähkölaitteissa käytetään hyvin erikokoisia ja jännitteeltään erilaisia paristoja. Monissa laitteissa kuten herätyskelloissa ja kaukosäätimissä käytetään 1,5 V sormiparistoja. Laskimissa käytetään 1,5 V sormiparistojen lisäksi paljon elohopeaparistoja, monet laskimet toimivat myös aurinkokennolla. On olemassa mm. ruskohiili-, alkali- ja litiumparistoja. Palohälyttimen paristona käytetään tavallisesti 9,0 V paristoa.
- b) Elohopeaparissa positiivisena napana on elohopeaoksidi HgO , negatiivisena sinkki ja elektrolyytinä kaliumhydroksidiliuos KOH . Parin jännite on 1,3 V. Se antaa noin viisi kertaa niin suuren sähkömäärän kuin saman tilavuinen kuivapari. Elohopeaparistoja käytetään laitteissa, joissa tarvitaan pientä sähkövirtaa. Käytön jälkeen elohopeaparistot toimitetaan kierrätykseen, jotta elohopea ei kulkeutuisi roskien mukana luontoon. Elohopea on raskasmetalli ja myrkyllinen aine.
- c) Litiumakkuja käytetään mm. matkapuhelimissa ja sähkötyökaluissa, kuten ruuvinvääntimissä ja erilaisissa trimmereissä. Litiumakkuja käyttävien sähkötyökalujen etuna on parempi käytettävyys sähköjohdollisiin laitteisiin verrattuna. Litiumakkuja voi ladata, vaikka akku ei olisi tyhjä ja litiumakun latautumiskyky ei kärsi tästä. Litiumakun käyttöikä on pidempi kuin aikaisemmin käytössä olleiden NiMH-akkujen.
- d) Käytöstä poistetut paristot ja akut on toimitettava kierrätyspisteeseen.
- 2-2.** Lähdejännite tarkoittaa kuormittamattoman pariston jännitettä ja napajännite kuormitetun pariston jännitettä.

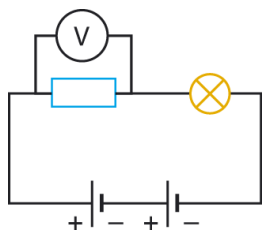
- 2-3.** a) Mittareiden napaisuus on merkitty piirrokseen:



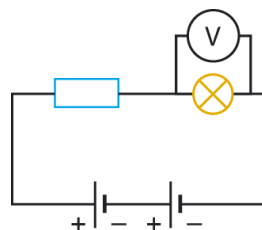
- b) Virtamittari kytketään virtapiiriin osaksi eli sarjaan laitteen (laitteiden) kanssa.
- c) Jännitemittari kytketään laitteen rinnalle.

2-4.

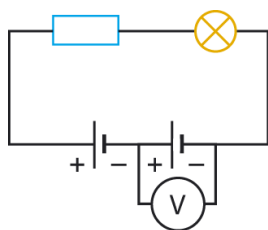
a)



b)

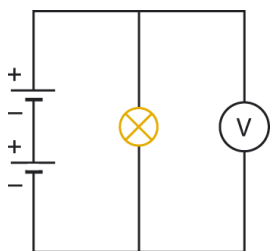


c)

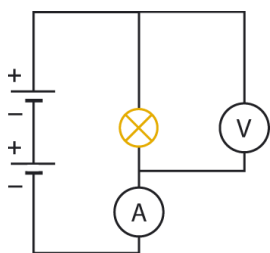


2-5.

a) KytKentäkaavio:



b) KytKentäkaavio:



2-6.

a) * Akku on Litium-polymeeri -akku.

*Varavirtalähteen akun kapasiteetti on 6000 mAh.

*Varavirtalähteen akun voi ladata lähteestä, jonka jännite on 5 V, esimerkiksi tietokoneen usb-porttista. Tällöin latausvirta on max 800 mA

*Varavirtalähteeseen avulla voi ladata laitteen, jonka latausjännite on 5 V, esimerkiksi matkapuhelimen akun. Tällöin latausvirta on max 1 A.

*Varavirtalähteessä on kaksi erillistä liitintä ladattaville laitteille.

*IPX4 tarkoittaa, että laitteen kotelo on roiskevesisuoja.

b) Varavirtalähteen akun lataus kestää kauemmin kuin matkapuhelimen akun lataus, koska varavirtalähteen akun kapasiteetti on paljon suurempi kuin puhelimen akun kapasiteetti.

2-7. Lämpöparissa on kaksi eri metallista olevaa johdinta, jotka on liitetty yhteen. Kun lankojen liitoskohta lämpenee, niiden vapaiden päiden välille syntyy jännite. Sen suuruus riippuu liitoskohdan lämpötilasta. Lämpöparia käytetään mm. lämpömittareissa.

- 2-8.** a) Kytkentä a on sama kuin alkuperäinen kytkentä, joten jännitemittarin lukema on 1,5 V.
b) Kytkentä b on sama kuin alkuperäinen kytkentä, joten jännitemittarin lukema on 1,5 V.
c) Kytkennässä c jännitemittarin lukema on 1,5 V.

Kytkennoissä d, e ja f paristot on kytketty sarjaan. Jännitemittarien lukemat ovat

d) 3,0 V

e) 4,5 V

f) 1,5 V.

g) Kytkennässä g paristot on kytketty rinnan, joten jännitemittarin lukema on 1,5 V.

h) Kytkennässä h paristot on kytketty rinnan, joten jännitemittarin lukema on 1,5 V.

i) Kytkennässä i mittarin lukema on 1,5 V. Pariston (napa)jännite on 1,5 V, vaikka piiri on avoin.

j) Kytkennässä j mitataan yhden pariston (napa)jännitettä, joka on 1,5 V.

k) Kytkennässä k mitataan yhden pariston (napa)jännitettä, joka on 1,5 V. Piirissä k ei kulje sähkövirtaa.

2-9. Oheisen kytkennän avulla voit sytyttää ja sammuttaa portaissa olevan lampun asuntosi kummastakin kerroksesta.



2-10. a) Taulukosta voi päätellä eri metallien normaalipotentialit eli jännite-erot vetyyn verrattuna.

b) Voltan paria koskeneessa työssä käytettyjen metallilevyjen normaalipotentialit E ovat $E_{\text{Cu}} = +0,34 \text{ V}$ ja $E_{\text{Zn}} = -0,76 \text{ V}$.

Levyjen välinen jännite on $0,34 \text{ V} - (-0,76 \text{ V}) = 1,1 \text{ V}$.

c) Koska $E_{\text{Cu}} = +0,34 \text{ V}$ ja $E_{\text{Fe}} = -0,45 \text{ V}$, naulojen välinen jännite on

$U = +0,34 - (-0,45 \text{ V}) = 0,79 \text{ V}$. Lukema on mittaustarkkuuden rajoissa oikein.

TEHTÄVIEN RATKAISUT

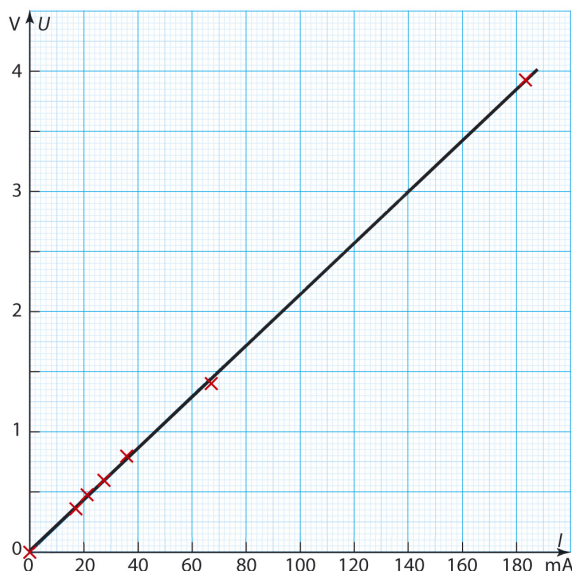
- 3-1.** a) Ohmin lain mukaan metallilangan jännitehäviö on vakioämpötilassa suoraan verrannollinen langassa kulkevaan sähkövirtaan eli $U = RI$, jossa U on langan jännitehäviö, R langan resistanssi ja I langan läpi kulkeva sähkövirta.
- b) Ohmin laki on voimassa metallilangalle vakioämpötilassa.
- 3-2.** a) Kuvan kytkennällä ei voi määrittää metallilangan resistanssia, koska jännitemittari mittaa jännitelähteen jännitehäviön, ei metallilangan.
- b) Kuvan kytkennällä voi määrittää metallilangan resistanssin.
- c) Kuvan kytkennällä voi määrittää metallilangan resistanssin.
- d) Kuvan kytkennällä voi määrittää metallilangan resistanssin.
- 3-3.** a) Vastuslankojen jännitehäviöt: A 4,6 V ja B 3,0 V.
- b) Vastuslangassa A sähkövirta on 32 mA ja vastuslangassa B 50 mA.
- c) Koska vastuslankojen kuvaajat I, U -koordinaatistossa ovat suorat, langat noudattavat Ohmin lakia.

- 3-4.** Resistanssit ovat

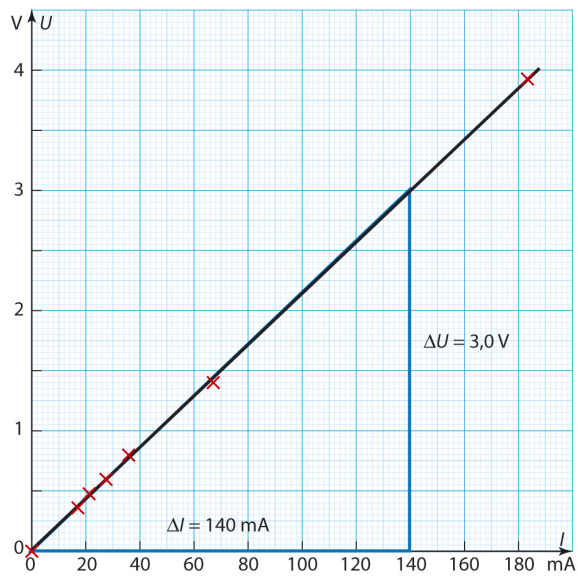
$$R = \frac{\Delta U}{\Delta I} = \frac{3,6 \text{ V}}{10 \text{ mA}} = 360 \, \Omega \text{ ja}$$

$$R = \frac{\Delta U}{\Delta I} = \frac{3,1 \text{ V}}{20 \text{ mA}} \approx 160 \, \Omega.$$

- 3-5.** a) Mittaustulokset I, U -koordinaatistossa.

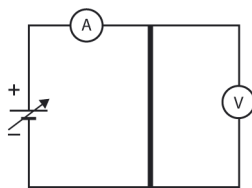


b) Vastuslangan resistanssi saadaan I, U -koordinaatistoon piirretyn suoran fysikaalisesta kulmakertoimesta:



$$R = \frac{\Delta U}{\Delta I} = \frac{3,0 \text{ V}}{140 \text{ mA}} \approx 21 \, \Omega.$$

c) Kytentäkaavio:



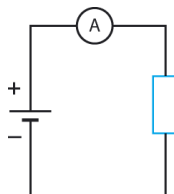
3-6. Resistanssi on $R = \frac{U}{I} = \frac{12 \text{ V}}{2 \text{ mA}} = 6000 \, \Omega = 6 \text{ k}\Omega.$

3-7. Lasketaan ensin metallilangan resistanssi: $R = \frac{U}{I} = \frac{4,5 \text{ V}}{12 \text{ mA}} = 375 \, \Omega.$

Koska langan lämpötila ei muutu, jännite on

$$U = RI = 375 \, \Omega \cdot 66 \text{ mA} \approx 25 \text{ V}.$$

3-8. a) Kytentäkaavio:



b) Jännitehäviö on $U = RI = 220 \, \Omega \cdot 20 \text{ mA} = 4,4 \text{ V}.$

3-9. a) Vastuslangan resistanssi on $R = \frac{U}{I} = \frac{7,35 \text{ V}}{1,08 \text{ A}} = 6,80556 \Omega \approx 6,81 \Omega$.

b) Sähkövirta on $I = \frac{U}{R} = \frac{15,0 \text{ V}}{6,80556 \Omega} \approx 2,20 \text{ A}$.

c) Jotta sähkövirta olisi 0,200 A, jännitteen on oltava

$$U = RI = 6,80556 \Omega \cdot 0,200 \text{ A} \approx 1,36 \text{ V}.$$

3-10. a) Jännitehäviö on 1,3 V.

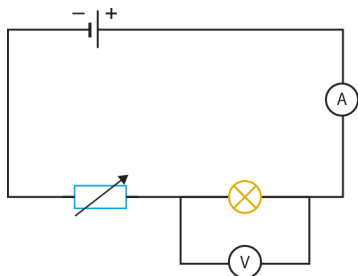
b) Resistanssit ovat $R = \frac{U}{I} = \frac{0,5 \text{ V}}{20 \text{ mA}} = 25 \Omega$ ja $R = \frac{U}{I} = \frac{2,3 \text{ V}}{50 \text{ mA}} = 46 \Omega$.

c) Kun sähkövirta kasvaa, hehkulampun resistanssi kasvaa lämpötilan noustessa. Siksi kuvaaja kaartuu ylöspäin.

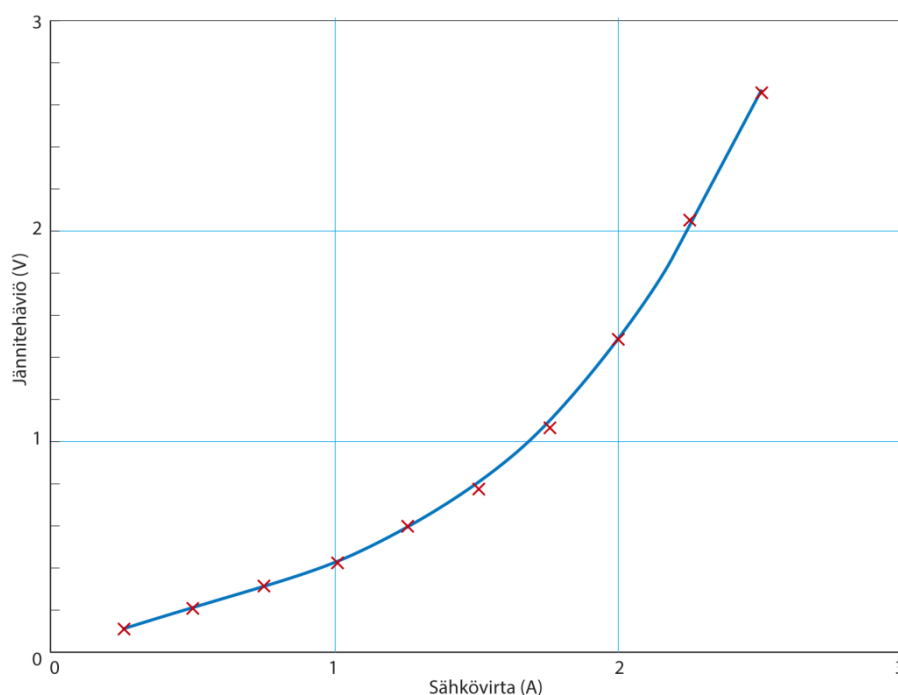
3-11. a) Komponentti ei noudata Ohmin lakia, koska U, I -kuvaaja ei ole suora.

b) Resistanssi on $R = \frac{U}{I} = \frac{3,0 \text{ V}}{40 \text{ mA}} = 75 \Omega$.

3-12. a) Virtamittari, polttimo ja säätövastus kytketään sarjaan ja yhdistetään pariston napoihin. Jännitemittari kytketään polttimon kanssa rinnan. Kytkenäkaavio on seuraava:



b) Esitetään jännitehäviö sähkövirran funktiona eli $U = U(I)$ -kuvaaja:



c) Ohmin lain mukaan vakiolämpötilassa on voimassa yhtälö $U = RI$, jolloin I, U -koordinaatistoon piirretty kuvaaja on nouseva suora. Koska kuvaaja kaartuu I, U -koordinaatistossa ylöspäin, hehkulangan resistanssi kasvaa lämpötilan noustessa. Hehkulanka ei noudata Ohmin lakia.

- 3-13.** Vastusten värikooditaulukko löytyy mm. taulukkokirjasta tai internetistä. Hopeinen/kultainen raita asetetaan oikealle ja luetaan vastusten raitojen värit vasemmalta oikealle. Vastuksen värit ovat vihreä, sininen, punainen; $R = 5,6 \text{ k}\Omega$.
<http://www.kouluelektronikka.fi/vastus.html>

TEHTÄVIEN RATKAISUT

4-1. a) Metallilankaa edustaa kuvaaja 2 ja 3.

Kuvaajassa 3 jännitehäviö on suoraan verrannollinen sähkövirtaan Ohmin lain mukaisesti.

Kuvaaja 2 voi esittää esimerkiksi hehkulampun volframilankaa, jonka resistanssi kasvaa sähkövirran kasvaessa.

Kuvaaja 1 ei voi edustaa metallilankaa. Johtimen resistanssin arvot pienenevät ja lopulta resistanssi menisi nolaksi sähkövirran kasvaessa.

b) Resisttiivisyys liittyy materiaaliin (eli aineeseen) ja resistanssi esim. kappaleeseen, joka voi koostua eri johdinmateriaaleista.

c) Metallilangan resistanssi riippuu materiaalista, langan poikkipinta-alasta ja langan pituudesta. Resistanssi riippuu myös lämpötilasta.

d) 1) Jotta metallilangan resistanssi olisi mahdollisimman pieni, langan

* materiaalin resistiivisyyden on oltava mahdollisimman pieni ja

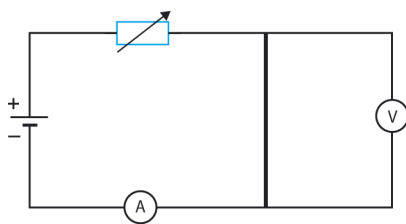
* lanka mahdollisimman lyhyt ja paksu.

2) Jotta metallilangan resistanssi olisi mahdollisimman suuri, langan

* materiaalin resistiivisyyden on oltava mahdollisimman suuri ja

* lanka mahdollisimman pitkä ja ohut.

4-2. a) Kytkenäkaavio



b) I, U -koordinaatistoon piirretyt kuvaajat ovat suoria, joiden fysikaalisesta kulmakertoimesta saadaan vastuslankojen resistanssit.

$$\text{Jyrkemmälle suoralle } R_1 = \frac{\Delta U}{\Delta I} = \frac{10 \text{ V}}{0,020 \text{ A}} = 500 \, \Omega \text{ ja}$$

$$\text{loivemmalle suoralle } R_2 = \frac{\Delta U}{\Delta I} = \frac{6,0 \text{ V}}{0,048 \text{ A}} = 125 \, \Omega.$$

c) Vastuslangan resistanssi riippuu langan materiaalista, pituudesta ja poikkipinta-alasta yhtälöstä $R = \rho \frac{l}{A}$ mukaisesti. Langan paksuudelle saadaan yhtälö $A = \rho \frac{l}{R}$.

Koska langat ovat samaa materiaalia ja yhtä pitkät ja langan 2 resistanssi oli pienempi, tämän langan täytyy olla paksumpi.

d) Poikkipinta-alojen suhde saadaan pääteltyä resistanssien avulla. Koska

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{500 \, \Omega}{125 \, \Omega} = \frac{4}{1}, \text{ saadaan yhtälö } \frac{\rho \frac{l}{A_1}}{\rho \frac{l}{A_2}} = \frac{A_2}{A_1} = 4.$$

Koska $A_2 = 4 \cdot A_1$, langan 2 poikkipinta-ala on siis nelinkertainen ja langan halkaisijoiden suhde 2:1.

4-3. Resistanssi lasketaan yhtälöstä $R = \rho \frac{l}{A}$. Resistanssi on suoraan verrannollinen langan pituuteen ja kääntäen verrannollinen langan poikkileikkauksen pinta-alaan eli paksuuteen.

a) Jos langan A pituus on suurempi kuin langan B halkaisija, langan A resistanssi on suurempi kuin B:n resistanssi. Nyt langan A resistanssi on kaksinkertainen langan B resistanssiin verrattuna.

b) Jos langan A poikkipinta-ala on kolminkertainen B:n poikkipinta-alaan verrattuna, langan A resistanssi on pienempi kuin B:n resistanssi. Nyt langan A resistanssi on kolmasosa langan B resistanssista.

c) Jos langan A halkaisija on suurempi kuin langan B halkaisija, langan A resistanssi on pienempi kuin B:n resistanssi. Jos langan säde on r , langan poikkipinta-ala on $A = \pi r^2$. Jos langan säde on $2r$, langan poikkipinta-ala on $A = \pi (2r)^2 = 4\pi r^2$. Jos halkaisija on kaksinkertainen, myös säde on kaksinkertainen. Näin ollen langan A resistanssi on neljäsosa langan B resistanssista.

4-4. a) Alumiinilangan resistanssi on

$$R = \rho \frac{l}{A} = 2,655 \cdot 10^{-8} \, \Omega \text{m} \cdot \frac{12 \cdot 10^3 \, \text{m}}{0,25 \cdot 10^{-4} \, \text{m}^2} \approx 13 \, \Omega.$$

Jotta langan resistanssi pienenesi puoleen, langan poikkipinta-ala on

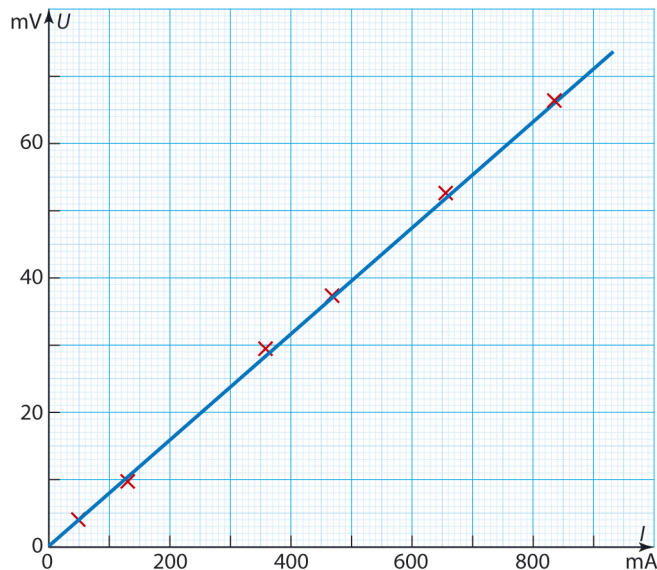
$$A_2 = \frac{\rho l}{\frac{R}{2}} = 2 \cdot \frac{\rho l}{R} = 2 \cdot A = 2 \cdot 0,25 \, \text{cm}^2 = 0,50 \, \text{cm}^2.$$

Ratkaisun voi myös päätellä. Resistanssin yhtälön $R = \rho \frac{l}{A}$ mukaan resistanssi R on kääntäen verrannollinen langan paksuuteen A . Näin ollen jos resistanssi pienenee puoleen, langan paksuus kaksinkertaistuu. Uusi poikkipinta-ala on siis

$$A_2 = 2 \cdot 0,25 \, \text{cm}^2 = 0,50 \, \text{cm}^2.$$

b) Jännitehäviö on $U = RI = \rho \frac{l}{A} \cdot I = 2,655 \cdot 10^{-8} \Omega \text{m} \cdot \frac{1,00 \cdot 10^3 \text{m}}{\pi \cdot (2,2 \cdot 10^{-3} \text{m})^2} \cdot 12 \text{A} \approx 21 \text{V}.$

4-5.



Määritetään ensin langan resistanssi. I, U -kuvaaja on suora, joten resistanssi saadaan kuvaajasta fysikaalisena kulmakertoimenä:

$$R = \frac{\Delta U}{\Delta I} = \frac{39 \text{ mV}}{500 \text{ mA}} = 0,078 \Omega.$$

Resistanssin arvoon vaikuttavat langan paksuus ja pituus sekä materiaali yhtälön $R = \rho \frac{l}{A}$ mukaisesti. Kyseisen langan resistiivisyys on

$$\rho = \frac{RA}{l} = \frac{0,078 \Omega \cdot \pi \cdot (0,41 \cdot 10^{-3} \text{m})^2}{2,4 \text{m}} \approx 1,7 \cdot 10^{-8} \Omega \text{m}$$

Taulukkokirjan mukaan lanka on todennäköisesti kuparia.

4-6. Käyrä 1 kuvaa hehkulampun volframilankaa. Sähkövirran kasvu pienenee, kun jännite kasvaa, koska metallilangan resistanssi kasvaa lämpötilan kohotessa.

Käyrä 2 kuvaa NTC-termistoria (Negative Temperature Coefficient). NTC-termistorin resistanssi pienenee lämpötilan noustessa.

Käyrä 3 kuvaa konstantaanitarkkuusvastusta. Konstantaanin resistanssi pysyy likimain vakiona lämpötilan muuttuessa.

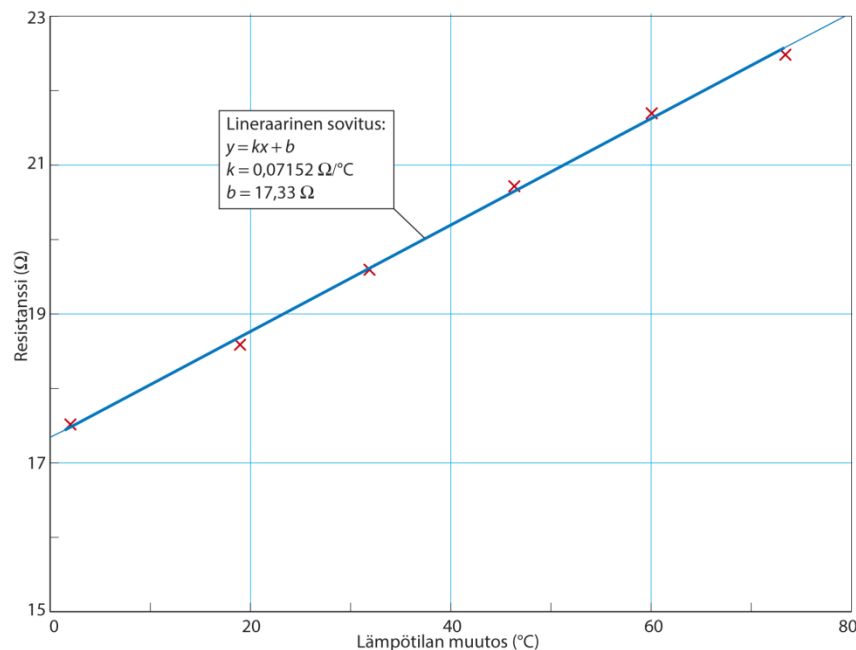
4-7. a) Hehkulampun volframilangan resistanssi lämpötilassa 2000°C on

$$R = R_{20}(1 + \alpha \Delta t) = R_{20}(1 + \alpha \Delta T) \\ = 6,0 \Omega \cdot (1 + 4,84 \cdot 10^{-3} 1/\text{K} \cdot 2080 \text{K}) \approx 66 \Omega.$$

b) Lasketaan taulukon lämpötilan arvojen t avulla vastaava lämpötilan muutos Δt yhtälöstä $\Delta t = t - 20^\circ \text{C}.$

$t(^{\circ}\text{C})$	21,8	39,0	51,8	66,3	80,1	93,2
$\Delta t(^{\circ}\text{C})$	1,8	19,0	31,8	46,3	60,1	73,2
$R(\Omega)$	17,5	18,6	19,6	20,7	21,7	22,5

Esitetään mittaustulokset $\Delta t, R$ -koordinaatistossa.



Kun $\Delta t = 0^{\circ}\text{C}$, kuvaajan perusteella resistanssi lämpötilassa 20°C on $R_{20} = 17,33 \Omega$. Resistiivisyyden lämpötilariippuvuus on $R = R_{20}(1 + \alpha\Delta t) = R_{20} + R_{20}\alpha\Delta t$, ja $\Delta t, R$ -koordinaatistoon piirretyn suoran $R = R_{20} + R_{20}\alpha\Delta t$ fysikaalinen kulmakerroin on $R_{20}\alpha$. Mittausohjelman mukaan suoran fysikaalinen kulmakerroin $\Delta t, R$ -koordinaatistossa on $0,07152 \Omega/^{\circ}\text{C}$. Yhtälöstä $R_{20}\alpha = 0,07152 \Omega/^{\circ}\text{C}$ resistiivisyyden lämpötilakerroin on

$$\alpha = \frac{0,07152 \Omega/^{\circ}\text{C}}{R_{20}} = \frac{0,07152 \Omega/^{\circ}\text{C}}{17,33 \Omega} \approx 4,1 \cdot 10^{-3} 1/^{\circ}\text{C}$$

Resistiivisyyden lämpötilakerroin on $4,1 \cdot 10^{-3} 1/\text{K}$.

4-8. a) Neuronin solunesteen resistiivisyys on

$$\rho = \frac{RA}{l} = \frac{2 \cdot 10^9 \Omega \cdot \pi \cdot (5 \cdot 10^{-6} \text{ m})^2}{0,25 \text{ m}} \approx 0,6 \Omega \text{ m}.$$

Veden resistiivisyys on $5000 \Omega\text{m}$. Ero veden ja neuronin solunesteen resistiivisyyksien välillä johtuu solunesteen ioneista. Koska solu kuitenkin on pääasiassa vettä, vertailu veden resistiivisyyteen on mielekäs.

b) Hermosolussa on solukeskuksen lisäksi tuoja- ja viejähaarakkeita. Solukeskuksessa on mm. tuma. Solukeskus sijaitsee keskushermostossa. Viejähaarakkeita (aksoneita) ympäröi myeliinituppi. Viejähaarakkeen loppuosa on ääreishermostoa.

- 4-9.** Langan massa on $m_1 = \rho V = \rho A_1 l$, jossa ρ on langan tiheys, l langan pituus ja A_1 poikkipinta-ala. Jos langan pituus on $3l$, sen massa on $m_2 = \rho A_2 \cdot 3l$. Koska langan tiheys ei muutu venytyksessä, langan massakaan ei muutu, siksi $m_1 = m_2$ eli $\rho A_1 l = \rho A_2 \cdot 3l$. Lankojen pinta-alojen suhde on $A_2 = \frac{A_1}{3}$.

Jos langan pituus on l , sen resistanssi on $R_1 = \rho \frac{l}{A}$. Jos langan pituus on $3l$, sen resistanssi on

$$R_2 = \rho \frac{3l}{A_2} = \rho \frac{3l}{\frac{A_1}{3}} = 9 \rho \underbrace{\frac{l}{A_1}}_{R_1} = 9R_1.$$

Langan resistanssi muuttuu 9-kertaiseksi.

- 4-10.** Suprajohtavan tilan saavuttamiseksi aine on jäähdytettävä ns. kriittisen lämpötilan alapuolelle esimerkiksi upottamalla aine nestemäiseen tyypeen. Kun suprajohte poistetaan nestemäisestä tyypestä, sen lämpötila kohoaa ja suprajohtavat ominaisuudet alkavat hävitä. Tällä hetkellä ei tunneta ainetta, joka olisi suprajohtava huoneenlämpötilassa. Suprajohteita käytetään mm. lääketieteen teknisissä sovelluksissa ja hiukkaskiihdyttimissä.

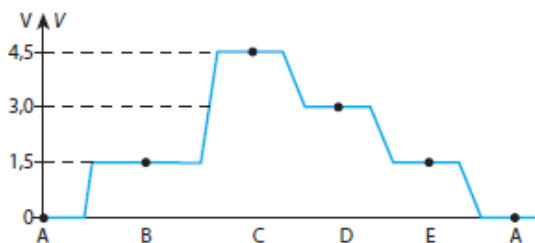
TESTAA, OSAATKO S. 43

1. a c 2. a b 3. b 4. a c 5. a c 6. b 7. a b c 8. a c 9. c 10. c 11. a b c 12. a b c

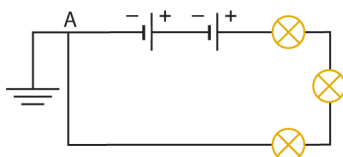
TEHTÄVIEN RATKAISUT

- 5-1.**
- a) Potentiaali ilmaisee virtapiirin pisteiden jännitteet sovittuun nollapotentiaaliin nähden. Kahden pisteen välinen jännite ilmaistaan pisteiden potentiaalien avulla.
 - b) Potentiaalikäyrä on käyrä, joka esittää piirin potentiaalia piirin eri kohdissa.
 - c) Potentiaalitarkasteluissa jokin virtapiirin piste maadoitetaan. Tämän pisteen potentiaali on $V = 0 \text{ V}$, koska Maan potentiaali on sovittu nolllaksi.
 - d) Kirchhoffin II lain mukaan suljetussa virtapiirissä potentiaalimuutosten summa on nolla eli $\sum \Delta V = 0$.

5-2.

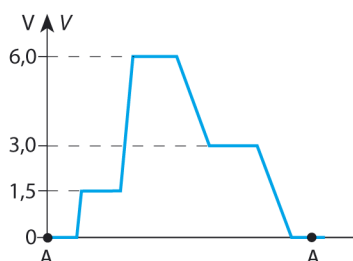


- a) $V_C = 4,5 \text{ V}$ ja $V_E = 1,5 \text{ V}$
- b) $U_{CA} = V_C - V_A = 4,5 \text{ V} - 0 \text{ V} = 4,5 \text{ V}$
 $U_{EA} = V_E - V_A = 1,5 \text{ V} - 0 \text{ V} = 1,5 \text{ V}$
- c) Jännitelähteiden jännitteet ovat 1,5 V ja 3,0 V.
- d) Jokaisen vastuksen jännitehäviö on 1,5 V.
- e) Kytkenäkaavio:



- 5-3.** Piste A potentiaali on $V_A = 4,5 \text{ V}$. Piste B on maadoitettu, siksi sen potentiaali on $V_B = 0 \text{ V}$.

- 5-4.** Potentiaalikäyrän kuvaaja:



- 5-5.** Koska jännitelähteen jännite on 9,0 V ja lamput ovat samanlaiset, kummankin lampun jännitehäviö on 4,5 V.

Potentiaalit:

$$V_A = 0 \text{ V}$$

$$V_B = 9,0 \text{ V}$$

$$V_C = 9,0 \text{ V}$$

$$V_D = 4,5 \text{ V}$$

$$V_E = 0 \text{ V}.$$

- 5-6.** a) Jos piste A maadoitetaan, lamppu L_1 valaisee, koska sen läpi kulkee sähkövirta.
b) Jos piste A maadoitetaan, lamppu L_2 ei valaise, koska sen läpi ei kulje sähkövirta: sähkövirta menee maadoituksen kautta maahan ja ohittaa lampun L_2 .
c) Jos piste B maadoitetaan, lamppu L_1 ei valaise, koska sen läpi ei kulje sähkövirta: sähkövirta menee maadoituksen kautta maahan ja ohittaa lampun L_1 (ja L_2).

- 5-7.** Koska piste D on maadoitettu, sen potentiaali on $V_D = 0 \text{ V}$. Koska paristojen napajännitteiden summa on 3,0 V, jokaisen lampun jännitehäviö on 1,0 V, koska lamppuja on kolme ja ne ovat samanlaisia.

a) Päättelämällä:

Koska piste D on maadoitettu, pisteen A potentiaali on 1,5 V.

Pisteen B potentiaali on $1,5 \text{ V} + 1,5 \text{ V} - 1,0 \text{ V} = 2,0 \text{ V}$.

Pisteen C potentiaali on $1,5 \text{ V} + 1,5 \text{ V} - 1,0 \text{ V} - 1,0 \text{ V} = 1,0 \text{ V}$.

Sama laskemalla:

Koska $U_{AD} = V_A - V_D$, pisteen A potentiaali on $V_A = U_{AD} + V_D = 1,5 \text{ V} + 0,0 \text{ V} = 1,5 \text{ V}$.

Koska $U_{BD} = V_B - V_D$, pisteen B potentiaali on

$$V_B = U_{BD} + V_D = 1,5 \text{ V} + 1,5 \text{ V} + (-1,0 \text{ V}) + 0,0 \text{ V} = 2,0 \text{ V}.$$

Koska $U_{CD} = V_C - V_D$, pisteen C potentiaali on

$$V_C = U_{CD} + V_D = 1,5 \text{ V} + 1,5 \text{ V} + (-1,0 \text{ V}) + (-1,0 \text{ V}) + 0,0 \text{ V} = 1,0 \text{ V}.$$

b) Kun piste B maadoitetaan, pisteen B potentiaali on $V_B = 0 \text{ V}$. Tällöin virtapiirissä vain vasemmanpuoleisin lamppu valaisee.

- 5-8.** a) Koska vastukset ovat sarjakytketyt, virtapiirissä kulkeva sähkövirta on yhtä suuri kuin yhden vastuksen läpi kulkeva sähkövirta. Vastuksen R_1 resistanssi on 22Ω ja jännitehäviö $U_1 = 2,4 \text{ V}$.

Yhtälöstä $R = \frac{U}{I}$ saadaan virtapiirissä kulkevaksi sähkövirraksi

$$I = \frac{U_1}{R_1} = \frac{2,4 \text{ V}}{22 \Omega} = 0,10909 \text{ A} \approx 0,11 \text{ A}.$$

b) Koska sarjakytettyjen vastusten jännitehäviöiden summa on yhtä suuri kuin pariston napajännite, yhtälöstä $U = U_1 + U_2$ saadaan toisen vastuksen jännitehäviöksi $U_2 = U - U_1 = 6,0 \text{ V} - 2,4 \text{ V} = 3,6 \text{ V}$. Koska vastuksen R_2 jännitehäviö on $3,6 \text{ V}$ ja lampun läpi kulkeva sähkövirta $0,10909 \text{ A}$, resistanssi on

$$R_2 = \frac{U_2}{I} = \frac{3,6 \text{ V}}{0,10909 \text{ A}} \approx 33 \Omega.$$

5-9. a) Pisteiden B ja A välinen jännite on

$$U_{BA} = V_B - V_A = 4,5 \text{ V} - 0,0 \text{ V} = 4,5 \text{ V}.$$

b) Pisteiden A ja B välinen jännite on

$$U_{AB} = V_A - V_B = 0,0 \text{ V} - 4,5 \text{ V} = -4,5 \text{ V}.$$

c) Piirin potentiaali kasvaa paristojen kohdalla ja alenee lamppujen kohdalla. Koska paristojen napajännitteiden summa on $9,0 \text{ V}$, jokaisen lampun jännitehäviö on $3,0 \text{ V}$, koska lamppuja on kolme. Pisteen D potentiaali on

$$V_D = 4,5 \text{ V} + 4,5 \text{ V} - 3,0 \text{ V} - 3,0 \text{ V} = 3,0 \text{ V}.$$

Näin ollen pisteiden D ja A välinen jännite on $U_{DA} = V_D - V_A = 3,0 \text{ V} - 0,0 \text{ V} = 3,0 \text{ V}$.

5-10. a) Vastusten jännitehäviöt ovat:

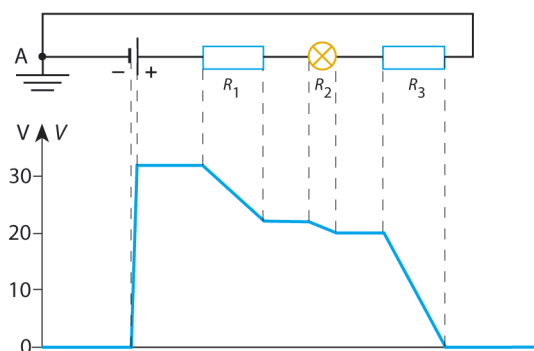
$$U_1 = R_1 I = 50 \Omega \cdot 0,20 \text{ A} = 10 \text{ V ja}$$

$$U_3 = R_3 I = 100 \Omega \cdot 0,20 \text{ A} = 20 \text{ V}.$$

b) Lampun jännitehäviö on $U_2 = R_2 I = 10 \Omega \cdot 0,20 \text{ A} = 2,0 \text{ V}$. Jännitelähteen napajännitteen on oltava edellä laskettujen kolmen jännitehäviön summa, joten

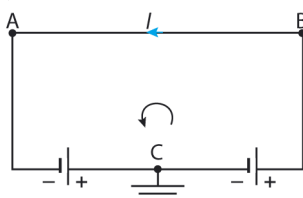
$$U = U_1 + U_2 + U_3 = 10 \text{ V} + 2,0 \text{ V} + 20 \text{ V} = 32 \text{ V}.$$

c) Potentiaalikäyrä:

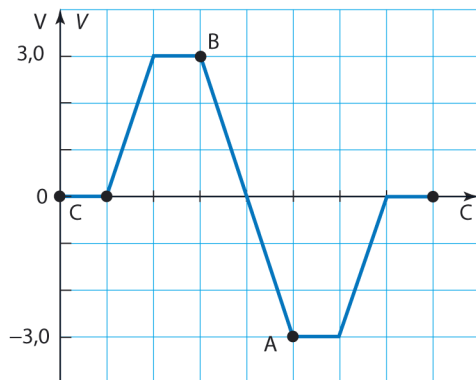


5-11. a) Kaksi $3,0 \text{ V}$ jännitelähdettä on kytketty sarjaan. Yhdistelmän kokonaisjännite on $6,0 \text{ V}$. Koska vain piirin metallilangan aiheuttaa jännitehäviötä, langan jännitehäviö on $6,0 \text{ V}$.

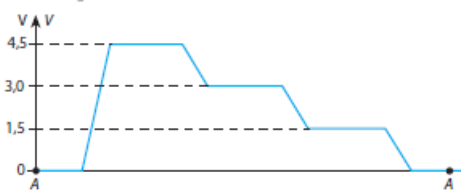
b)



Kun kierretään pisteestä C alkaen sähkövirran suuntaan, potentiaali kasvaa paristossa 3,0 V. Langassa välillä BA potentiaali alenee 6,0 V, jonka jälkeen potentiaali on – 3,0 V. Paristossa potentiaali kohoaa lähtötasolle.



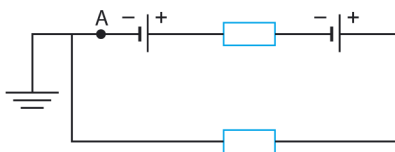
5-12.



a) Virtapiirissä on kolme vastusta.

b) $\Sigma \Delta V = 4,5 \text{ V} - 1,5 \text{ V} - 1,5 \text{ V} - 1,5 \text{ V} = 0 \text{ V}$.

5-13. a) Potentiaalikäyrästä voidaan päätellä, että 1,5 V ja 4,5 V paristot on kytketty sarjaan. Yhdistelmän kokonaisjännite on 6,0 V. Koska vastuksia on kaksi, kummankin jännitehäviö on 3,0 V.



b) $\Sigma \Delta V = 1,5 \text{ V} - 3,0 \text{ V} + 4,5 \text{ V} - 3,0 \text{ V} = 0 \text{ V}$.

TEHTÄVIEN RATKAISUT

6-1. a) Kokonaisresistanssi on $R = R_1 + R_2 = 25 \, \Omega + 35 \, \Omega = 60 \, \Omega$.

b) Kokonaisresistanssin laskemiseksi lavennetaan yhtälö

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \text{ muotoon } \frac{1}{R} = \frac{R_2}{R_1 R_2} + \frac{R_1}{R_1 R_2} \text{ ja}$$

edelleen $\frac{1}{R} = \frac{R_1 + R_2}{R_1 R_2}$. Tästä saadaan kokonaisresistanssiksi

$$R = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} = \frac{25 \, \Omega \cdot 35 \, \Omega}{25 \, \Omega + 35 \, \Omega} \approx 15 \, \Omega.$$

6-2. Valosarjassa kulkeva sähkövirta on $I = \frac{U}{R_{\text{kok}}} = \frac{24 \, \text{V}}{10 \cdot 25 \, \Omega} \approx 96 \, \text{mA}$.

6-3. Vasemmanpuoleisessa kytkentäkaaviossa vastukset ovat sarjassa;

$$R = R_1 + R_2 = 5,0 \, \Omega + 5,0 \, \Omega = 10,0 \, \Omega.$$

$$\text{Virtamittarin lukema on } I = \frac{U}{R_{\text{kok}}} = \frac{12 \, \text{V}}{10,0 \, \Omega} = 1,2 \, \text{A}.$$

Oikeanpuoleisessa kytkennässä vastukset on kytketty rinnan:

$$\text{Yhtälö } \frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \text{ saadaan muotoon } \frac{1}{R} = \frac{R_2}{R_1 R_2} + \frac{R_1}{R_1 R_2} \text{ ja}$$

$$\text{edelleen } \frac{1}{R} = \frac{R_1 + R_2}{R_1 R_2}.$$

Tästä saadaan kokonaisresistanssiksi

$$R = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} = \frac{5,0 \, \Omega \cdot 5,0 \, \Omega}{5,0 \, \Omega + 5,0 \, \Omega} = 2,5 \, \Omega.$$

$$\text{Virtamittarin lukema on } I = \frac{U}{R} = \frac{12 \, \text{V}}{2,5 \, \Omega} = 4,8 \, \text{A}.$$

6-4. Ylimmän lampun läpi kulkeva sähkövirta on $I = \frac{U}{R} = \frac{2,5 \, \text{V}}{15,7 \, \Omega} \approx 0,16 \, \text{A}$,

$$\text{keskimmäisen } I = \frac{U}{R} = \frac{2,5 \, \text{V}}{10,5 \, \Omega} \approx 0,24 \, \text{A ja}$$

$$\text{alimman } I = \frac{U}{R} = \frac{2,5 \, \text{V}}{2,1 \, \Omega} \approx 1,2 \, \text{A}.$$

6-5. Koska kytkennän vastukset on kytketty rinnan, resistanssi saadaan

yhtälöstä $\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$. Se saadaan muotoon $\frac{1}{R} = \frac{R_2}{R_1 R_2} + \frac{R_1}{R_1 R_2}$ ja

edelleen $\frac{1}{R} = \frac{R_1 + R_2}{R_1 R_2}$.

Vastusyhdistelmän kokonaisresistanssi on $R = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$. Jännitelähteen

jännite on $U = RI = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} I = \frac{25\Omega \cdot 35\Omega}{25\Omega + 35\Omega} \cdot 0,45\text{ A} \approx 6,6\text{ V}$.

6-6. Jos lampun napojen välinen jännite on suurempi kuin muiden samanlaisten lamppujen, lamppu palaa kirkkaammin kuin muut lamput.

a) Alin lamppu palaa kirkkaammin kuin kaksi ylintä. Kaksi ylintä palavat yhtä himmeästi.

b) Neljä alinta lamppua ovat yhtä kirkkaita, ja ne palavat kirkkaammin kuin ylimmät. Kolme ylintä palavat yhtä himmeästi.

6-7. a) Kytkennässä a kaksi lamppua on kytketty sarjaan, jolloin niiden läpi kulkeva sähkövirta on pienempi kuin vertailulampun läpi kulkeva virta. Molemmat a-kytkennän lamput palavat himmeämmin kuin vertailulamppu.

b) Kytkennässä b lamput ovat rinnan, joten niiden yhteisresistanssi on puolet vertailulampun resistanssista. Tällöin sama paristo aiheuttaa piiriin suuruudeltaan kaksinkertaisen sähkövirran. Tämä virta jakautuu kuitenkin puoliksi lampuille A ja B, joten ne palavat yhtä kirkkaasti kuin vertailulamppu.

c) Kytkennässä c molemmat lamput palavat yhtä kirkkaasti kuin vertailulamppu.

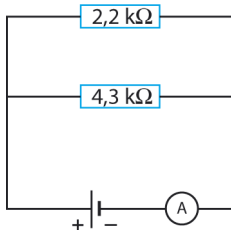
d) Kytkennässä d lamppu ei pala ollenkaan, sillä paristot on kytketty siten, että virtaa ei kulje tässä piirissä ollenkaan.

e) Kytkennässä e sähkövirralla on haarautumispiste. Toinen haaroista on pelkkää johdinta eli vastukseton. Sähkövirta kulkee ainoastaan tämän johtimen kautta (ts. lampun B kautta kulkeva virta on häviävän pieni). Lamppu B ei pala ollenkaan, lampun A kirkkaus on sama kuin vertailulampun.

f) Kytkennässä f kaksi paristoa on kytketty rinnan. Yhdistelmän napajännite on (likimain) sama kuin yhden pariston, joten lamppu palaa (likimain) samalla kirkkaudella kuin vertailulamppu: käytännössä eroa ei huomaa, mutta herkkä virtamittari osoittaisi piirissä kulkevan hieman suuremman sähkövirran kuin vertailupiirissä.

- 6-8.** a) Kirkkaimmin hehkuu lamppu L1 ja himmeimmin lamput L2 ja L3.
 b) Lamppu L3 sammuu, koska sen jännitehäviö on nolla (kytketty rinnan johtimen kanssa). Lampun L1 kirkkaus kasvaa (tai lamppu menee rikki liian suuren virran takia).

6-9. a) Kytentäkaavio:



b) Kytentän kokonaisresistanssi saadaan kaavasta $\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$, josta

$$R = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} = \frac{2,2 \text{ k}\Omega \cdot 4,3 \text{ k}\Omega}{2,2 \text{ k}\Omega + 4,3 \text{ k}\Omega} = 1,45538 \text{ k}\Omega.$$

Virtamittari näyttää virtapiirissä kulkevan sähkövirran suuruuden:

$$I = \frac{U}{R} = \frac{1,34 \text{ V}}{1,45538 \text{ k}\Omega} \approx 0,92 \text{ mA}.$$

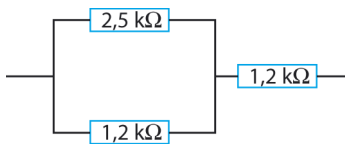
6-10. Neljän rinnankytketyn vastuslangan muodostaman lankayhdistelmän kokonaisresistanssi on

$$R_4 = \frac{R}{4} = \frac{6,5 \Omega}{4} = 1,625 \Omega.$$

Tällaisia lankayhdistelmiä on kytketty kaksi sarjaan. Kokonaisresistanssi on

$$R = R_4 + R_4 = 1,625 \Omega + 1,625 \Omega = 3,25 \Omega. \text{ Sähkövirta on } I = \frac{U}{R} = \frac{12 \text{ V}}{3,25 \Omega} \approx 3,7 \text{ A}.$$

6-11. Haluttu yhdistelmä saadaan, kun kytketään 1,2 kΩ ja 2,5 kΩ vastukset rinnan ja näiden kanssa sarjaan 1,2 kΩ vastus.



Vastukset $R_1 = 1,2 \text{ k}\Omega$ ja $R_2 = 2,5 \text{ k}\Omega$, on kytketty rinnan.

$$\text{Yhtälöstä } \frac{1}{R_{12}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$$

$$\text{saadaan } \frac{1}{R_{12}} = \frac{R_2}{R_1 R_2} + \frac{R_1}{R_1 R_2} \text{ eli } \frac{1}{R_{12}} = \frac{R_1 + R_2}{R_1 R_2} \text{ ja edelleen}$$

$$R_{12} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} = \frac{1,2 \text{ k}\Omega \cdot 2,5 \text{ k}\Omega}{1,2 \text{ k}\Omega + 2,5 \text{ k}\Omega} = 0,810811 \text{ k}\Omega.$$

Vastusyhdistelmän kokonaisresistanssi on

$$R = R_{12} + R_3 = 0,810811 \text{ k}\Omega + 1,2 \text{ k}\Omega \approx 2,0 \text{ k}\Omega$$

- 6-12.** Kun säätövastuksen resistanssi on nolla, koko sähkövirta kulkee sen kautta. Kuvaajasta nähdään tämän virran suuruudeksi $6,0 \text{ mA} = 0,0060 \text{ A}$. Vastuksen 2 läpi ei kulje ollenkaan sähkövirtaa, eikä sen resistanssi silloin vaikuta piirissä kulkevan virran suuruuteen. Piirissä on siis vain vastus 1, jonka resistanssi on

$$R_1 = \frac{U}{I} = \frac{12 \text{ V}}{0,0060 \text{ A}} = 2,0 \text{ k}\Omega.$$

Kun säätövastuksen resistanssia kasvatetaan voimakkaasti, piirissä kulkevan virran suuruus ei enää (juurikaan) muutu. Kun säätövastuksen resistanssi on suuri, sen läpi ei kulje ollenkaan virtaa, jolloin sähkövirran suuruus määräytyy vastusten 1 ja 2 mukaan. Kuvaajasta nähdään virran suuruudeksi $0,0020 \text{ A}$.

Yhtälöstä $U = (R_1 + R_2)I$ saadaan $\frac{U}{I} = R_1 + R_2$. Vastuksen 2 resistanssi on

$$R_2 = \frac{U}{I} - R_1 = \frac{12 \text{ V}}{0,0020 \text{ A}} - 2,0 \text{ k}\Omega = 4,0 \text{ k}\Omega.$$

- 6-13.** Koska jokaisen vastuksen läpi kulkee sama sähkövirta, pienin resistanssi on vastuksella, jonka jännitehäviö on pienin ja suurin vastuksella, jonka jännitehäviö on suurin. Potentiaalikäyrältä voi päätellä, että vastuksen 2 resistanssi on pienin ja vastuksen 3 resistanssi on suurin.

TEHTÄVIEN RATKAISUT

7-1. 1D, 2B, 3E, 4C ja 5A

7-2. a) Käyttöjännite on 19 V. Sähkövirta on suurimmillaan 2,1 A. Sähkövirran suuruus kuitenkin vaihtelee koneen käyttötavasta riippuen.

b) Sähköteho on 40 W.

c) Yhden tietokoneen 4 tunnissa käyttämä energia kilowattitunteina on

$$E = Pt = 0,040 \text{ kW} \cdot 4 \text{ h} = 0,16 \text{ kWh}.$$

Kun koneita on 200, $E_{\text{kok}} = 200 \cdot 0,16 \text{ kWh} = 32 \text{ kWh}$.

Kustannukset ovat $32 \text{ kWh} \cdot 14 \text{ snt/kWh} \approx 4,5 \text{ €}$.

7-3. a) Lampun L_1 kirkkaus kasvaa, koska lampun läpi kulkeva sähkövirta kasvaa: piirin resistanssi pienenee, koska sähkövirta kulkee katkaisijan kautta, ei lampun L_3 kautta.

b) Lampun L_2 jännitehäviö kasvaa, koska pariston napajännite jakautuu vain lamppujen L_1 ja L_2 kesken. Sähkövirta kulkee katkaisijan kautta, ei lampun L_3 kautta.

c) Tehohäviö lampussa L_2 kasvaa, koska lampun L_2 läpi kulkeva sähkövirta kasvaa: tehohäviö lasketaan yhtälöstä $P = RI^2$.

7-4. Koska lamput eivät ole keskenään samanlaisia, johtopäätöstä ei voida tehdä pelkästään lampussa kulkevan sähkövirran perusteella. Tarkastellaan lamppujen tehonkulutusta. Lasketaan ensin sähkövirta eri tilanteissa ja Joulen lain avulla lamppujen sähkötehon tuotto.

a) Sähkövirta on $I = \frac{U}{R} = \frac{4,5 \text{ V}}{4,0 \Omega} = 1,125 \text{ A}$ ja

sähköteho $P = RI^2 = 4,0 \Omega \cdot (1,125 \text{ A})^2 \approx 5,1 \text{ W}$.

b) Sähkövirta on $I = \frac{U}{R} = \frac{4,5 \text{ V}}{6,0 \Omega} = 0,75 \text{ A}$ ja

sähköteho $P = RI^2 = 6,0 \Omega \cdot (0,75 \text{ A})^2 \approx 3,4 \text{ W}$.

c) Sähkövirta on $I = \frac{U}{R} = \frac{9,0 \text{ V}}{1,5 \Omega} = 6,0 \text{ A}$ ja

sähköteho $P = RI^2 = 1,5 \Omega \cdot (6,0 \text{ A})^2 = 54 \text{ W}$.

d) Sähkövirta on $I = \frac{U}{R} = \frac{9,0 \text{ V}}{7,0 \Omega} = 1,2857 \text{ A} \approx 1,3 \text{ A}$ ja

sähköteho $P = RI^2 = 7,0 \Omega \cdot (1,2857 \text{ A})^2 \approx 12 \text{ W}$.

Kohdan c) lampun teho on suurin ja lamppu palaa kirkkaimmin.

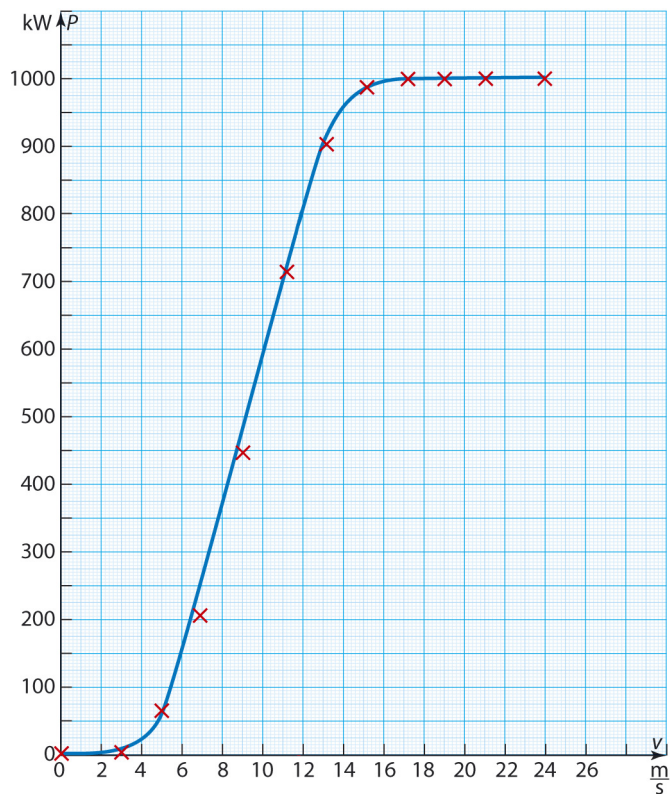
7-5. Säästö on $1\,000 \text{ kW} \cdot 0,14 \text{ €/kWh} = 140 \text{ €}$.

- 7-6. Digiboksin sähköteho on $1,5 \text{ W} = 0,0015 \text{ kW}$. Koska televisiota käytetään 3 tuntia vuorokaudessa, on digiboksi valmiustilassa 21 tuntia vuorokaudessa ja vuodessa $365 \cdot 21 \text{ h}$. Digiboksin vuodessa käyttämä energia kilowattitunteina on

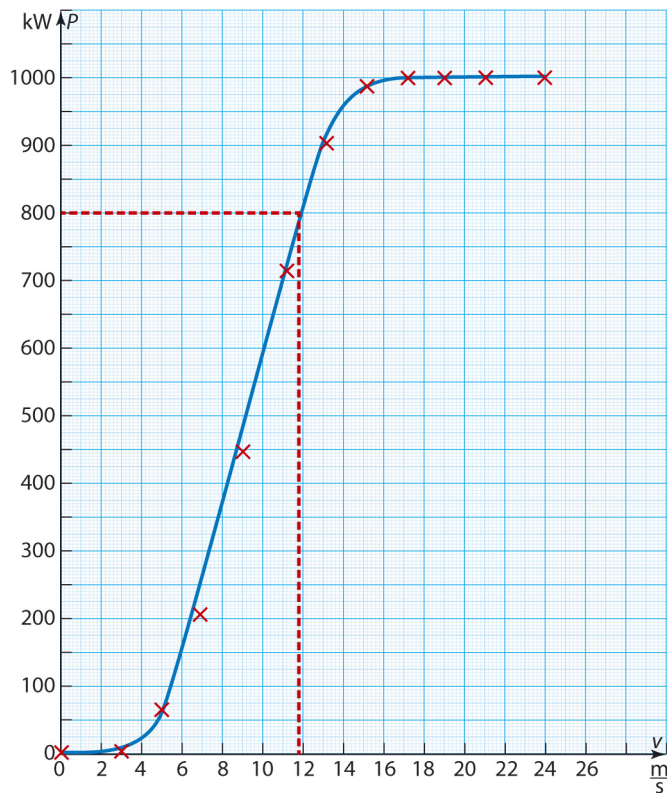
$$E = Pt = 0,0015 \text{ kW} \cdot 365 \cdot 21 \text{ h} \approx 11,4975 \text{ kWh}.$$

Kustannukset vuodessa ovat $11,4975 \text{ kWh} \cdot 0,14 \text{ €/kWh} \approx 1,6 \text{ €}$.

- 7-7. a) Voimalaitoksen teho P riippuu tuulen nopeudesta v kuvaajan mukaisesti.



b)



Kuvaajan mukaan tehoa $P = 800$ kW vastaavaksi tuulen nopeudeksi saadaan $v \approx 12$ m/s.

c) Voimalaitoksen keskimääräinen teho vuonna 2006 oli

$$P_k = \frac{E}{t} = \frac{2517 \text{ MWh}}{365 \cdot 24 \text{ h}} = 0,2873 \text{ MW} \approx 290 \text{ kW}.$$

7-8. Veden nostamiseksi tehtävä työ on $E_p = mgh$ ja pumpun tekemä työ $E_{\text{pumppu}} = \eta Pt$.

Yhtälöstä $\eta Pt = mgh$ eli $\eta UIt = mgh$ pumpussa kulkevaksi sähkövirraksi saadaan

$$I = \frac{mgh}{\eta Ut} = \frac{15 \cdot 10^3 \text{ kg} \cdot 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 15 \text{ m}}{0,65 \cdot 395 \text{ V} \cdot 30 \cdot 60 \text{ s}} \approx 4,8 \text{ A}.$$

7-9. Vedenlämmitin ottaa sähköverkosta energian $E_{\text{otto}} = Pt$. Vedenlämmittimen vedelle antama energia on $E_{\text{tuotto}} = cm\Delta T$. Koska hyötysuhde on $\eta = \frac{E_{\text{tuotto}}}{E_{\text{otto}}}$, saadaan yhtälö

$$\eta E_{\text{otto}} = E_{\text{tuotto}} \text{ eli } \eta Pt = cm\Delta T.$$

$$\text{Veden massa on } m = \frac{\eta Pt}{c\Delta T} = \frac{0,85 \cdot 350 \text{ W} \cdot 15 \cdot 60 \text{ s}}{4,19 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}} \cdot 100 \text{ K}} \approx 640 \text{ g}.$$

7-10. Uppokuumennin ottaa sähköverkosta energian $E_{\text{otto}} = Pt$. Kuumentimen jälle antama energia on $E_{\text{tuotto}} = sm$. Koska hyötysuhde on $\eta = \frac{E_{\text{tuotto}}}{E_{\text{otto}}}$, saadaan yhtälö

$$\eta E_{\text{otto}} = E_{\text{tuotto}} \text{ eli } \eta Pt = sm. \text{ Sulatusaika on } t = \frac{sm}{\eta P} = \frac{333 \text{ kJ/kg} \cdot 1,0 \text{ kg}}{0,88 \cdot 1,0 \text{ kW}} \approx 380 \text{ s}.$$

7-11. a) Kyllä.

b) Kyllä.

c) Ei. Sähköteho kertoo, kuinka tehokkaasti laite muuntaa energiaa muodosta toiseen.

d) Ei. Laitteen sähköteho lasketaan kertomalla laitteen jännitehäviö laitteen läpi kulkevan sähkövirran suuruudella.

e) Kyllä.

7-12. a) Sähkötehon yhtälöstä $P = UI$ sähkövirta on $I = \frac{P}{U} = \frac{60 \text{ W}}{230 \text{ V}} = 0,260870 \text{ A} \approx 0,26 \text{ A}$.

Vastuksen resistanssi on $R = \frac{U}{I} = \frac{230 \text{ V}}{0,260870 \text{ A}} \approx 880 \Omega$.

b) Sähkötehon yhtälö $P = UI$ saadaan muotoon $P = \frac{U^2}{R}$, josta jännite on

$$U = \sqrt{PR} = \sqrt{0,50 \text{ W} \cdot 5,0 \cdot 10^3 \Omega} = 50 \text{ V}.$$

7-13. Sähköteho $P = UI$ saadaan muotoon $P = \frac{U^2}{R}$, josta kihartimen resistanssi on

$$R = \frac{U^2}{P} = \frac{(230 \text{ V})^2}{20 \text{ W}} = 2645 \Omega.$$

Oletetaan, että kihartimen resistanssi pysyy likimain yhtä suurena.

Kun jännite on 110 V, kihartimen sähköteho on $P = \frac{U^2}{R} = \frac{(110 \text{ V})^2}{2645 \Omega} \approx 4,6 \text{ W}$.

Väite pitää paikkansa.

7-14. a) Sähköteho on $P = UI = 230 \text{ V} \cdot 4,8 \text{ A} = 1104 \text{ W} \approx 1,1 \text{ kW}$.

b) Kulutettu energia on $E = Pt = 1,104 \text{ kW} \cdot 0,5 \text{ h} \approx 0,55 \text{ kWh}$.

7-15. a) Levyjen sähköteho on $P = UI$, josta vastuksissa kulkeva sähkövirta on $I = \frac{P}{U}$.

Kytkimen asennossa 1 sähkövirta on

$$I_1 = \frac{P_1}{U} = \frac{210 \text{ W}}{230 \text{ V}} = 0,913043 \text{ A} \approx 0,91 \text{ A} \text{ ja}$$

asennossa 6 virta on $I_6 = \frac{P_6}{U} = \frac{1300 \text{ W}}{230 \text{ V}} = 5,65217 \text{ A} \approx 5,7 \text{ A}$.

b) Vastussysteemin resistanssi asennossa 1 on

$$R_1 = \frac{U}{I_1} = \frac{230 \text{ V}}{0,913043 \text{ A}} \approx 250 \Omega \text{ ja}$$

asennossa 6 on

$$R_6 = \frac{U}{I_6} = \frac{230 \text{ V}}{5,65217 \text{ A}} \approx 41 \Omega.$$

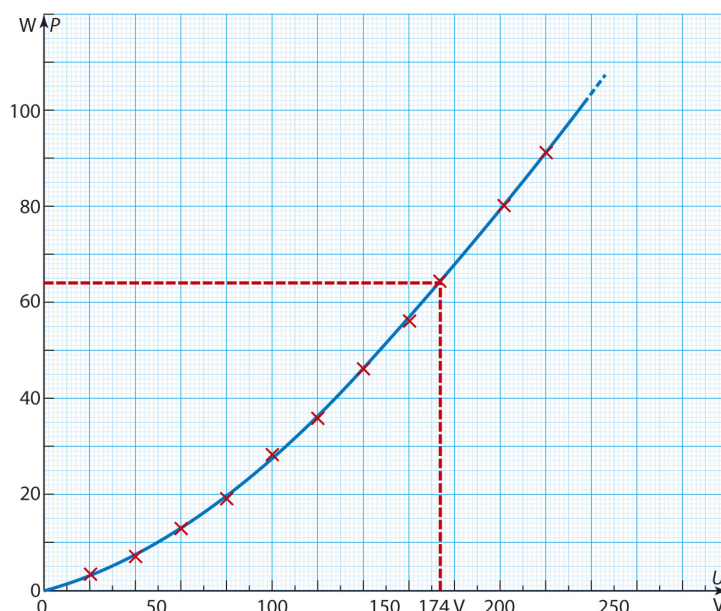
Resistanssiksi saadaan 250Ω , kun kytketään sarjaan vastukset, joiden resistanssit ovat 100Ω ja 150Ω .

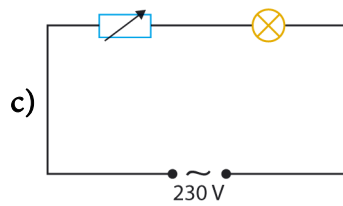
Resistanssiksi saadaan 40Ω , kun kaikki kolme vastusta kytketään rinnan.

7-16. a) Hehkulampun lämpötila voi muuttua esimerkiksi 3000°C sähkövirran kasvaessa, kun jännite kasvaa 240 V :n arvoon. Näin suuri lämpötilan muutos kasvattaa resistanssia merkittävästi. Koska sähkövirta on $I = U/R$, sähkövirran kasvu hidastuu sitä enemmän, mitä suurempi resistanssi ja mitä korkeampi jännite on, joten I, U -kuvaaja kaartuu kuvan mukaisesti.

b) Poimitaan annetusta kuvaajasta U, I -arvopareja ja lasketaan taulukkoon (oheisessa taulukossa vain muutamia esimerkkejä) lampun kuluttamia sähkötehon arvoja $P = UI$. Piirretään kuvaaja U, P -koordinaatistoon.

$U(\text{V})$	$I(\text{A})$	$P(\text{W})$
20	0,130	2,60
60	0,215	12,9
100	0,278	27,8
200	0,396	79,0
240	0,435	104,4





Kytetään säädettävä etuvastus oheisen kuvion mukaisesti, ja säädetään vastuksen arvo niin, että lamppu kuluttaa 65 W tehon. Edellä kohdassa b piirretyn kuvaajan mukaan lampun teho on 65 W, kun jännite on 174 V. Tehtävässä annetun kuvaajan mukaan sähkövirta on tällöin 0,365 A. Kun laite on kytketty 230 V:n verkkojännitteeseen, etuvastuksen jännitehäviö on $230\text{ V} - 174\text{ V} = 56\text{ V}$.

Etuvastuksen resistanssi on $R = \frac{U}{I} = \frac{56\text{ V}}{0,365\text{ A}} \approx 150\ \Omega$.

TEHTÄVIEN RATKAISUT

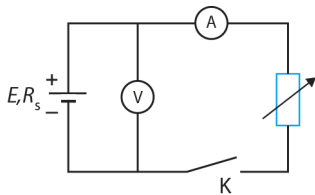
- 8-1.** a) Kuvaajan ja U -akselin leikkauskohdasta saadaan pariston lähdejännite: $E = 1,6 \text{ V}$.

Koska kuvaaja esittää I, U -koordinaatistoon piirrettyä pariston kuormituskäyrää, pariston sisäinen resistanssi saadaan fysikaalisen kulmakertoimen itseisarvona:

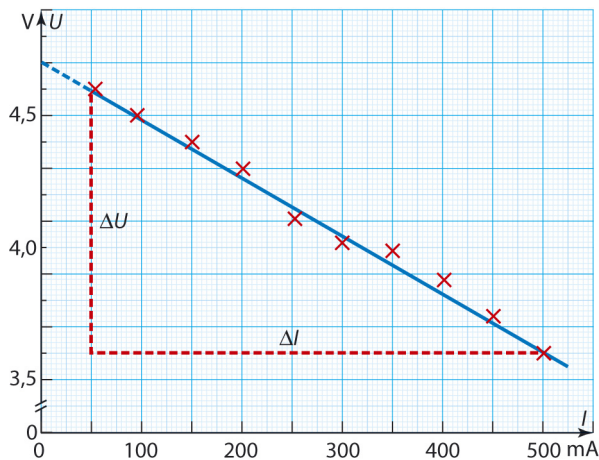
$$R_s = \left| \frac{\Delta U}{\Delta I} \right| = \left| \frac{1,00 \text{ V} - 1,60 \text{ V}}{0,45 \text{ A} - 0,00 \text{ A}} \right| = \frac{0,60 \text{ V}}{0,45 \text{ A}} \approx 1,3 \Omega.$$

b) Suuri sisäinen resistanssi aiheuttaa suuren jännitehäviön pariston sisällä. Siksi paristoon kytketyssä ulkoisessa kuormassa tapahtuu pienempi jännitehäviö verrattuna sellaiseen paristoon, jonka sisäinen resistanssi on pienempi. Suuri sisäinen resistanssi aiheuttaa myös suuremman tehohäviön paristossa.

- 8-2.** Mittaukseen sopiva kytkentä:



Esitetään mittaustulokset I, U -koordinaatistossa.



I, U -kuvaajan fysikaalisen kulmakertoimen itseisarvo on pariston sisäinen resistanssi:

$$R_s = \left| \frac{\Delta U}{\Delta I} \right| = \left| \frac{3,61 \text{ V} - 4,60 \text{ V}}{0,500 \text{ A} - 0,050 \text{ A}} \right| \approx 2,2 \Omega.$$

Lähdejännite E saadaan ekstrapoloimalla kuvaajan ja U -akselin leikkauskohdasta: $E = 4,7 \text{ V}$.

- 8-3.** Sähköparin napajännite on $U = RI = 10,0\Omega \cdot 0,12\text{ A} = 1,2\text{ V}$. Napajännitteen yhtälöstä $U = E - R_s I$ sähköparin sisäiseksi resistanssiksi saadaan

$$R_s = \frac{E - U}{I} = \frac{1,5\text{ V} - 1,2\text{ V}}{0,12\text{ A}} = 2,5\Omega.$$

Oikosulussa paristoa kuormittaa vain sen sisäinen resistanssi, jolloin napajännite $U = 0\text{ V}$.

Oikosulkuvirta on

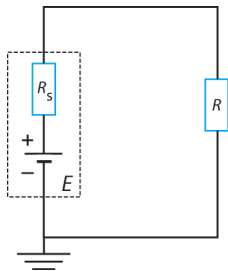
$$I_0 = \frac{E}{R_s} = \frac{1,5\text{ V}}{2,5\Omega} = 0,60\text{ A}.$$

- 8-4.** a) Akun napajännite on $U = E - R_s I = 12,0\text{ V} - 12 \cdot 10^{-3}\Omega \cdot 110\text{ A} = 10,68\text{ V} \approx 11\text{ V}$.

b) Käynnistysmoottorin resistanssi on

$$R_{\text{käynnistysmoottori}} = \frac{U}{I} = \frac{10,68\text{ V}}{110\text{ A}} \approx 97\text{ m}\Omega.$$

- 8-5.** a) Kytkenäkaavio:



b) Pariston lähdejännite on

$$E = R_s I + IR = I(R_s + R).$$

Piirissä kulkeva sähkövirta on

$$I = \frac{E}{R_s + R} = \frac{4,5\text{ V}}{0,65\Omega + 22\Omega} \approx 0,198675\text{ A}.$$

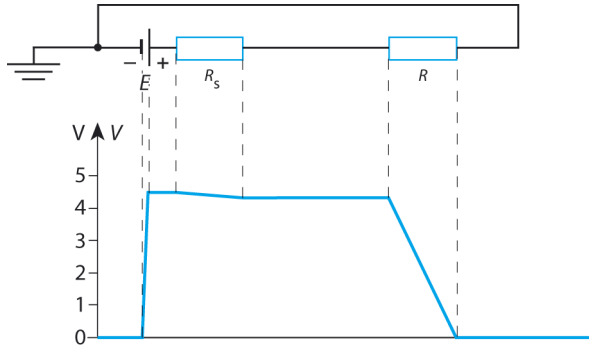
Pariston napajännite on

$$U = E - R_s I = 4,5\text{ V} - 0,65\Omega \cdot 0,198675\text{ A} \approx 4,4\text{ V}.$$

Jännitehäviö vastuksessa on

$$U = RI = 22\Omega \cdot 0,198675\text{ A} \approx 4,4\text{ V}.$$

Maadoitetaan pariston negatiivinen napa.



8-6. Kaikki lamput palavat yhtä kirkkaasti, koska jokaisen lampun jännitehäviö on sama.

8-7. a) Jos toinen akku on täysin tyhjä, sen jännite on 0 V. Sähkövirta on

$$I = \frac{U}{2R_s} = \frac{12\text{ V}}{2 \cdot 0,052\Omega} \approx 120\text{ A}.$$

b) Kytkenä aiheuttaa oikosulun. Samalla voi esiintyä kipinöintiä. On myös mahdollista, että tällöin akusta vapautuva vetykaasu voi räjähtää.

8-8. a) Kirchhoffin II lain mukaan suljetussa virtapiirissä potentiaali muutosten summa on nolla eli $\sum \Delta V = 0$. Kierretään suljettu virtapiiri sähkövirran suunnassa myötäpäivään lähtien vasemmanpuoleisen pariston negatiivisesta navasta. Saadaan yhtälö

$$E_1 - R_{s1}I + E_2 - R_{s2}I - RI = 0 \text{ eli } E_1 + E_2 = R_{s1}I + R_{s2}I + RI.$$

$$\text{Piirissä kulkeva sähkövirta on } I = \frac{E_1 + E_2}{R_{s1} + R_{s2} + R} = \frac{1,5\text{ V} + 1,5\text{ V}}{2,5\Omega + 2,2\Omega + 10,0\Omega} = 0,204082\text{ A} \approx 0,20\text{ A}.$$

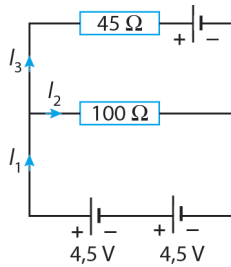
Molempien paristojen läpi kulkee tämä sama virta.

b) Kun kytkin suljetaan, napajännitteet ovat

$$U_1 = E_1 - R_{s1}I = 1,5\text{ V} - 2,5\Omega \cdot 0,204082\text{ A} \approx 0,99\text{ V} \text{ ja}$$

$$U_2 = E_2 - R_{s2}I = 1,5\text{ V} - 2,2\Omega \cdot 0,204082\text{ A} \approx 1,1\text{ V}.$$

8-9. Merkitään sähkövirtoja kuvan mukaisesti.



Kirchhoffin lakien perusteella saadaan yhtälöt

$$I_1 = I_2 + I_3$$

$$4,5 \text{ V} + 4,5 \text{ V} - 45 \, \Omega \cdot I_3 - 1,5 \text{ V} = 0$$

$$4,5 \text{ V} + 4,5 \text{ V} - 100 \, \Omega \cdot I_2 = 0$$

Alimmasta yhtälöstä $4,5 \text{ V} + 4,5 \text{ V} - 100 \, \Omega \cdot I_2 = 0$ saadaan sähkövirta

$$I_2 = \frac{9,0 \text{ V}}{100 \, \Omega} = 0,090 \text{ A} = 90 \text{ mA}.$$

Keskimmäisestä yhtälöstä $4,5 \text{ V} + 4,5 \text{ V} - 45 \, \Omega \cdot I_3 - 1,5 \text{ V} = 0$ saadaan

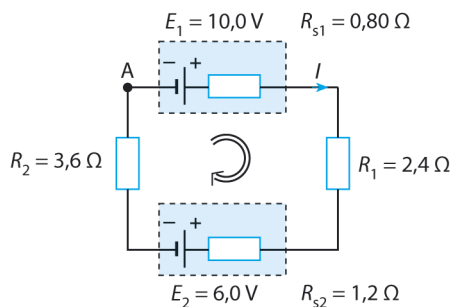
$$I_3 = \frac{4,5 \text{ V} + 4,5 - 1,5 \text{ V}}{45 \, \Omega} = 166,667 \text{ mA} \approx 170 \text{ mA}.$$

Ylimmästä yhtälöstä $I_1 = I_2 + I_3$ saadaan

$$I_1 = I_2 + I_3 = 90 \text{ mA} + 166,667 \text{ mA} \approx 260 \text{ mA}.$$

Jännitehäviö $45 \, \Omega$:n vastuksessa on $U_3 = RI_3 = 45 \, \Omega \cdot 166,667 \text{ mA} \approx 7,5 \text{ V}$.

8-10. a) Oletetaan, että sähkövirran suunta on myötäpäivään piirroksen mukaisesti.



Kierretään virtapiiri myötäpäivään lähtien pisteestä A. Kirchhoffin II lain mukaan on

$$\sum \Delta V = 0 \text{ eli } E_1 - R_{s1}I - R_1I - E_2 - R_{s2}I - R_2I = 0.$$

Ratkaistaan yhtälöstä sähkövirta:

$$E_1 - E_2 = I(R_{s1} + R_1 + R_{s2} + R_2)$$

$$I = \frac{E_1 - E_2}{R_{s1} + R_1 + R_{s2} + R_2} = \frac{10,0 \text{ V} - 6,0 \text{ V}}{0,80 \Omega + 2,4 \Omega + 1,2 \Omega + 3,6 \Omega} = 0,50 \text{ A}.$$

Sähkövirta on 0,50 A.

b) Jännitelähteen napajännite saadaan jännitelähteessä tapahtuvana potentiaalin muutoksena tarkastelusuunnassa:

$$U_1 = E_1 - R_{s1}I = 10,0 \text{ V} - 0,80 \Omega \cdot 0,50 \text{ A} = 9,6 \text{ V}$$

$$U_2 = -R_{s2}I - E_2 = -1,2 \Omega \cdot 0,50 \text{ A} - 6,0 \text{ V} = -6,6 \text{ V}.$$

Jännitelähteiden napajännitteet ovat 9,6 V ja -6,6 V.

Napajännite U_2 on negatiivinen, koska kyseinen jännitelähde on kytketty tarkastelusuunnassa kuljettaessa vastakkaiseen suuntaan kuin ylempi jännitelähde. Napajännitteeltään negatiivinen jännitelähde latautuu; jännitelähde U_1 lataa lähdettä U_2 .

TESTAA, OSAATKO S. 83

1. a c 2. a b c 3. a b c 4. a 5. c 6. a c 7. a b c 8. a b 9. a c 10. a b 11. b c 12. c

TEHTÄVIEN RATKAISUT

- 9-1.** a) Kun ilmapalloa hangataan seinään, elektronit siirtyvät pintojen hankauksessa. Toinen pinta luovuttaa elektroneja ja toinen ottaa vastaan. Seinä ja pallo varautuvat erimerkkisesti, joten ne vetävät toisiaan puoleensa. Hankaavien pintojen materiaaleista riippuu se, kumpi luovuttaa elektroneja ja kumpi ottaa vastaan.
- b) Hankautuessa esineet voivat varautua sähköisesti. Keho ja vaatteet voivat varautuvat sähköisesti esimerkiksi villamatolla kävellessä tai tekokuituisia vaatteita riisuttaessa. Talvella sisäilma on usein kuivaa ja silloin sähkövaraukset eivät purkaudu nopeasti itsestään suoraan ilmaan. Kehossa oleva ylimääräinen sähkövaraus purkautuu sähköiskuna esimerkiksi metallista ovenkahvaa kosketettaessa. Kesällä ilma on kosteampaa kuin talvella ja silloin sähkövaraukset purkautuvat (tasoittuvat) helpommin itsestään eikä sähköiskuja synny niin helposti. Samasta syystä opettajan sähkökipinöihin liittyvät demonstraatiot ovat näyttävämpiä talvella.
- c) Varaa lasisauva muovipussilla. Tiedetään, että lasisauvan sähkövaraus on tällöin positiivinen. Jos lasisauva vetää kammattuja hiuksia puoleensa, hiukset ovat negatiivisesti varatut, joten hiukset ottivat vastaan elektroneja. Jos lasisauva hylkii kammattuja hiuksia, lasisauva ja hiukset ovat positiivisesti varatut eli hiukset luovuttivat elektroneja.
- 9-2.** a) Auton kori voi saada ajettaessa ilman hankauksen takia sähkövarauksen. Autosta poistuessasi sähkövaraus voi purkautua kauttasi korista maahan, jolloin tunnet purkauksen sähköiskuna. Sähkövaraus ei pääse purkautumaan auton pyörien kautta, koska renkaiden kumi on eriste. Myös vaatteiden hankaus auton penkkeihin voi aiheuttaa samanlaisen ilmiön autosta poistuttaessa.

b) Säiliöautoon voi muodostua hankaussähköä ilman virtauksesta. Kun käytetään auton alle asennettua maadoitusjohdinta, sähkövaraukset pääsevät paremmin purkautumaan maahan, eikä synny kipinöintiin liittyviä vaaratilanteita esimerkiksi huoltoasemilla.

9-3. Kappaleen sähkövaraus on negatiivinen, jos hohtolampussa valo välähtää kappaleen puoleisessa kohtiossa. Hohtolampussa valo näkyy sen kohtion luona, josta kohtion (metallilangan) elektronit irtoavat. Kuvassa elektronit irtoavat lähempänä palloa olevasta kohtiosta, joten metallipallo kohdistaa elektroneihin hylkivän voiman. Näin ollen metallipallo on negatiivisesti varattu.

9-4. a) Jos välähdys näkyy vastakkaisessa kohtiossa lasisauvaan nähden, kappaleen sähkövaraus on positiivinen. Jos hohtolampulla kosketaan sähköisesti varattua lasisauvaa, elektronit irtoavat lampun vastakkaisesta päästä. Elektronit siirtyvät sieltä kohti sauvaa. Tällöin metallilangan luona näkyy valon välähdys, kun elektronit törmäävät kaasun rakennehiukkasiin. Lasisauva vetää elektroneja puoleensa ja on siis positiivisesti varattu.

b) Jos hohtolampulla kosketaan sähköisesti varattua eboniittisauvaa, valo välähtää elektronien irrottua lampun sauvan puoleisessa päässä. Sauva siis hylkii sähkövaraukseltaan negatiivisia elektroneja, joten eboniittisauva on negatiivisesti varattu.

9-5. Sähkövirta on $I = \frac{Q}{t}$, joten latausaika on $t = \frac{Q}{I}$.

a) Latausaika on

$$t = \frac{Q}{I} = \frac{1860 \text{ mAh}}{1,0 \text{ A}} = \frac{1,86 \text{ Ah}}{1,0 \text{ A}} = 1,86 \text{ h}.$$

$0,86 \text{ h} = 0,86 \cdot 60 \text{ min} = 51,6 \text{ min}$. Latausaika on likimain 1 h 50 min.

b) Latausaika on

$$t = \frac{Q}{I} = \frac{1860 \text{ mAh}}{60 \text{ mA}} = \frac{1860 \text{ mAh}}{60 \text{ mA}} = 31 \text{ h.}$$

9-6. Aluksi metallipintaiset kevyet pallot ovat lieriön pohjalla, joka on yhdistetty nauhageneraattorin palloon. Kevyet pallot koskettavat myös toisiaan. Kun generaattorin pallo varataan sähköisesti, kaikki kevyet pallot varautuvat samanmerkkiseksi kuin generaattorin pallo. Samanmerkkisesti varautuneet pienet pallot ja generaattorin pallo hylkivät toisiaan, joten kevyet pallot leijuvat.

9-7. a) Jos rauta-atomi menettää kolme elektronia, siitä tulee positiivisesti varattu rautaioni, jota merkintä Fe^{3+} tarkoittaa. Jos happiatomi saa kaksi elektronia, siitä tulee negatiivisesti varattu happi-ioni O^{2-} .

b) Ionin Fe^{3+} sähkövaraus on $3e = 3 \cdot 1,60218 \cdot 10^{-19} \text{ C} \approx 4,8 \cdot 10^{-19} \text{ C}$.

Ionin O^{2-} sähkövaraus on $2 \cdot (-e) = -2 \cdot 1,60218 \cdot 10^{-19} \text{ C} = -3,2 \cdot 10^{-19} \text{ C}$.

9-8. a) Kappaleen sähkövaraus on $Q = \pm ne$, josta

$$n = \frac{Q}{-e} = \frac{-4,2 \cdot 10^{-9} \text{ C}}{-1,60218 \cdot 10^{-19} \text{ C}} \approx 2,6 \cdot 10^{10},$$

eli kappaleessa on $2,6 \cdot 10^{10}$ ylimääräistä elektronia.

b) Kappaleen sähkövaraus on $Q = ne$, josta

$$n = \frac{Q}{e} = \frac{9,5 \cdot 10^{-12} \text{ C}}{1,60218 \cdot 10^{-19} \text{ C}} \approx 5,9 \cdot 10^7, \text{ eli kappaleessa on } 5,9 \cdot 10^7 \text{ n}$$

elektronin vajoaus.

c) 1,0 miljardin elektronin sähkövaraus on

$$1,0 \cdot 10^9 \cdot (-e) = -1,0 \cdot 10^9 \cdot 1,602178 \cdot 10^{-19} \text{ C} \approx -0,16 \cdot 10^{-9} \text{ C}.$$

Kun pallosta poistetaan elektroneja, pallon sähkövaraus on positiivinen 0,16 nC.

9-9. Elektronit siirtyvät kahden samanlaisen metallipallon välillä, kunnes molemmissa palloissa on yhtä suuri sähkövaraus.

a) Pallojen sähkövaraukset yhdistämisen jälkeen ovat $\frac{-10 \text{ nC} + 10 \text{ nC}}{2} = 0 \text{ nC}.$

Elektronit siirtyvät pallosta A palloon B.

b) Pallojen sähkövaraukset yhdistämisen jälkeen ovat $\frac{-12,0 \text{ nC} + 17,0 \text{ nC}}{2} = 2,5 \text{ nC}.$

Elektronit siirtyvät pallosta A palloon B.

c) Pallojen sähkövaraukset yhdistämisen jälkeen ovat $\frac{-10 \text{ nC} + 2 \text{ nC}}{2} = -4 \text{ nC}.$

Elektronit siirtyvät pallosta A palloon B.

d) Pallojen sähkövaraukset yhdistämisen jälkeen ovat $\frac{-10 \text{ nC} + 0 \text{ nC}}{2} = -5 \text{ nC}.$

Elektronit siirtyvät pallosta B palloon A.

TEHTÄVIEN RATKAISUT

10-1. Kuvassa c sähköiset voimat on piirretty oikein. Kaksi negatiivisesti varattua hiukkasta kohdistavat toisiinsa hylkivät voimat. Kahden kappaleen vuorovaikutuksessa kappaleiden toisiinsa kohdistamat voimat ovat yhtä suuria ja vastakkaissuuntaisia.

10-2. a) Coulombin voiman suuruus on

$$F = k \frac{Q_1 Q_2}{r^2} = 8,98755 \cdot 10^9 \frac{\text{Nm}^2}{\text{C}^2} \cdot \frac{2,0 \cdot 10^{-6} \text{ C} \cdot 5,0 \cdot 10^{-6} \text{ C}}{(1,5 \text{ m})^2} = 0,03994 \text{ 47 N} \approx 0,040 \text{ N}.$$

b) Coulombin voiman suuruus on

$$F = k \frac{Q_1 Q_2}{r^2} = 8,98755 \cdot 10^9 \frac{\text{Nm}^2}{\text{C}^2} \cdot \frac{2,0 \cdot 10^{-6} \text{ C} \cdot 5,0 \cdot 10^{-6} \text{ C}}{(3,0 \text{ m})^2} = 0,00998 \text{ 617 N} \approx 0,010 \text{ N}.$$

c) Voimien suuruuksien suhde on $\frac{0,03994 \text{ 47 N}}{0,00998 \text{ 617 N}} \approx 4,0$.

Pallojen toisiinsa kohdistaman voiman suuruus pienenee neljäsosaan, kun välimatka kasvaa kaksinkertaiseksi.

10-3. a) Pallojen välisen Coulombin voiman suuruus tyhjiössä on

$$F = k \frac{Q_1 Q_2}{r^2} = 8,98755 \cdot 10^9 \frac{\text{Nm}^2}{\text{C}^2} \cdot \frac{4,5 \cdot 10^{-3} \text{ C} \cdot 4,5 \cdot 10^{-3} \text{ C}}{(2,5 \text{ m})^2} \approx 29 \text{ kN}.$$

Voima on hylkimisvoima.

b) Pallojen välisen Coulombin voiman suuruus ilmassa on

$$F = \frac{k}{\epsilon_{r, \text{ ilma}}} \frac{Q_1 Q_2}{r^2} = \frac{8,98755 \cdot 10^9 \text{ Nm}^2 / \text{C}^2}{1,0006} \cdot \frac{4,5 \cdot 10^{-3} \text{ C} \cdot 4,5 \cdot 10^{-3} \text{ C}}{(2,5 \text{ m})^2} \approx 29 \text{ kN}.$$

Voima on hylkimisvoima.

c) Pallojen välisen Coulombin voiman suuruus vedessä on

$$F = \frac{k}{\epsilon_{r, \text{vesi}}} \frac{Q_1 \cdot Q_2}{r^2} = \frac{8,98755 \cdot 10^9 \text{ Nm}^2 / \text{C}^2}{81} \cdot \frac{4,5 \cdot 10^{-3} \text{ C} \cdot 4,5 \cdot 10^{-3} \text{ C}}{(2,5 \text{ m})^2} \approx 360 \text{ N}.$$

Voima on hylkimisvoima.

d) Lasketaan kuinka moninkertainen voima ilmassa on verrattuna voimaan vedessä.

$$\frac{F_{\text{ilma}}}{F_{\text{vesi}}} = \frac{\frac{k}{\epsilon_{r, \text{ilma}}} \frac{Q_1 Q_2}{r^2}}{\frac{k}{\epsilon_{r, \text{vesi}}} \frac{Q_1 Q_2}{r^2}} = \frac{\epsilon_{r, \text{vesi}}}{\epsilon_{r, \text{ilma}}} = \frac{81}{1,0006} \approx 81\text{-kertainen}.$$

10-4. Sähköisen vetovoiman suuruus on Coulombin lain mukaan

$$F = k \frac{Q_1 \cdot Q_2}{r^2} = k \frac{e^2}{r^2} = 8,98755 \cdot 10^9 \frac{\text{Nm}^2}{\text{C}^2} \cdot \frac{(1,60218 \cdot 10^{-19} \text{ C})^2}{(5 \cdot 10^{-11} \text{ m})^2} \approx 9 \cdot 10^{-8} \text{ N}.$$

10-5. Kumpaankin palloon kohdistuvan Coulombin voiman suuruus on

$$F = \frac{k}{\epsilon_r} \frac{Q_1 Q_2}{r^2}.$$

Toisen pallon sähkövarauksen suuruudeksi saadaan

$$Q_1 = \frac{F r^2}{k Q_2} = \frac{19 \cdot 10^{-3} \text{ N} \cdot (0,17 \text{ m})^2}{8,98755 \cdot 10^9 \text{ Nm}^2 / \text{C}^2 \cdot 2,5 \cdot 10^{-6} \text{ C}} \approx 24 \text{ nC}.$$

Koska pallojen välillä on vetovoima ja sähkövaraus $2,5 \mu\text{C}$ on positiivinen, sähkövarauksen Q_1 on oltava negatiivinen eli toinen sähkövaraus on -24 nC .

- 10-6.** Kun kuulat yhdistetään, sähkövaraus jakautuu tasan kummankin kuulan osalle, koska kuulat ovat samanlaiset.

Kummankin kuulan varaus yhdistämisen jälkeen on

$$\frac{18\text{ nC} + (-8,0\text{ nC})}{2} = 5,0\text{ nC}.$$

Kuulien välisen Coulombin voiman suuruus yhdistämisen jälkeen on

$$F = k \frac{Q_1 Q_2}{r^2} = 8,98755 \cdot 10^9 \text{ Nm}^2 / \text{C}^2 \cdot \frac{5,0\text{ nC} \cdot 5,0\text{ nC}}{(0,18\text{ m})^2} \approx 6,9\text{ }\mu\text{N}.$$

Voima on hylkimisvoima.

- 10-7.** a) Koska pallot ovat samanmerkkisiä, ne hylkivät toisiaan toistensa läheisyydessä.

b) Sähköisen hylkimisvoiman suuruus on Coulombin lain mukaan

$$F = \frac{k}{\epsilon_{r, \text{ ilma}}} \frac{Q_1 Q_2}{r^2} = \frac{8,98755 \cdot 10^9 \text{ Nm}^2 / \text{C}^2}{1,0006} \cdot \frac{22 \cdot 10^{-9} \text{ C} \cdot 22 \cdot 10^{-9} \text{ C}}{(0,50\text{ m})^2} \approx 17,3895 \cdot 10^{-6} \text{ N}.$$

Newtonin II lain mukaan pallon B saaman kiihtyvyyden suuruus on

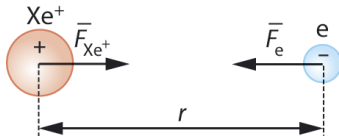
$$a = \frac{F}{m} = \frac{17,3895 \cdot 10^{-6} \text{ N}}{0,0022 \text{ kg}} \approx 7,9 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}^2.$$

Kiihtyvyyden suunta on poispäin pallosta A. Huomaa, että paino aiheuttaa ilmapalloon edellä laskettua suuremman putoamiskiihtyvyyden, mutta sitä ei oteta huomioon.

- 10-8.** Ioni-moottorin toiminta perustuu esimerkiksi ksenon-atomien ionisoimiseen elektronipommituksen avulla. Moottori kohdistaa ioneihin hylkivän voiman, jolloin ionit poistuvat moottorista ja avaruusaluksesta hyvin suurella nopeudella. Voiman ja vastavoimanlain mukaisesti ionit kohdistavat avaruusalukseen voiman, joka on vastakkaissuuntainen kuin ionien oma liike. Näin avaruusalus joutuu kiihtyvään liikkeeseen.

Ionimoottorin aiheuttama avaruusaluksen kiihtyvyys on pieni, mutta pitkän ajan kuluessa avaruusaluksen nopeus kasvaa suureksi. Ionimoottorin tarvitsema energia saadaan aurinkopaneeleista.

- 10-9. a)** Koska hiukkasten varaukset ovat erimerkkiset, hiukkasten välillä on vetovoima.



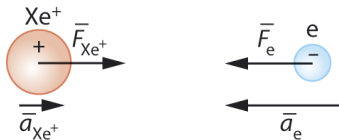
Voiman ja vastavoiman lain perusteella hiukkaset kohdistavat toisiinsa yhtä suuret Coulombin voimat.

Coulombin voiman suuruus on

$$\begin{aligned}
 F_e = F_{Xe^+} &= k \frac{Q_e \cdot Q_{Xe^+}}{r^2} = k \frac{e^2}{r^2} \\
 &= 8,98755 \cdot 10^9 \frac{\text{Nm}^2}{\text{C}^2} \cdot \frac{(1,60218 \cdot 10^{-19} \text{ C})^2}{(1,0 \cdot 10^{-3} \text{ m})^2} \\
 &= 230,708 \cdot 10^{-24} \text{ N} \approx 230 \cdot 10^{-24} \text{ N}.
 \end{aligned}$$

- b)** Newtonin II lain perusteella kappaleen kiihtyvyys on

$\vec{a} = \frac{\vec{F}}{m}$, kun $\vec{F}$ on kappaleeseen kohdistuva voima ja m kappaleen massa.



Ksenon-ionin kiihtyvyys on suuruudeltaan

$$a_{\text{Xe}^+} = \frac{F_{\text{Xe}^+}}{m_{\text{Xe}^+}} = \frac{230,708 \cdot 10^{-24} \text{ N}}{220 \cdot 10^{-27} \text{ kg}} \approx 1,0 \cdot 10^3 \text{ m/s}^2.$$

Kiihtyvyyden suunta on kohti elektronia.

Vastaavasti elektronin kiihtyvyys on suuruudeltaan

$$a_e = \frac{F_e}{m_e} = \frac{230,708 \cdot 10^{-24} \text{ N}}{9,10934 \cdot 10^{-31} \text{ kg}} \approx 250 \cdot 10^6 \text{ m/s}^2.$$

Kiihtyvyyden suunta on kohti ksenonionia.

10-10. a) Pallot varautuvat erimerkkisiksi. Tällöin niiden välille syntyy vetovoima. Pienemmän pallon varsi taipuu, ja pallojen välinen vetovoima voidaan havaita. Kun sähkövaraus purkautuu kipinän mukana, vetovoima heikkenee tai katoaa, ja samalla pienemmän pallon varsi taipuu poispäin isommasta pallosta. Pallot loittonevat toisistaan. Edestakainen liike toistuu, kun pallot vuoroin varautuvat ja vuoroin purkautuvat.

b) Palloihin kohdistuva Coulombin voima on suuruudeltaan

$$F = \frac{k}{\epsilon_r} \frac{Q_1 Q_2}{r^2} = \frac{k}{\epsilon_r} \frac{Q \cdot 4Q}{r^2} = \frac{k}{\epsilon_r} \frac{4Q^2}{r^2}.$$

Ratkaistaan yhtälöstä pienemmän pallon varaus Q :

$$F = \frac{k}{\epsilon_r} \frac{4Q^2}{r^2}$$

$$Q^2 = \frac{F \epsilon_r r^2}{4k}$$

$$Q = \sqrt{\frac{F \epsilon_r r^2}{4k}} = \sqrt{\frac{0,20 \text{ N} \cdot 1,0006 \cdot (0,16 \text{ m})^2}{4,0 \cdot 8,98755 \cdot 10^9 \frac{\text{Nm}^2}{\text{C}^2}}} = 0,377 \text{ 498 } \mu\text{C} \approx 0,38 \mu\text{C}.$$

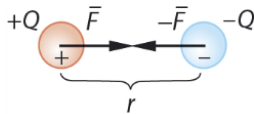
Suuremman pallon varaus on $4,0 \cdot 0,377\,489\,\mu\text{C} \approx 1,5\,\mu\text{C}$.

Koska pallot vetävät toisiaan puoleensa, pallojen varaukset ovat erimerkkisiä.

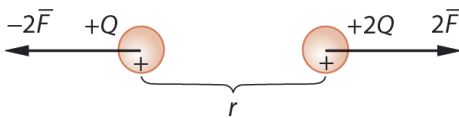
10-11. Coulombin lain mukaan kahden varatun kappaleen toisiinsa kohdistaman sähköisen voiman suuruus on suoraan verrannollinen varausten suuruuteen ja kääntäen verrannollinen varausten väliseen etäisyyteen eli $F = \frac{k}{\epsilon_r} \frac{Q_1 Q_2}{r^2}$.

Samanmerkkiset varaukset hylkivät toisiaan ja erimerkkiset varaukset vetävät toisiaan puoleensa.

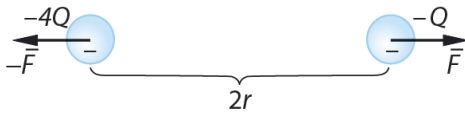
Ylin kuva: Varaukset yhtä suuret, mutta erimerkkiset, siksi puuttuva voima on vastakkaissuuntainen ja yhtä suuri kuin $\bar{F}$.



Keskimmäinen kuva: Kappaleiden välinen etäisyys sama kuin edellisessä kohdassa, mutta toinen varaus on kaksinkertainen, siksi voima myös kaksinkertainen. Koska varaukset saman merkkiset, voimat ovat hylkiviä.



Alimmassa kuvassa kappaleiden välinen etäisyys on kaksinkertainen ja varausten tulo nelinkertainen, joten kappaleisiin kohdistuvat voimat ovat yhtä suuria kuin $\bar{F}$. Koska varaukset ovat samanmerkkiset, voimat ovat hylkiviä.



Toisin: Alimmassa kuvassa voiman suuruus on

$$F_{\text{alin kuva}} = \frac{k}{\epsilon_r} \frac{4Q \cdot Q}{(2r)^2} = \frac{k}{\epsilon_r} \frac{4Q^2}{4r^2} = \frac{k}{\epsilon_r} \frac{Q^2}{r^2} = F.$$

10-12. a) Väärin. Kahden kappaleen vuorovaikutuksessa kappaleet kohdistavat toisiinsa yhtä suuret voimat. Newtonin lait pätevät myös Coulombin voimalle.

b) Oikein. Katso kohta a.

c) Väärin. Newtonin II lain perusteella kappaleen kiihtyvyys on suuruudeltaan $a = F/m$, jossa F on kappaleeseen kohdistuvan kokonaisvoiman suuruus ja m on kappaleen massa. Koska kiihtyvyys on kääntäen verrannollinen massaan, kevyempi kappale saa suuremman kiihtyvyyden, kun voimat ovat yhtä suuret. Näin ollen hiukkasen A kiihtyvyys on suurempi kuin hiukkasen B kiihtyvyys.

d) Oikein. Katso kohta c.

10-13. Coulombin lain $F = \frac{k}{\epsilon_r} \frac{Q_1 Q_2}{r^2}$ mukaan Coulombin voima on suoraan verrannollinen kappaleiden varauksiin ja kääntäen verrannollinen kappaleiden välisien etäisyyksien neliöön.

Kuvan mukaan kappaleisiin A ja B kohdistuvat voimat ovat

suuruudeltaan $F = \frac{k}{\epsilon_r} \frac{QQ}{r^2} = \frac{k}{\epsilon_r} \frac{Q^2}{r^2}$, kun kappaleiden välinen etäisyys on r . Voimat ovat vetovoimia.

Kappaleisiin C ja D kohdistuvat voimat ovat myös suuruudeltaan F . Koska myös etäisyydet r_{AB} ja r_{CD} ovat yhtä suuret, varaukset ovat suuruudeltaan Q . Koska voimat ovat hylkiviä, varaukset ovat samanmerkkiset esimerkiksi $+Q$ ja $+Q$.

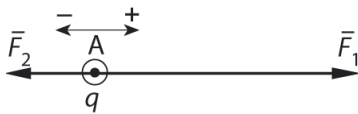
Kappaleiden E ja F välinen etäisyys $r_{EF} = r_{AB}$. Kappaleisiin E ja F kohdistuvat voimat ovat vetäviä ja suuruudeltaan $2F$. Kappaleiden E ja F varaukset ovat erimerkkiset, esimerkiksi $+Q$ ja $-2Q$.

$$\left(F_{EF} = \frac{k}{\epsilon_r} \frac{Q 2Q}{r^2} = 2 \frac{k}{\epsilon_r} \frac{Q^2}{r^2} = 2F \right)$$

Kappaleiden G ja H välinen etäisyys $r_{GH} = \frac{1}{2} r_{AB}$, ja niihin kohdistuvat voimat ovat vetäviä ja suuruudeltaan F . Kappaleiden G ja H varaukset ovat erimerkkiset, esimerkiksi $+Q$ ja $-\frac{1}{4}Q$, sillä

$$\frac{k}{\epsilon_r} \frac{Q \left| -\frac{1}{4}Q \right|}{\left(\frac{1}{2}r \right)^2} = \frac{k}{\epsilon_r} \frac{\frac{1}{4}Q^2}{\frac{1}{4}r^2} = \frac{k}{\epsilon_r} \frac{Q^2}{r^2} = F.$$

10-14.



Varauksesta Q_1 kohdistuu palloon Coulombin voima $\vec{F}_1$ oikealle ja varauksesta Q_2 Coulombin voima $\vec{F}_2$ vasemmalle.

Voima $\vec{F}_1$ on suuruudeltaan

$$F_1 = k \frac{qQ_1}{r_1^2} = 8,98755 \cdot 10^9 \frac{\text{Nm}^2}{\text{C}^2} \cdot \frac{3,0 \cdot 10^{-9} \text{C} \cdot 16 \cdot 10^{-9} \text{C}}{(0,15\text{m})^2} \approx 19,1734 \cdot 10^{-6} \text{N}.$$

Voima $\vec{F}_2$ on suuruudeltaan

$$F_2 = k \frac{qQ_2}{r_2^2} = 8,98755 \cdot 10^9 \frac{\text{Nm}^2}{\text{C}^2} \cdot \frac{3,0 \cdot 10^{-9} \text{ C} \cdot 4,0 \cdot 10^{-9} \text{ C}}{(0,45\text{m})^2} \approx 0,532\,596 \cdot 10^{-6} \text{ N}.$$

Suunta oikealle on positiivinen, joten sähköinen voima on suuruudeltaan

$F_{\text{kok}} = 19,1734 \cdot 10^{-6} \text{ N} - 0,532596 \cdot 10^{-6} \text{ N} \approx 19 \cdot 10^{-6} \text{ N}$. Koska voiman F_{kok} arvo on positiivinen kokonaisvoiman suunta on oikealle.

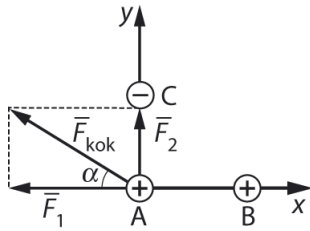
Tapa 2:

Varauksesta Q_1 kohdistuu palloon sähköinen voima $\vec{F}_1$ oikealle ja varauksesta Q_2 sähköinen voima $\vec{F}_2$ vasemmalle. Kohdassa A olevaan palloon kohdistuva sähköinen kokonaisvoima on $\vec{F}_{\text{kok}} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2$. Suunta oikealle on sovittu positiiviseksi, joten palloon kohdistuvan sähköisen kokonaisvoiman suuruus on

$$\begin{aligned} F_{\text{kok}} &= F_1 - F_2 = k \frac{qQ_1}{r_1^2} - k \frac{qQ_2}{r_2^2} = kq \left(\frac{Q_1}{r_1^2} - \frac{Q_2}{r_2^2} \right) \\ &= 8,98755 \cdot 10^9 \frac{\text{Nm}^2}{\text{C}^2} \cdot 3,0 \cdot 10^{-9} \text{ C} \cdot \left(\frac{16 \cdot 10^{-9} \text{ C}}{(0,15\text{m})^2} - \frac{4,0 \cdot 10^{-9} \text{ C}}{(0,45\text{m})^2} \right) \\ &\approx 19 \cdot 10^{-6} \text{ N}. \end{aligned}$$

Koska voiman F_{kok} arvo on positiivinen kokonaisvoiman suunta on oikealle.

10-15.



Pisteessä (3,5;0) oleva hiukkanen kohdistaa origossa olevaan hiukkaseen hylkivän voiman $\vec{F}_1$ ja pisteessä (0;3,0) oleva hiukkanen vetovoiman $\vec{F}_2$. Origossa olevaan varaukseen kohdistuva sähköinen kokonaisvoima on

$$\vec{F}_{\text{kok}} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2.$$

Voiman $\vec{F}_1$ suuruus on

$$F_1 = \frac{k}{\epsilon_r} \frac{Q_1 \cdot Q_2}{r^2} = \frac{8,98755 \cdot 10^9 \text{ Nm}^2/\text{C}^2}{1,0006} \cdot \frac{7,5 \cdot 10^{-6} \text{ C} \cdot 9,0 \cdot 10^{-6} \text{ C}}{(3,5 \text{ m})^2} \approx 0,049\,493\,5 \text{ N}$$

ja suunta vasemmalle.

Voiman $\vec{F}_2$ suuruus on

$$F_2 = \frac{k}{\epsilon_r} \frac{|Q_1 \cdot Q_2|}{r^2} = \frac{8,98755 \cdot 10^9 \text{ Nm}^2/\text{C}^2}{1,0006} \cdot \frac{7,5 \cdot 10^{-6} \text{ C} \cdot 2,5 \cdot 10^{-6} \text{ C}}{(3,0 \text{ m})^2} \approx 0,018\,712\,8 \text{ N}$$

ja suunta ylös.

Sähköisen kokonaisvoiman suuruus on

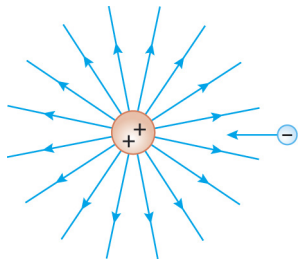
$$F_{\text{kok}} = \sqrt{F_1^2 + F_2^2} = \sqrt{(0,049\,493\,5 \text{ N})^2 + (0,018\,712\,8 \text{ N})^2} \approx 0,053 \text{ N}.$$

Voiman suunta saadaan yhtälöstä $\tan \alpha = \frac{F_2}{F_1} = \frac{0,018\,712\,8\text{ N}}{0,049\,493\,5\text{ N}}$, josta kulma $\alpha \approx 21^\circ$ kuvan mukaisesti.

TEHTÄVIEN RATKAISUT

- 11-1.** a) Sähkökenttä aiheutuu sähkövarauksesta. Sähköisesti varatun kappaleen tai hiukkasen ympärillä on sähkökenttä.
- b) Sähkökenttä ilmenee varattuun kappaleeseen tai hiukkaseen vaikuttavana voimana.
- c) Sähkökenttä esitetään piirroksellisesti kenttäviivoilla. Kenttäviivojen suunta kussakin pisteessä kertoo sähkökentän suunnan ja kenttäviivojen tiheys kertoo sähkökentän voimakkuudesta.

11-2.



- 11-3.** Sähkökentän voimakkuuden suuruus on

$$E = \frac{F}{q} = \frac{2,5 \text{ mN}}{1,0 \text{ nC}} = 2,5 \cdot 10^6 \text{ N/C} = 2,5 \text{ MN/C}.$$

Sähkökentän voimakkuuden suunta on sama kuin voiman suunta eli positiivisen x -akselin suunta.

- 11-4.** a) Varattuun hiukkaseen kohdistuu sähköinen voima, jonka suuruus on $F = Eq = 100 \text{ N/C} \cdot 10 \cdot 10^{-9} \text{ C} = 10^{-6} \text{ N} = 1 \text{ } \mu\text{N}.$

b) Varauksen suuruus on

$$q = \frac{F}{E} = \frac{12 \cdot 10^{-3} \text{ N}}{1,8 \cdot 10^6 \text{ N/C}} \approx 6,7 \text{ nC}.$$

Koska sähkökentän voimakkuuden suunta on vastakkainen voiman suunnalle, varaus on negatiivinen eli varaus on $q \approx -6,7 \text{ nC}$.

11-5. Protonin sähkökentän voimakkuuden suuruus elektronin kohdalla on

$$E = \frac{kQ}{r^2} = \frac{ke}{r^2} = 8,98755 \cdot 10^9 \text{ Nm}^2/\text{C}^2 \cdot \frac{1,602\,177\,3 \cdot 10^{-19} \text{ C}}{(52,9 \cdot 10^{-12})^2} \approx 515 \text{ GN/C}.$$

Kentän suunta on poispäin ytimen protonista.

11-6. Piste $x = 1,0 \text{ cm}$ on varausten puolivälissä, jossa kahden varauksen kentät ovat yhtä suuret mutta vastakkaismerkkiset ja kumoavat toisensa, joten sähkökentän voimakkuuden suuruus on siinä pisteessä $E = 0 \text{ N/C}$.

Piste $x = -1,0 \text{ cm}$ on 1 cm :n etäisyydellä toisesta varauksesta ja toisesta 3 cm :n etäisyydellä. Molempien varauksien kentät osoittavat tässä pisteessä negatiivisen x -akselin suuntaan. Sähkökentän voimakkuuden suuruudeksi saadaan

$$\begin{aligned} E &= k \frac{Q}{r_1^2} + k \frac{Q}{r_2^2} = 8,98755 \cdot 10^9 \frac{\text{Nm}^2}{\text{C}^2} \cdot \frac{1,0 \cdot 10^{-6} \text{ C}}{(0,010 \text{ m})^2} + 8,98755 \cdot 10^9 \frac{\text{Nm}^2}{\text{C}^2} \cdot \frac{1,0 \cdot 10^{-6} \text{ C}}{(0,030 \text{ m})^2} \\ &= 9,986167 \cdot 10^{-7} \frac{\text{N}}{\text{C}} \approx 0,10 \frac{\text{GN}}{\text{C}}. \end{aligned}$$

Varaukset ovat myös pisteestä $x = 3,0 \text{ cm}$ etäisyyksillä $1,0 \text{ cm}$ ja $3,0 \text{ cm}$, joten sähkökentän suuruus on siellä sama kuin pisteessä $x = -1,0 \text{ cm}$ eli $0,10 \text{ GN/C}$, mutta sen suunta on positiivisen x -akselin suuntaan.

11-7. Koska B:n varaus nelinkertaistuu, nelinkertaistuu myös sen sähkökentän voimakkuuden suuruus. Sen takia A:han vaikuttava sähköinen voima nelinkertaistuu eli on $4F$.

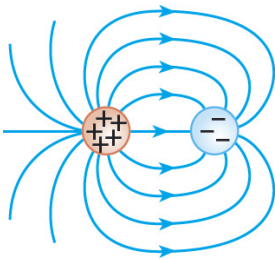
Varauksen A aiheuttama sähkökenttä on sama kuin ylemmässä tapauksessa, mutta koska B:n varaus on nelinkertaistunut, B kokee A:n kentässä nelinkertaisen voiman ylempään tapaukseen verrattuna eli voiman $4F$. Molemmissa tapauksissa siis molempiin varauksiin vaikuttaa yhtä suuret, vastakkaissuuntaiset voimat.

11-8. Sähkökenttien voimakkuudet ovat suuruudeltaan

$$E_A = k \frac{Q}{r^2}, \quad E_B = k \frac{3Q}{r^2} = 3E_A, \quad E_C = k \frac{Q}{(2r)^2} = \frac{1}{4} E_A, \quad E_D = k \frac{3Q}{(2r)^2} = \frac{3}{4} E_A.$$

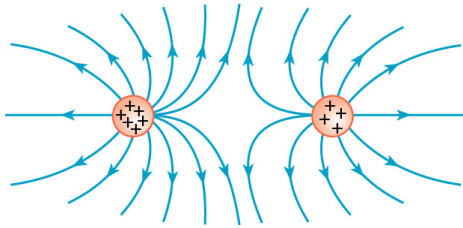
Kenttien suuruusjärjestys suurimmasta pienimpään on E_B, E_A, E_D, E_C .

- 11-9. a)** Sähkökentän voimakkuuden suunta on positiivisesta varauksesta kohti negatiivista varausta. Positiivinen pistevaraus (10 nC) on itseisarvoltaan suurempi kuin negatiivinen pistevaraus (−6 nC), joten positiivisen varauksen lähellä sähkökentän voimakkuus on suurempi kuin negatiivisen varauksen lähellä. Tämän takia positiivisesta varauksesta lähtee enemmän sähkökenttää kuvaavia kenttäviivoja kuin negatiivisesta varauksesta.



- b)** Sähkökentän voimakkuuden suunta on positiivisesta pistevarauksesta pois päin. Pistevaraus (12 nC) on itseisarvoltaan suurempi kuin pistevaraus (8 nC). Tämän takia oheisessa kuvassa vasemmalla olevasta 12 nC:n varauksesta lähtee enemmän sähkökenttää kuvaavia

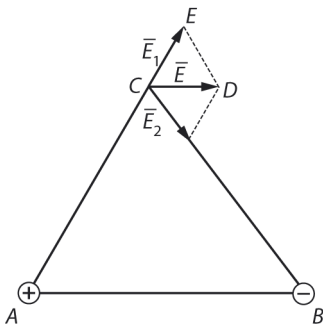
kenttäviivoja kuin oikealla olevasta 8 nC:n varauksesta.



- 11-10.** Pisteessä A olevan positiivisen varauksen kenttävoimakkuuden $\vec{E}_1$ suunta on varauksesta poispäin ja suuruus pisteessä C on $E_1 = k \frac{Q_A}{AC^2}$.

Pisteessä B olevan negatiivisen varauksen kenttävoimakkuuden $\vec{E}_2$ suunta on varausta kohti ja suuruus pisteessä C $E_2 = k \frac{Q_B}{BC^2}$. Tasasivuisen kolmion sivut AC ja BC ovat yhtä pitkät, joten kenttävoimakkuudet ovat yhtä suuret eli $E_1 = E_2$. Pisteessä C sähkökentän voimakkuus on $\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2$.

Vektoriyhtälö $\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2$ muodostaa piirrettynä kolmion CDE, joka on yhdenmuotoinen kolmion ABC kanssa. Kenttävoimakkuuden $\vec{E}$ suunta on $\vec{E} \uparrow \uparrow \overline{AB}$.



11-11. a) Sähkökentän voimakkuus on suuruudeltaan

$$E = k \frac{|Q|}{r^2} = \frac{8,98755 \cdot 10^9 \text{ Nm}^2/\text{C}^2 \cdot 45 \cdot 10^{-9} \text{ C}}{(0,26 \text{ m})^2} = 5,98284 \text{ kN/C} \approx 6,0 \text{ kN/C}.$$

Kentän suunta on kappaleeseen päin.

b) Varattu kappale vaikuttaa hiukkaseen voimalla, jonka suuruus on

$$F = Eq = 5,98284 \cdot 10^3 \text{ N/C} \cdot 15 \cdot 10^{-12} \text{ C} \approx 90 \text{ nN}.$$

Voima on vetovoima.

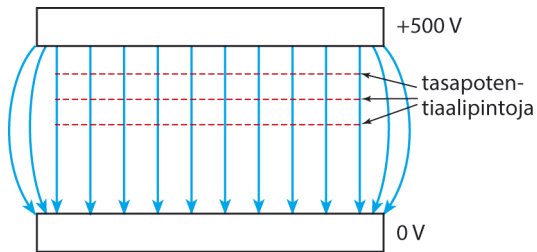
11-12. Kun ilmapalloja hangataan seinää vasten, ne varautuvat. Ilmapallojen sähkökenttä saa seinässä olevat molekyylit polarisoitumaan eli molekyylien sisällä sähkövaraus jakautuu niin, että ilmapalloa lähempänä olevaan osassa on vastaakkaismerkkinen varaus kuin ilmapallossa. Silloin ilmapallon ja seinän välillä on sähköinen voima, joka pitää ilmapallon kiinnittyneenä seinään.

Kun eboniittisauvaa hangataan, se varautuu. Kun sauva viedään lähelle paperinpaloja, näissä tapahtuu polarisoituminen. Silloin eboniittisauvan ja paperinpalojen välillä on sähköinen voima, jonka vaikutuksesta paperinpalat kiinnittyvät eboniittisauvaan.

TEHTÄVIEN RATKAISUT

- 12-1.** a) Homogeenisen sähkökentän potentiaalilla tarkoitetaan sovitusta potentiaalin nollatasosta mitatun etäisyyden ja sähkökentän voimakkuuden suuruuden tuloa eli $V = Ex$.
- b) Kahden pisteen välinen jännite on potentiaalien ero näiden pisteiden välillä eli $U_{BA} = V_B - V_A$.
- c) Tasapotentialipinta on se pinta, jonka kaikissa pisteissä on sama potentiaalinen arvo.
- d) Potentiaalin nollataso on se tasapotentialipinta, jossa potentiaalinen arvon sovitaan olevan nolla.

12-2. a), b)



- c) Potentiaalinen arvo 5 cm:n päässä potentiaalisen nollatasosta on 500 V. Yhtälöstä $V = Ex$ saadaan silloin sähkökentän voimakkuuden suuruudeksi

$$E = \frac{V}{x} = \frac{500 \text{ V}}{0,05 \text{ m}} = 1,0 \cdot 10^4 \frac{\text{V}}{\text{m}}.$$

12-3. Jännite on $U = Ed = 45 \cdot 10^3 \text{ V/m} \cdot 0,0025 \text{ m} \approx 110 \text{ V}$.

12-4. Jännitteen yhtälöstä $U = Ed$ saadaan $d = \frac{U}{E} = \frac{500 \text{ MV}}{3 \text{ MV/m}} \approx 200 \text{ m}$.

(Koko salamapurkaus koostuu useista yksittäisistä purkauksista. Yksittäisen salaman seurauksena syntyy uusi riittävän suuri potentiaaliero, joka purkautuu toisena salamana, ja niin edelleen.)

- 12-5.** a) Potentiaali on pisteessä B suurempi kuin pisteessä A, sillä potentiaali pienenee sähkökentän suuntaan siirryttäessä.
- b) Koska sähkökenttä on homogeeninen, on sähkökentän voimakkuuden suuruus molemmissa pisteissä sama. Koska sähköisen voiman suuruus on $F = Eq$, on elektroniin vaikuttava sähköinen voima sama molemmissa pisteissä.
- 12-6.** a) Sähkökentän voimakkuus homogeenisessa kentässä on $E = \frac{U}{d}$. Koska levyjen etäisyys on kaikissa tapauksissa nyt sama, kentän voimakkuus on suurin silloin, kun levyjen potentiaaliero on suurin. Tämä toteutuu keskimmaisessa kuvassa.
- b) Sähkökentän suunta on aina korkeammasta potentiaalista alempaan, joten kahdessa ensimmäisessä kuvassa kentän suunta on vasemmalle ja oikeanpuoleisessa kuvassa oikealle.
- c) Positiivisesti varattuun hiukkaseen vaikuttava sähköinen voima on kenttäviivojen kanssa samansuuntainen. Sähköinen voima aiheuttaa oikeanpuoleisimman kuvan tilanteessa positronille kiihtyvyyden oikealle.
- 12-7.** a) Jännite on $U_{AB} = V_A - V_B = 300 \text{ V} - 100 \text{ V} = 200 \text{ V}$.
- b) Jännite on $U_{AC} = V_A - V_C = 300 \text{ V} - (-100 \text{ V}) = 400 \text{ V}$.

c) Levyjen A ja B välisen sähkökentän voimakkuus on

$$E = \frac{U}{d} = \frac{200 \text{ V}}{0,10 \text{ m}} = 2,0 \text{ kV/m.}$$

Sähkökentän voimakkuuden suunta on levystä A levyyn B.

12-8. $q = +2,0 \text{ C}$, $d = 1,0 \text{ cm}$, $F = 0,1 \text{ N}$.

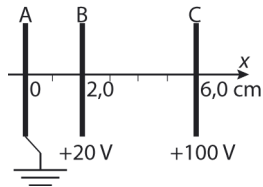
Sähköinen voima on $F = Eq$, joten sähkökentän voimakkuuden suuruudeksi saadaan

$$E = \frac{F}{q} = \frac{0,1 \text{ N}}{2,0 \text{ C}} = 0,05 \frac{\text{V}}{\text{m}}.$$

Levyjen väliseksi jännitteeksi saadaan

$$U = Ed = 0,05 \frac{\text{V}}{\text{m}} \cdot 0,010 \text{ m} = 5,0 \cdot 10^{-4} \text{ V}.$$

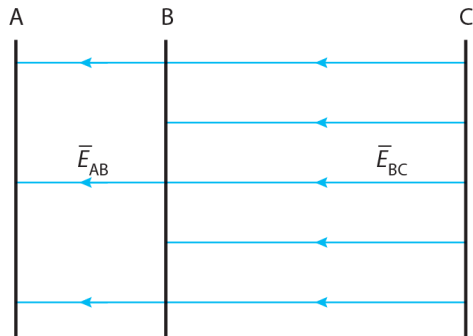
12-9.



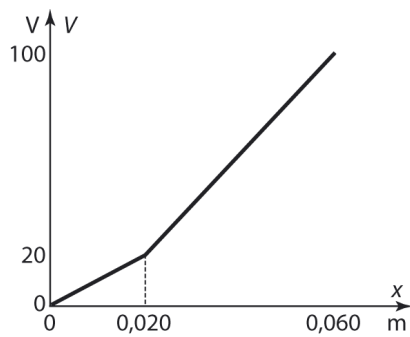
a) Sovitaan levyjä esittävässä piirroksessa suunta oikealta vasemmalle positiiviseksi. Sähkökentän voimakkuuden suunta on ylemmästä potentiaalista alempaan potentiaaliin. Sähkökentän voimakkuudet ovat suuruudeltaan

$$E_{AB} = \frac{U}{d} = \frac{20 \text{ V}}{0,020 \text{ m}} = 1,0 \text{ kV/m} \text{ ja } E_{BC} = \frac{U}{d} = \frac{80 \text{ V}}{0,040 \text{ m}} = 2,0 \text{ kV/m.}$$

b) Kummankin sähkökentän voimakkuuden suunta on vasemmalle.
Oikeanpuoleisessa välissä kenttäviivoja on kaksi kertaa niin tiheässä kuin vasemmanpuoleisessa välissä.



c)



TEHTÄVIEN RATKAISUT

- 13-1.** Elektronin kiihtyvyyden suunta on sähkökentässä kenttäviivojen suuntaa vastaan, koska elektroniin kohdistuu sähkökentälle vastakkaissuuntainen sähköinen voima. Kiihtyvyyden suuruus on

$$a = \frac{|q|E}{m} = \frac{1,602\,177\,3 \cdot 10^{-19} \text{ C} \cdot 390 \text{ V/m}}{9,109\,389\,7 \cdot 10^{-31} \text{ kg}} \approx 6,85940 \cdot 10^{13} \text{ m/s}^2 \\ \approx 6,9 \cdot 10^{13} \text{ m/s}^2.$$

- 13-2.** Koska kenttä on homogeeninen, on hiukkaseen vaikuttava sähköinen voima ja sen takia myös kiihtyvyys sama kaikkialla kentässä. Elektronilla on sama kiihtyvyys kaikissa pisteissä. Suurin potentiaali on pisteissä A ja B.

- 13-3.** Koska protoni lähtee levosta, sen liike-energia on sama kuin sähköisen voiman tekemä työ siirryttäessä potentiaalista 150 V potentiaaliin 0 V eli

$$E_{\text{kin}} = W = q(U_{\text{loppu}} - U_{\text{alku}}) = e \cdot (0\text{V} - (-150 \text{ V})) \\ = 1,602\,177\,3 \cdot 10^{-19} \text{ C} \cdot 150 \text{ V} \\ = 24,0327 \cdot 10^{-18} \text{ J} \approx 24 \text{ aJ}.$$

- 13-4. a)** Elektroniin kohdistuvan sähköisen voiman suuruus on

$$F = E|q| = 3,5 \cdot 10^3 \frac{\text{V}}{\text{m}} \cdot 1,6021773 \cdot 10^{-19} \text{ C} \approx 5,6 \cdot 10^{-16} \text{ N}.$$

Voiman suunta on sähkökentälle vastakkainen, koska elektronin varaus on negatiivinen.

- b)** Maan vetovoiman suuruus on

$$F = mg = 9,1093897 \cdot 10^{-31} \text{ kg} \cdot 9,81 \text{ m/s}^2 \approx 8,9 \cdot 10^{-30} \text{ N}.$$

Voiman suunta on sama kuin gravitaatiokentän suunta.

c) Maan vetovoiman eli gravitaatiovoiman vaikutus on täysin merkityksetön sähköiseen voimaan verrattuna.

13-5. a) Elektronin liike-energia 2,5 keV on jouleina

$$2,5 \cdot 10^3 \cdot 1,602\,177\,3 \cdot 10^{-19} \text{ J} \approx 4,0 \cdot 10^{-16} \text{ J}.$$

b) Energia $28 \cdot 10^{-28} \text{ J}$ elektronivoltteina on

$$\frac{28 \cdot 10^{-18}}{1,602\,177\,3 \cdot 10^{-19}} \text{ eV} \approx 170 \text{ eV}.$$

13-6. a) Negatiiviseen hiukkaseen vaikuttavan sähköisen voiman suunta on päinvastainen kuin kenttäviivojen suunta. Tällöin hiukkasen kiihtyvyys ja nopeus ovat vastakkaisuuntaiset, joten hiukkanen on hidastuvassa liikkeessä. Jos liike jatkuu pitkään, hiukkasen liikesuunta muuttuu kiihtyvyyden suuntaiseksi, jolloin hiukkanen on kiihtyvässä liikkeessä vastakkaiseen suuntaan kuin mihin se alun perin liikkui.

b) Hiukkanen liikkuu samaan suuntaan kuin mihin sähköisen voiman aiheuttama kiihtyvyys osoittaa, joten hiukkanen on kiihtyvässä liikkeessä tähän suuntaan.

c) Hiukkaseen vaikuttava sähköinen voima aiheuttaa hiukkaselle kiihtyvyyden vastakkaiseen suuntaan kuin mihin kenttäviivat osoittavat, jolloin sen rata kaareutuu siihen suuntaan.

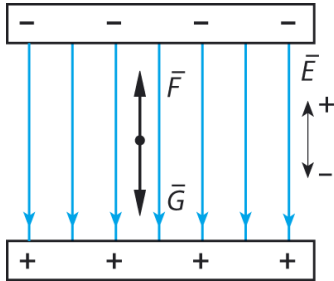
13-7. Koska pisara pysyy paikallaan, on alaspäin vaikuttavan painon $G = mg$ ja ylöspäin vaikuttavan sähköisen voiman F oltava yhtä suuria eli $G = F$.

Koska johdelevyt ovat yhdensuuntaiset, niiden välissä on homogeeninen sähkökenttä ja levyjen välinen jännite on $U = Ed$ eli $E = \frac{U}{d}$. Sähköinen voima on siten $F = qE = q \frac{U}{d}$.

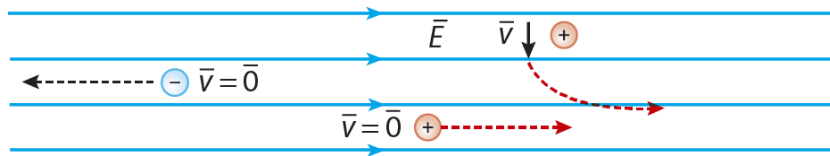
Yhtälö $G = F$ tulee silloin muotoon $mg = q \frac{U}{d}$.

Tästä voidaan ratkaista levyjen välinen jännite U :

$$U = \frac{mgd}{q} = \frac{35 \cdot 10^{-15} \text{ kg} \cdot 9,81 \text{ m/s}^2 \cdot 0,012 \text{ m}}{22 \cdot 1,6021773 \cdot 10^{-19} \text{ C}} \approx 1,2 \text{ kV}.$$



13-8.



13-9. $E = 1,9 \text{ kV/m}$, $q = 1,602\,177\,3 \cdot 10^{-19} \text{ C}$,

$$m = 1,672\,623\,1 \cdot 10^{-27} \text{ kg}, t = 1,0 \cdot 10^{-6} \text{ s}, v_0 = 0 \text{ m/s}$$

a) Protoni liikkuu homogeenisessa sähkökentässä kenttäviivojen suuntaan tasaisesti kiihtyen, koska siihen vaikuttaa sähkökentän kenttäviivojen suuntainen sähköinen vakiovoima. Newtonin II lain mukaan sähköinen voima antaa protonille kiihtyvyyden

$$\bar{a} = \frac{\bar{F}}{m} = \frac{q\bar{E}}{m}.$$

Koska protoni lähtee levosta, protonin nopeudeksi saadaan

$$v = at = \frac{qE}{m} t = \frac{1,602\,177\,3 \cdot 10^{-19} \text{ C} \cdot 1,9 \cdot 10^3 \text{ V/m}}{1,672\,623\,1 \cdot 10^{-27} \text{ kg}} \cdot 1,0 \cdot 10^{-6} \text{ s}$$
$$\approx 0,1820 \cdot 10^6 \text{ m/s} = 180 \text{ km/s.}$$

b) Protonin kulkema matka on

$$s = \frac{1}{2} at^2 = \frac{1}{2} \frac{qE}{m} t^2 = \frac{1}{2} \cdot \frac{1,602\,177\,3 \cdot 10^{-19} \text{ C} \cdot 1,9 \cdot 10^3 \text{ V/m}}{1,672\,623\,1 \cdot 10^{-27} \text{ kg}} \cdot (1,0 \cdot 10^{-6} \text{ s})^2$$
$$\approx 0,091 \text{ m.}$$

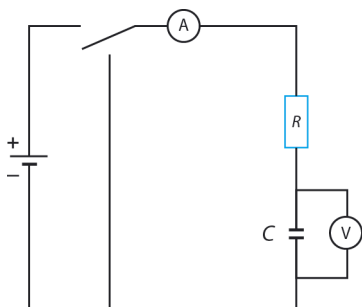
TEHTÄVIEN RATKAISUT

14-1. a) Kapasitanssi kuvaa kondensaattorin kykyä varastoida sähkövarausta. Se saadaan jakamalla kondensaattorin varaus jännitteellä eli $C = Q/U$.

b) Levykondensaattorin kapasitanssi riippuu levyjen pinta-alasta, levyjen välimatkasta ja levyjen välissä olevan eristeaineen permittiivisyydestä.

14-2. Kondensaattorin varaus on $Q = CU = 380 \text{ nF} \cdot 230 \text{ V} \approx 87 \text{ mF}$.

14-3. a) Kytkenäkaavio:



Ladattaessa kytkin A on kytketty yläasentoon, purettaessa ala-asentoon.

b) Latausjännite oli 4,5 V.

c) Lataus kesti 16 s.

d) Suurin kondensaattorista saatu sähkövirta on

$$I = \frac{U}{R} = \frac{4,5 \text{ V}}{2,6 \text{ k}\Omega} \approx 1,71 \text{ mA}.$$

14-4. a) Pilven ja maanpinnan välinen jännite on

$$U = Ex = 3,5 \text{ kV/m} \cdot 850 \text{ m} = 2\,975\,000 \text{ V} \approx 3,0 \text{ MV}.$$

b) Pilven varaus on

$$Q = CU = \epsilon_r \epsilon_0 \frac{A}{d} U$$
$$= 1,0006 \cdot 8,85419 \cdot 10^{-12} \frac{\text{F}}{\text{m}} \cdot \frac{1,00 \cdot 10^6 \text{ m}^2}{850 \text{ m}} \cdot 2,975 \text{ MV} \approx 31 \text{ mC}.$$

- 14-5.** a) Levykondensaattorin varaus on $Q = CU$. Levykondensaattorin kapasitanssin kaavan $C = \epsilon_r \epsilon_0 \frac{A}{d}$ mukaan kapasitanssi on kääntäen verrannollinen levyjen välimatkaan d , joten kun väli kaksinkertaistuu, niin kapasitanssi pienenee puoleen eli $C_2 = \frac{1}{2}C$.

Kondensaattorin jännite saadaan yhtälöstä

$$U = \frac{Q}{C} = \frac{Q}{\epsilon_r \epsilon_0 \frac{A}{d}} = \frac{Qd}{\epsilon_r \epsilon_0 A}.$$

Jos välimatka d kaksinkertaistuu, jännite U myös kaksinkertaistuu eli

$$U_2 = 2U. \text{ Koska } C_2 \cdot U_2 = \frac{1}{2}C \cdot 2U = CU = Q, \text{ varaus ei muutu.}$$

b) Edellisen kohdan mukaan, kun välimatka d kaksinkertaistuu, myös jännite U kaksinkertaistuu.

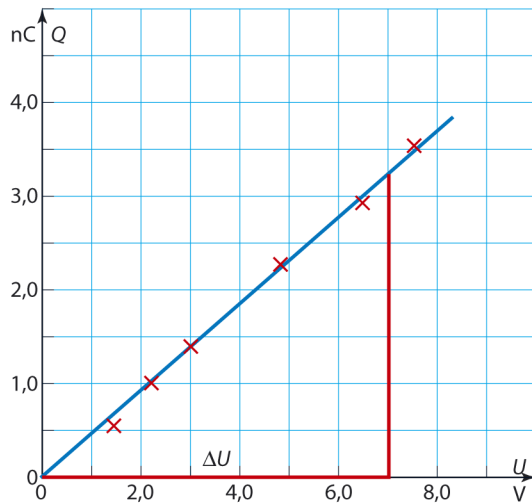
c) Levyjen välissä olevan sähkökentän voimakkuuden suuruus saadaan yhtälöstä $E = \frac{U}{d}$. Kun levyjen välimatka kaksinkertaistuu, myös jännite kaksinkertaistuu (kohta b), mutta sähkökentän voimakkuuden suuruus ei muutu.

- 14-6.** Levykondensaattorin kapasitanssin kaavasta $C = \epsilon_r \epsilon_0 \frac{A}{d}$ nähdään, että kapasitanssi on suoraan verrannollinen levyjen välissä olevan aineen suhteelliseen permittiivisyyteen ϵ_r . Kun levyjen väli täytetään paperilla, jonka suhteellinen permittiivisyys on 5, kapasitanssi muuttuu melko tarkkaan viisinkertaiseksi, sillä ilman suhteellinen permittiivisyys on 1,0006.

Paperitäytteisen kondensaattorin sähkökentän voimakkuus $\bar{E}$ heikkenee viidenteen osaan alkuperäisestä, joten jännite $U = Ed$ pienenee myös viidenteen osaan alkuperäisestä.

Alkuperäisen kondensaattorin varaus on $Q = CU$ ja paperitäytteisen varaus $Q = 5C \cdot \frac{1}{5}U = CU$. Varaus ei siis muutu.

- 14-7. a)** Kun mittaustulokset siirretään U, Q -koordinaatistoon, pisteet asettuvat suoralle.



U, Q -koordinaatistoon piirretyn suoran yhtälö on $Q = CU$, joten suoran fysikaalinen kulmakerroin on kondensaattorin kapasitanssi:

$$C = \frac{\Delta Q}{\Delta U} = \frac{Q_2 - Q_1}{U_2 - U_1} = \frac{3,2 \text{ nC} - 0,0 \text{ nC}}{7,0 \text{ V} - 0,0 \text{ V}} = 0,457 \text{ 143 nF} \approx 460 \text{ pF}.$$

b) Kun kondensaattorin jännite on $U = 24 \text{ V}$, kondensaattorin varaus on $Q = CU = 0,457 \text{ 143 nF} \cdot 24 \text{ V} \approx 11 \text{ nC}$.

14-8. Kun kondensaattori latautuu $5,0 \text{ V}$ jännitteeseen, sen sähkövaraukseksi tulee

$$Q = CU = 10 \text{ }\mu\text{F} \cdot 5,0 \text{ V} = 50 \text{ }\mu\text{C}.$$

Kondensaattorin purkautuessa $50 \text{ }\mu\text{C}$:n varaus aiheuttaa sydämeen sähköisen pulssin. Yhden tunnin aikana paristosta vähenee varaus

$60 \cdot 60 \cdot 50 \text{ }\mu\text{C} = 180 \text{ mC}$. Pariston kokonaisvaraus on $2,5 \text{ Ah} = 2,5 \text{ A} \cdot 3600 \text{ s} = 9000 \text{ C}$. Paristo pitää vaihtaa $\frac{9000 \text{ C}}{0,180 \text{ C/h}} = 50\,000 \text{ h} \approx 5,7 \text{ vuoden}$ välein.

14-9. a) Kondensaattorin energia on enimmillään

$$E = \frac{1}{2}CU^2 = \frac{1}{2} \cdot 2,0 \cdot 10^{-6} \text{ F} \cdot (340 \text{ V})^2 \approx 0,12 \text{ J}.$$

b) Jos kondensaattorin jännite on liian suuri, kondensaattorissa tapahtuu läpilyönti. Läpilyönti usein rikkoo kondensaattorin, jolloin kondensaattorin ominaisuudet muuttuvat tai kondensaattorin levyt voivat joutua oikosulkuun.

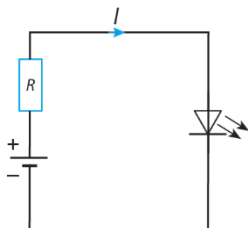
TEHTÄVIEN RATKAISUT

- 15-1.** a) Lamppu palaa, koska diodi on kytketty päästösuuntaan.
b) Lamppu palaa, koska kumpikin diodi on kytketty päästösuuntaan.
c) Lamppu ei pala, koska diodi on kytketty estosuuntaan.
d) Lamppu ei pala, koska toinen diodeista on kytketty estosuuntaan.
e) Vasemmanpuoleinen lamppu palaa, koska sen edessä oleva diodi on päästösuunnassa. Oikeanpuoleinen lamppu ei pala, koska sen edessä oleva diodi on estosuunnassa.
f) Lamppu ei pala, koska toinen diodeista (alempi) on kytketty estosuuntaan.

- 15-2.** a) Kynnysjännite on 0,9 V.
b) Diodin jännitehäviö on 1,04 V.
c) Diodissa kulkeva sähkövirta on 50 mA.

- 15-3.** Vihreän ledin kynnysjännite on 2,1 V.

Etuvastuksen jännitehäviön on oltava $U_{\text{etu}} = 4,5 \text{ V} - 2,1 \text{ V} = 2,4 \text{ V}$.



Oletetaan, että ledissä kulkeva sähkövirta on 20 mA.

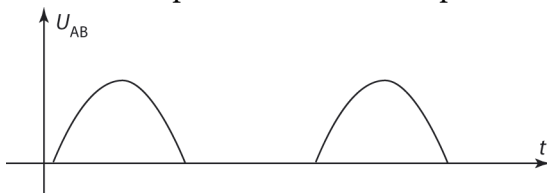
$$\text{Etuvastuksen resistanssi on } R = \frac{U_{\text{etu}}}{I} = \frac{2,4 \text{ V}}{20 \text{ mA}} \approx 120 \, \Omega.$$

- 15-4.** a) Puolijohteen douppaamisella tarkoitetaan epäpuhtausatomien seostamista puolijohteeseen tämän sähkönjohtavuuden kasvattamiseksi.
- b) p-tyypin puolijohteessa toimivat varauksenkuljettajina aukot. Ne ovat peräisin epäpuhtausatomeista, joissa on ulkokuorella yksi elektroni vähemmän kuin puolijohteen atomissa. n-tyypin puolijohteessa toimivat varauksenkuljettajina elektronit. Ne ovat peräisin epäpuhtausatomeista, joissa on ulkokuorella yksi elektroni enemmän kuin puolijohteen atomissa.

- 15-5.** a) Jännitteen tasasuuntauksessa esimerkiksi sinimuotoisesta vaihtojännitteestä poistetaan joka toinen jakso niin, että jännitteen napaisuus pysyy koko ajan samana. Tasasuunnatussa jännitteessä jännitteen merkki ei siis muutu.

b) Diodia voidaan käyttää tasasuuntauksessa, koska se päästää sähkövirran lävitseen vain yhteen suuntaan. Tämä estää elektronien liikkumisen virtapiirissä niin, että jännitteen etumerkki vaihtuisi.

c) Jännitelähteen jännitekuvaajasta jäävät jäljelle vain positiivista jännitettä vastaavat osat, negatiivista jännitettä vastaavat osat leikkautuvat pois. Tätä kutsutaan puolialtotasasuuntaukseksi.



Kirjassa sivulla 136 kuvattu tasasuuntaussilta suorittaa ns. kokoaaltotasasuuntauksen.

- 15-6.** Auringon sähkömagneettinen säteily synnyttää p-tyypin puolijohteessa elektroni-aukko-pareja. Koska pn-liitosta ei ole kytketty ulkoiseen jännitteeseen, vallitsee pn-liitoksen ympärillä vain donori- ja akseptorionien muodostama sähkökenttä, joka suuntautuu n-tyypin

puolijohteesta p-tyypin puolijohteen suuntaan. Syntyneet elektronit liikkuvat tämän sähkökentän vaikutuksesta p-alueesta n-alueeseen. Sähkövirta kulkee virtapiirissä vastakkaiseen suuntaan kuin elektronit eli vastapäivään.

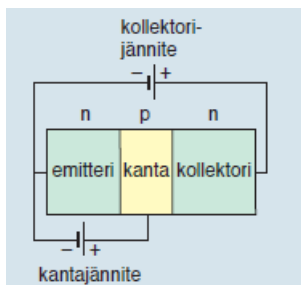
15-7. a) Punaisia ledejä on ollut saatavilla 1970-luvulta alkaen. Seuraavaksi tulivat markkinoille keltaiset ja vihreät ledit, jotka varsinkin alkuaikoinaan olivat varsin himmeitä. Sinivihreitä ledejä on ollut käytössä 1980-luvulta alkaen. Siniset ledit tulivat markkinoille 1993 ja ensimmäiset valkoiset ledit 1990-luvun loppuvuosina.

b) Valkoista valoa lähettävä ledi perustuu siniseen lediin. Kun sinistä valoa tuottava ledi pinnoitetaan sopivalla loisteaineella, osa valosta saadaan muuttumaan vihreäksi, osa keltaiseksi ja osa punaiseksi. Ihmisen silmä aistii yhdistelmän valkoisena valona.

c) Kotien sähkölaitteissa yleisimmin käytetty ledi on perinteisesti väriltään punainen. Punaisia ledejä on merkkivaloina mm. televisioissa, digibokseissa, jääkaappipakastimissa ja sähköliesissä. Myös muunväriset ledit, kuten sininen ja valkoinen, ovat yleistyneet.

15-8. a) Transistorin keksivät yhdysvaltalaisen Bell Telephone Laboratoryn fyysikot Walter Brattain ja John Bardeen vuonna 1947.

b) Transistorin pääosat ovat n- ja p-tyypin puolijohteista valmistetut emitteri, kanta ja kollektori. Ks. kuva.



c) Transistori voi toimia esimerkiksi vahvistimena, kytkimenä ja muistin osana.

d) Transistorit olivat pienempiä, luotettavampia ja vähemmän energiaa kuluttavia kuin aiemmin käytetyt elektroniputket. Pienen koon ansiosta transistorit ja lähinnä transistoreista koostuvat mikropiirit ovat kasvattaneet laskentatehoa erittäin paljon, mikä on tehnyt mahdolliseksi kotitietokoneet, älypuhelimet, digi-TV:t jne.

TESTAA, OSAATKO S. 123

1. a b 2. a 3. b 4. a 5. b 6. a b c 7. a 8. c 9. b