

Loeng 12. Alalisvool

Igapäevaelus me elektrilaengutest ja elektriväljast ei räägi. Tehnoloogias kasutatava elektri kohta käivad terminid, nagu (elektri)vool, pinge, takistus. Elektri hulka - mis iseenesest on samaväärne elektrilaenguga - mõõdetakse mitte kulonites, vaid kilovatt-tundides.

Elektri peamiseks kasutusala on energia transport. Elektrimootor, küttespiraal ja hõõglamp on kompaktsed, ohutud ja hästi juhitavad - kui võrrelda näiteks aurumasinaga, ahju või petroolilambiga. Seda sellepärast, et nad ei tooda, vaid ainult muundavad neisse juhtmeid pidi toodavat elektrienergiat. Sisuliselt on tegu elektrivälja energiaga, mille toimetel loetletud masinad tööd teevad.

Elektrilaeng teeb tööd vaid siis, kui talle mõjub jõud ja ta liigub. Elektrotehnika terminites on vajalik nullist erinev **pinge** juhi otstel ja nullist erinev **voolutugevus**.

Defineerime need, aga alustame siiski voolust:

Elektrivool on laengute korrastatud (suunatud) liikumine

Voolu suunaks loeme kokkuleppeliselt *positiivsete* laengute liikumise suunda. Voolu suund ühtib teda esile kutsuva *elektrivälja vektori* suunaga.

Voolu tekke ja olemasolu tingimuseks on vabade (liikumisvõimeliste) laengute olemasolu. Kui need laengud (laengukandjad) kuuluvad keskkonna koostisse (laenguga mikroosakesed elektrijuhis), nimetatakse tekkivat voolu **juhtivusvooluks**. Kui laengu ümberpaiknemisel osalevad makrokehad (laetud kuulikesed katses, liikuv elektriseeritud lint), on tegemist **konveksioonvooluga**.

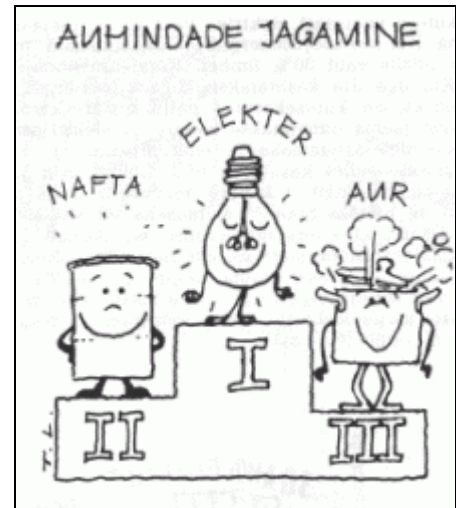
Loengus käsitleme edaspidi ainult juhtivusvoolu.

Voolu iseloomustavad suurused

Voolutugevuseks nimetame ajaühikus juhi ristlõiget läbinud elektrilaengut

$$I = \frac{q}{t} \quad (\text{kui } I = \text{const}) \quad \text{või} \quad I = \frac{dq}{dt}$$

Voolutugevus sõltub laengukandjate arvust ja kiirusest. Kiiruse määrab laengutele mõjuv jõud (seega elektrivälja tugevus), laengukandjate arvu peamiselt juhi mõõtmed. Viimasest vabanemiseks kautatakse **voolutiheduse** mõistet.



Elektrotehnikas kasutatakse elektrivoolu energia transportimiseks tootjalt (elektrijaamast) tarbijani.

Alalisvoolust räägime siis, kui **elektrivoolu tugevus ja suund ei muutu**.

Praktikas kasutatakse alalisvoolu valemeid ka muutuva voolu korral -- juhul, kui muutused on nii aeglased, et elektromagnetilise induktsiooni mõju võib arvestamata jätta.

Elektrivoolu iseloomustavateks suurusteks on voolutugevus ja pinge (täpsemalt: pingelang). Vooluallikat iseloomustavateks suurusteks on elektromotoorjõud ja sisetakistus

Voolutihedus on juhi ühikulist ristlõiget läbiv voolutugevus:

$$j = \frac{I}{S} \quad \text{ehk} \quad j = \frac{dI}{dS}$$

Kui laengukandjate ruumtihedus on n ja liikumiskiirus $\vec{v}$, võime voolutiheduse avaldada vektorina

$$\vec{j} = \Sigma q_i \vec{v}_i$$

Pingeks e. pingelanguks vooluga juhtme kahe punkti vahel nimetatakse tööd, mida tuleb teha ühikulise (1 C) laengu viimiseks ühest punktist teise.

$$U = \frac{A}{q} = \frac{1}{q} \int_{AB} \vec{F} d\vec{s} = \frac{1}{q} \int_{AB} q \vec{E} d\vec{s} = \int_{AB} d\varphi = \varphi(B) - \varphi(A)$$

Pingelang võrdub elektrivälja potentsiaalide vahega juhtmelõigu otste vahel.

Elektrostaatikas õppisime, et tasakaaluolekus on juhi kõik punktid sama potentsiaaliga. Seega on juhtmes võimalik voolu alal hoida vaid pidevalt laenguid "tagasi tõstes". Sel teel säilitame juhis elektrivälja, mis kutsub esile laengute liikumise -- elektrivoolu.

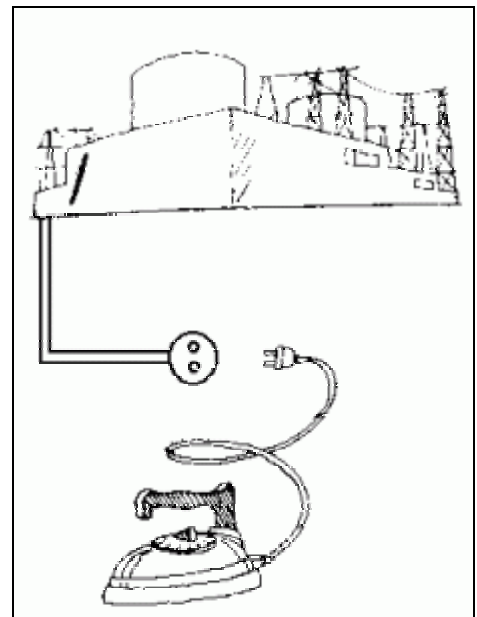
Jõudusid, mis liigutavad laenguid elektrijõududele vastupidises suunas, nimetatakse **kõrvaljõududeks**; selleks võib olla suvaline energiaallikas (soojus, valgus, mehaaniline töö või keemiline energia).

Seadet, kus toimub laengute üleviimine kõrgemale potentsiaalile, nimetatakse **vooluallikaks** ja selle seadme poolt ühiklaengu üleviimisel tehtud tööd tema **elektromotoorjõuks**.

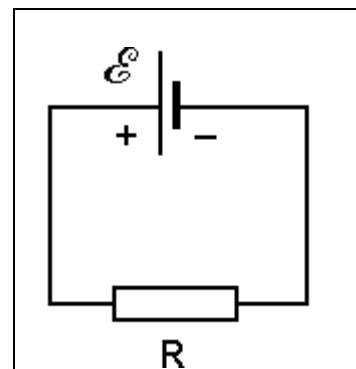
Elektromotoorjõud on töö, mida teevad vooluallikas toimivad kõrvaljõud ühikulise laengu (1 C) üleviimisel.

Elektromotoorjõud on võrdne potentsiaalide vahega vooluallika klemmidel välise ahela puudumisel.

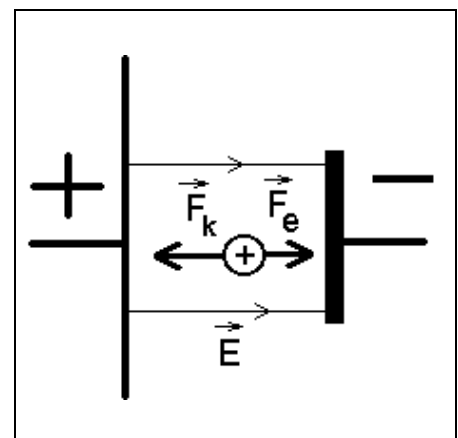
Vooluringiks nimetatakse suletud kontuuri ("juhtivat kõverat"), millesse kuulub vooluallikas.



Vooluring koosneb vooluallikast, tarbijast (tarbijatest) ning ühendusjuhtmetest.



Vooluringi skeem tavatähistega.



Vooluallikas: laengukandjad liiguvad elektrivälja mõjuga vastassuunas.
 F_e - elektrostaatiline, F_k - kõrvaljõud.

Hüdrodünaamiline analoog

Kuidas siis vool tööd teeb?

Sõnad "voolutugevus", "pingelang" ja "elektromotoorjõud" (vene k. **электродвижущая сила**, ingl. k. *electromotive force*) viivad analoogiale jõumasina, mis töötab kõrgemast reservuaarist madalamasse voolava vee energia toimetel. Vooluringis tehtav töö koosneb pumba tööst qgh ning vee allavoolamisel tehtud tööst $qgh_A - qgh_B$. Analooiselt tuleb elektrilise vooluringi jaoks

$$A = \mathcal{E}q + q(\varphi_A - \varphi_B)$$

NB! Mõlemal juhul on energiaallikas "pump," st. vooluallikas. Voolu (voolava vee) tehtud töö on võimalik allika poolt tekitatud potentsiaalse energia arvelt.

Analoogia elektrivoolu ja voolava vee vahel on täielik: me võime vabalt ette kujutada, et juhtmete asemel on torud, elektriamaa asemel pumbajaaam ning mootorite asemel veeturbid. Elekter pole ainus energia transportimise viis - paljud põllumajandus- ning ehitusmasinad kasutavad hüdraulilisi (tööd teeb surve all olev õli) või pneumaatilisi (töötab suruõhk) jõuülekandeid. Elektrivoolu eeliseks on ülekandeliinide odavus (eriti pikkade vahemaade korral) ning - tänapäeval - ka hulk uut tüüpi tehnoloogiat, mis enam hüdrodünaamikale ei taandu.

Küsimus: Kas märkasite sarnasust vooluringi, "hüdrodünaamilise analoogi" ja termodünaamika ringprotsessi vahel? Proovige sõnastada vooluringi "termodünaamiline analoog"!

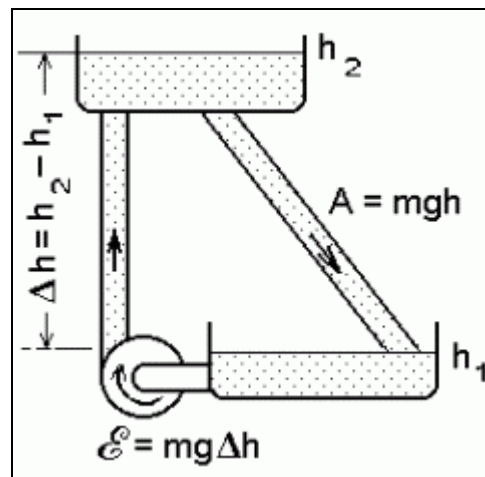
Alalisvoolu seadused

Voolutugevuse mõõtmine sai võimalikuks pärast voolu magnetilise toime avastamist 1820. a. Aastatel 1825-1850 leiti põhilised empiirilised seadused. See lõi aluse mitmete teoreetiliste konstruktsioonidele, need omakorda on viinud tänapäeva elektriõpetuse ning kokkuvõttes kogu kaasaegse füüsika tekkeni.

- **Ohm'i seadus** (1826)

Voolu tugevus juhis on võrdeline pingega

See tähendab: kui pinge suureneb n korda, suureneb n korda ka voolutugevus. Võrdetegur sõltub juhi mõõtmetest ning materjalist. Seda iseloomustatakse *takistusega*.



Vooluringi hüdrodünaamiline analoog.

Voolutugevus on võrdeline pingega

Takistus iseloomustab konkreetset juhti (voolutarbijat), eritakistus aga ainet, millest juht (juhe) on valmistatud.

Voolu võimsus (ajaühiku kohta tehtav töö või ajaühikus eraldunud soojushulk) on võrdeline voolutugevuse ning pingega.

Juhi takistus on juhti iseloomustav suurus, mis defineeritakse kui Ohm'i seaduses oleva võrdeteguri pöördväärtus

$$I = \frac{1}{R} U$$

- **Joule-Lenz'i seadus**

Vooluga juhtmes eralduv soojushulk on võrdeline voolutugevuse ruudu, juhtme takistuse ja ajaga

$$Q = I^2 R t$$

Sõltuvus on leitud empiiriliselt, Joule leiutatud kalorimeetri abil tehtud katsete seeria käigus. Valemit saab tuletada ka mehaanikast, nagu näitas E. Lenz:

$$A = qU = It \cdot U = I^2 R t = Q$$

Mõõtühikud. Kõikjal, kus võimalik, kasutame elektrinähtuste kirjeldamisel mehaanikast/molekulaarfüüsikast tuntud suurusi. Spetsiifiliseks ühikuks jääb laengu ühik kulon kui elektri hulga väljendaja. Etalooni defineerimisel tekkivate raskuste tõttu valiti möödunud sajandi tehnilises süsteemis MKSA põhiühikuks voolutugevuse ühik **amper**, mis tol ajal määrati keemilise vooluallika, nn. normaalelemendi abil. Tänapäeval on amper tuletatav ühik, mille määrab vooluga juhtmete vahel mõjuv jõud.

Seega näeb ühikute süsteem välja järgmine:

- **Amper (A)** defineeritakse sõltumatult
- **Kulon (C)** on elektriühik (-laeng), mis läbib juhtme ristlõiget 1 s jooksul, kui voolutugevus on 1 A
- **Volt (V)** on selline potentsiaalide vahe, kus laengu 1 C üleviimisel teevad elektrijõud töö 1 J

Ühikuga volt mõõdetakse ka pingelangu ning elektromotoorjõudu.

- **Oom (Ω)** on sellise juhtme takistus, milles pinge(langu)le 1 V vastab voolutugevus 1 A

(või ... kus voolutugevusel 1 A tekib pingelang 1 V)

Mõnikord kasutatakse ka oomi pöördühikut **siimens** ($S = 1/\Omega$).

Ühikud SI süsteemis:

- **Voolutugevus:**
amper -- põhi-ühik
- **Laeng:**
kulon = amper · sekund
- **Pinge:**
volt -- = džaul / kulon
- **Takistus:**
oom = volt / amper

Eritakistus. Et takistus sõltub materjalist, on kasulik sisse tuua suurus, mis iseloomustab materjali elektrijuhtivust. Selliseks suuruseks on eritakistus (või erijuhtivus). Ühtlase ristlõikega juhi korral on takistus võrdeline juhi pikkusega (seda suurem, mida pikem on juht) ning pöördvõrdeline ristlõikepindalaga (seda väiksem, mida jämedam on juht); võrdeteguriks ongi siis eritakistus ϱ :

$$R = \varrho \frac{l}{S} \quad l = \text{pikkus}; \quad S = \text{ristlõikepindala}$$

Eritakistuse pöördväärtust $\sigma = 1/\varrho$ nim. erijuhtivuseks.

Eritakistuse ühiku saame takistuse valemist:

$$R = \varrho \frac{l}{S} \rightarrow \varrho = \frac{RS}{l} \rightarrow [\varrho] = \frac{\Omega m^2}{m} = \Omega m$$

Eritakistus sõltub temperatuurist:

- metallides
 $\varrho = \varrho_0(1 + \alpha t^0)$ ehk $\varrho/\varrho_0 = T/273K$
- pooljuhtides
 $\varrho = \varrho_0 \exp(\text{const.}/T)$

Metallide erijuhtivusi:

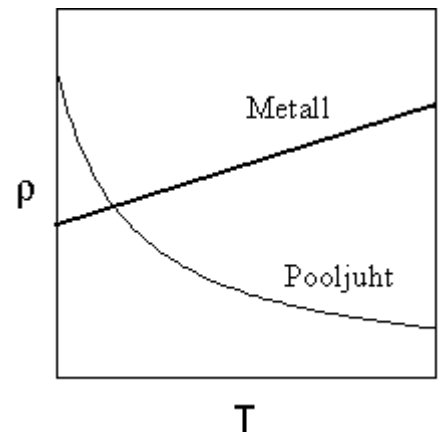
- raud: $\varrho = 1.1 \cdot 10^{-7}$;
- alumiinium: $\varrho = 2.8 \cdot 10^{-8}$;
- vask: $\varrho = 1.7 \cdot 10^{-8}$.

Ohm'i ja Joule-Lenz'i seadused diferentsiaal kujul. Kasutades eritakistust saame ülaltoodud seadused anda ka pideva juhtiva keskkonna jaoks.

Ohm'i seadus:

$$\vec{j} = \frac{dI}{d\vec{S}} = \frac{dU}{R d\vec{S}} = \frac{dU}{\varrho \frac{dl}{dS} dS} = \frac{dU}{\varrho dl} = \frac{\vec{E} d\vec{l}}{\varrho d\vec{l}} = \frac{\vec{E}}{\varrho}$$

ehk $\vec{j} = \sigma \vec{E}$, kus σ on eritakistuse pöördväärtus - erijuhtivus.



Metalli ja pooljuhi eritakistuse sõltuvus temperatuurist.

Voolutihedus juhtivas keskkonnas on võrdeline elektrivälja tugevusega; võrdeteguriks on keskkonna erijuhtivus.

Joule-Lenz'i seadus:

$$dQ = I^2 R dt = \vec{j}^2 dS^2 \cdot \rho \frac{dl}{dS} dt = \rho \vec{j}^2 dl dS dt = \rho \vec{j}^2 dV dt.$$

Defineerides **erivõimsuse** $w = \frac{A}{Vt}$, saame

$$w = \rho \vec{j}^2 \quad (= \rho \sigma^2 \vec{E}^2 = \sigma \vec{E}^2).$$

Elektrivoolu erivõimsus on võrdeline voolutiheduse ruudu ja eritakistuse korrutisega (või väljatugevuse ruudu ja erijuhtivuse korrutisega).

Vooluallika sisetakistus. Kui "pump" oleks lõpmata võimas, võiks siin lõpetada. Tegelikuses hakkab vooluahela takistuse vähenemisel mõju avaldama kõrvaljõudude võimsuse piiratus: ka nullilähedase takistuse korral ei saa voolutugevus lõpmata suureks, vaid läheneb mingile piirile $I \rightarrow I_{max}$. Et Ohmi seadus oleks rakendatav ka väikeste takistuste puhul, tuuakse sisse *vooluallika sisetakistuse* mõiste.

Vooluallika sisetakistuseks nim. takistuse
dimensiooniga suurust, mis arvuliselt võrdub
elektromotoorjõu ja lühisvoolu tugevuse suhtega.

Väikeste takistuste korral saab Ohm'i seadus kuju:

$$I = \frac{\mathcal{E}}{R + r},$$

kus r on sisetakistus.

Tuleb endale aru anda, et tegelikult pole vooluallika sees mingit "laengute liikumist takistavat" jõudu. Küll on aga piiratud selle "pumba", mis laetud osakesi välja suunale vastupidises suunas liikuma sunnib, võimsus. Nagu igal veepumbal on teada suurim kõrgus (maksimaalne potentsiaalne energia!), kuhu pump "vett lüüa" suudab, nii on ka igal vooluallikal maksimaalne potentsiaalide vahe - elektromotoorjõud. Ja nii, nagu iga pump suudab ajaühikus "läbi ajada" vaid kindla hulga vett, nii suudab ka vooluallikas üle kanda vaid kindla suurusega laengu. Et voolutugevus ongi ajaühikus üle kantud laeng, saame selle "elektrihulga" väljendada "sisetakistuse" kaudu - nii, nagu seda näitab ülal toodud valem.

Keemilised vooluallikad. Vooluallikate töö illustreerimiseks kirjeldame järgnevalt üht (ja esimest) vooluallika tüüpi - keemilist vooluallikat.

Nagu nimigi ütleb, on siin "kõrvaljõuks" keemilisel reaktsioonil vabanev energia. Nähtuse, kus keemilise reaktsiooni tulemuseks on potentsiaalide vahe teke, avastas 1786. a. itaalia bioloog L. Galvani, voolu saamiseks kasutas teda esimesena Volta (Volta samm, 1799).

Põhimõte on järgmine:

a) Kui elektrolüüti (soola, happe, aluse) vesilahusesse lasta aktiivsest ainest (näit. tsingist) elektrood, algab keemiline reaktsioon, mille käigus elektroodi aine (tsink) tõrjub lahusest välja temast *elementide aktiivsuse reas*

K Ca Na Mg Al Zn Fe Sn Pb H Cu Hg Ag Au
paremal paikneva vesiniku.

Et tsinkelektroodi juures saaks tekkida tsinkkloriidi molekul, peab elektrood ära andma ühe Zn^{+} iooni, mille tagajärjel saab algselt neutraalne elektrood lahuse suhtes negatiivse laengu.

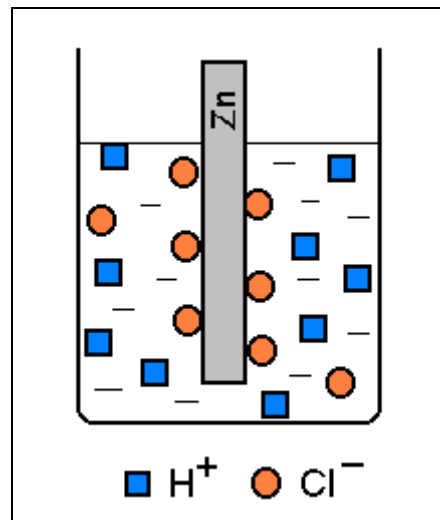
Selline elektrood tõmbab ligi positiivseid ioone (H^{+}), mis aga tsingiga ei reageeri. Seetõttu toimub ainult tsinkelektroodi "lahustumine", mille käigus tema negatiivne laeng kasvab seni, kuni selle elektriväli ei lase enam ligi kloori ioone. Tulemusena omandab elektrood lahuse suhtes kindla potentsiaali, mille suurus ligikaudu võrdub ühendi $ZnCl$ keemilise seose potentsiaaliga.

b) Kui nüüd laseme lahusesse teise, neutraalse (vask, süsinik) elektroodi, saame vooluallika, mille elektromotoorjõud vastab keemiliselt kujunenud potentsiaalide vahele.

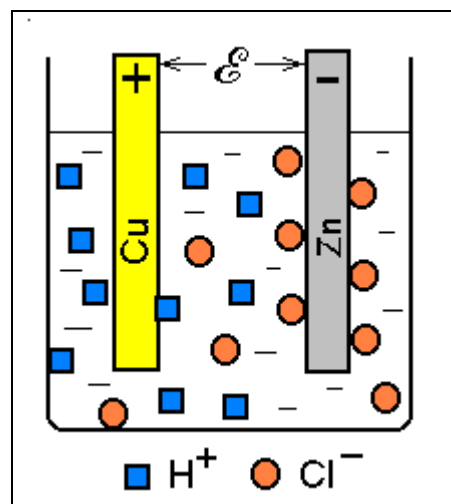
c) Kui elektroodid ühendada, tekib vool, mille tugevus sõltub elektromotoorjõust, juhtme takistusest ja lahuses toimuva reaktsiooni kiirusest - viimane määrab meie vooluallika *sisetakistuse* r .

Nii sisetakistus kui elektromotoorjõud sõltuvad temperatuurist: soojendamisel sisetakistus väheneb (miks?) ja elektromotoorjõud kasvab (jälle miks!). Veel sõltub sisetakistus lahuse kontsentratsioonist ja aktiivse elektroodi pindalast. Reaktsiooni käigus lahus loomulikult nõrgeneb, elektroodi aktiivne pind kattub sooladega - kõik kokku viib sisetakistuse kasvamisele. Selle tõttu element "põleb läbi", tema töövool langeb ning vaatamata elektromotoorjõu säilimisele pole ta enam kasutatav.

Keemilised vooluallikad töötavad ühendite (keemilise) seose-energia arvel.



Soolhappe lahusesse viidud tsinkelektrood omandab reaktsiooni käigus negatiivse laengu.



Kui lahusesse viia neutraalne elektrood, tekib selle ning tsinkelektroodi vahel püsiv potentsiaalide vahe - elektromotoorjõud.

Alalisvoolu ahelate arvutamine

Seadmete lülitamisel vooluvõrku tuleb jälgida, et nende normaalseks tööks vajalikud parameetrid (pinge, voolutugevus) oleks kooskõlas teiste, samast vooluallikast energiat tarbivate seadmetega. Alalisvoolu seadmetele antakse tavaliselt võimsus ja tööpinge; harvemini takistus või ettenähtud voolutugevus. Et loetletud suurused on omavahel seotud Ohm'i ja Joule-Lenz'i seadustega, piisab alati kahest parameetrist.

Näiteks: Hõõglamp, $U_{\text{nom}} = 36 \text{ V}$, $N_{\text{nom}} = 40 \text{ W}$.

Joule-Lenz'i seadusest:

$$N = \frac{Q}{t} = I^2 R$$

Ohm'i seaduse $I = U/R$ abil saame kõrvaldada I või R :

$$N = I^2 R = IU = \frac{U^2}{R}$$

Antud lambi jaoks:

$$I = \frac{N}{U} = 1.1 \text{ A}; \quad R = \frac{U^2}{N} = 32.4 \Omega.$$

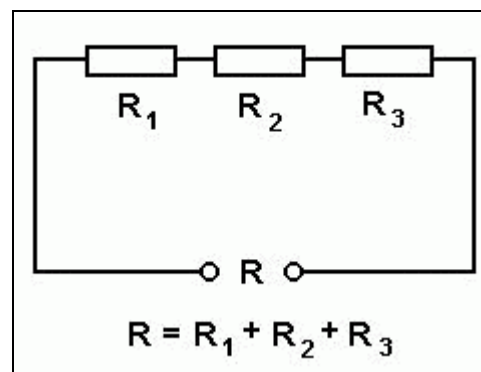
Alalisvoolu ahelate koostamisel/arvutamisel lähtutakse tavaliselt allika pingest ning ahela koostisosade (tarbijate) takistusest. Voolutugevuse leidmiseks on tarvis kõigepealt arvutada ahela kogutakistus ning alles seejärel saame leida pingelangud üksikelementidel. Lihtsate ahelate korral on võimalik teha arvutused aste-astmelt, keerulisematel juhtudel (sildlülitus, mitu vooluallikat) tuleb lahendada võrrandisüsteem.

Jadalülituse korral on meil üks mittehargnev mitmest takistist koosnev vooluring. Et ahel on lineaarne, peab vool läbi kõigi tarbijate olema ühesugune.

$$U = IR_1 + IR_2 + IR_3 + \dots = I(R_1 + R_2 + \dots),$$

mida võib kirja panna ka kogutakistuse R abil

$$U = IR; \quad R = R_1 + R_2 + \dots$$



Jadalülitus.

Jadalülituse kogutakistus on võrdne selle elementide takistuste summaga

Rööplülituse korral on pingelang kõigil takistitel ühesugune:

$$I_1 R_1 = I_2 R_2 = I_3 R_3 = \dots = U = IR$$

$$I = \frac{U}{R_1} + \frac{U}{R_2} + \dots = \frac{U}{R} = U \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots \right),$$

kust

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots$$

Kombineeritud lülitus, nagu nimigi ütleb, sisaldab korraga nii jada- kui rööpühendusi. Pingete-voolude arvutamisel jagatakse ahel osadeks, mida arvutatakse eespool toodud valemite abil.

$$\frac{1}{R'} = \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}; \quad R = R_1 + R'$$

$$I_1 = \frac{U}{R}; \quad IR' = U - I_1 R_1 = U'; \quad I_2 = \frac{U'}{R_2}; \quad I_3 = \frac{U'}{R_3}.$$

Nii ongi kõik voolud leitud.

Sildlülitus. Kui R_5 puuduks, oleks tegemist tavalise hargneva ahelaga. R_5 ühendab selle ahela harud, oleks **sillaks**. Kui nüüd ahelad $R_1 R_2$ ning $R_3 R_4$ on ebasümmeetrilised, tekib sillas vool, mille tugevus on kooskõlas takistuste suhtega ahela harudes.

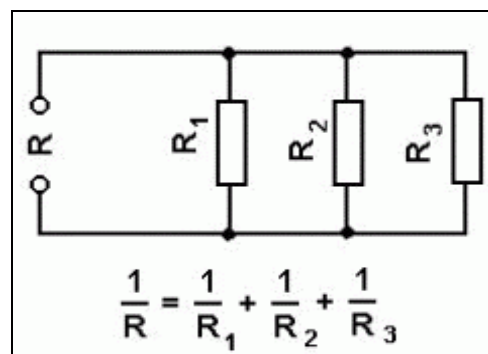
Sildskeemide arvutamisel lähtutakse kahest endastmõistetavast eeldusest, mida väljendavad nn. **Kirchoffi reeglid**:

- Summaarne vool hargnemispunktis on null

$$\sum \vec{I}_i = 0$$

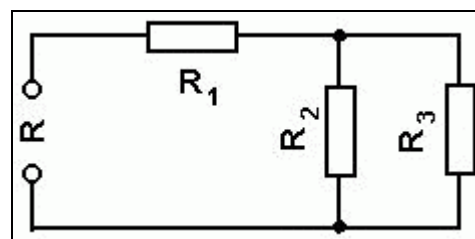
- Pingelangude summa igas suletud alamringis peab võrduma sellesse ringi kuuluvate vooluallikate elektromotoorjõudude summaga

$$\sum \vec{I}_i R_i = \sum \vec{\mathcal{E}}_i$$

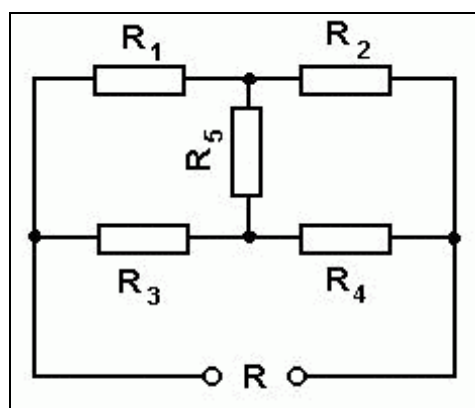


Rööplülitus.

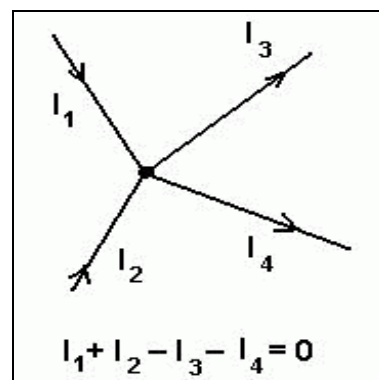
Rööplülituse kogutakistuse pöördväärtus (ahela kogujuhtivus) on võrdne selle elementide takistuste pöördväärtuste (juhtivuste) summaga.



Kombineeritud lülitus.



Sildlülitus.



Kirchoffi esimene reegel.

NB! Ahela hargnemispunkt märgitakse alati tumeda täpiga!

Vektorimärk voolutugevuste ning elektromotoorjõu tähise kohal on loomulikult matemaatiliselt ebakorrektn. Panin ta sinna rõhutamaks, et nende suuruste märgid valemis olenevad voolu suunast ja allika polaarsusest.

Esimeses reeglis võetakse positiivseks punkti sisenev vool (toob laengut juurde), negatiivseks aga väljuv vool (viib laengut ära). Teise reegli rakendamisel on märkide valik kokkuleppeline.

Kõigepealt valime (suvalise) ümberkäigusuuna. Kui ringis on vooluallikas, võtame suuna vastavaks voolu suunale selle allika klemmide vahel; kui allikat ei ole, on jumalast üksipuha. Nüüd võtame positiivseks kõik need pingelangud, kus voolu suund ühtib ümberkäigusuunaga ja negatiivseks need, kus voolu suund on vastupidine. Kui mingi takisti kuulub kahte erinevasse alamringi, peab voolu suund sellel takistil olema mõlemal juhul ühesugune.

Iga Kirchhoffi reegli rakendus annab meile ühe võrrandi; saadud võrrandid moodustavad **süsteemi**, mille lahendamisel leiame otsitavad voolutugevused.

Tuleb arvestada, et osa võrrandeid on lineaarselt sõltuvad: nii näiteks meie sildskeemil on vooluringile $R_1 R_2 R_3 R_4$ vastav võrrand võrdne ringidele $R_1 R_5 R_3$ ja $R_4 R_5 R_2$ vastavate võrrandite summaga. Kui kõik on õigesti kirjutatud, saame alati täieliku lineaarvõrrandite süsteemi, kus võrrandite arv võrdub tundmatute arvuga.

Meie sildskeemist saame 5 sõltumatut võrrandit:

$$I_1 - I_2 - I_5 = 0$$

$$I_3 + I_5 - I_4 = 0$$

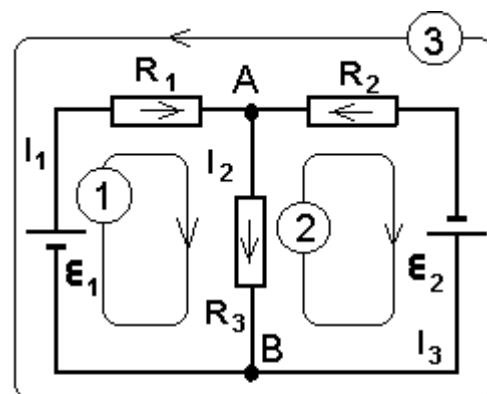
$$I_1 R_1 + I_5 R_5 - I_3 R_3 = 0$$

$$I_5 R_5 + I_4 R_4 - I_2 R_2 = 0$$

$$I_3 R_3 + I_4 R_4 - U = 0,$$

viimane valem on tavalise jadalülituse oma.

Kui allika pinge U ja kõigi takistite suurused on teada, saame siit leida kõik voolud.



$$1: I_1 R_1 + I_2 R_3 = -E_1$$

$$2: -I_2 R_3 - I_3 R_2 = -E_2$$

$$3: -I_1 R_1 + I_3 R_2 = E_1 + E_2$$

Kirchoffi teine reegel.

Kirchoffi märgireegel: summa element võetakse miinusmärgiga, kui alamahela ümberkäigusuund on vastassuunaline vooluallika polaarsusega (elektromotoorjõu märk) või voolu suunaga takistil (pingelangu märk).

Elektrijuhtivuse teooriatest

Lisatekst

Elektriõpetusega on lood nii, et praktiliste rakenduste tohutu hulk tekitab otsekohe ka vastava inseneriteaduse - *elektrotehnika*. Hiljem eraldus sellest *elektroonika* (nõrkade voolude juhtimine) - algselt raadiotehnika, praeguseks 90% ulatuses infotöötlust ja automaatikat kandev eriteadus. Neid mõlemaid finantseerib tööstus, mistõttu nii uurijate arv kui uurimistööks eraldatav raha ületab mäekõrguselt mistahes "puhta teaduse" oma.

Füüsika kui tunnetusliku iseloomuga teadus on kehvemas olukorras. Mis veelgi hullem - et suurem osa rakenduslikke uuringuid on salastatud (nii sõjalistel kui majanduslikel kaalutlustel), ei tarvitse füüsikud "kogu tõde" üldsegi teada. Seevastu on neil terviklik maailmapilt, kuhu nad püüavad sobitada "tehnilise iseloomuga" fakte.

Elektrijuhtivuse järgi jaotatakse ained juhtideks ja isolaatoriteks, takistuse temperatuurisõltuvusest lähtudes veel metallideks (takistus suureneb temperatuuri kasvades) ning pooljuhtideks (takistus väheneb). Oleku järgi võib juhte jagada tahketeks, vedelateks ja gaasilisteks, jne. Igale juhtivuse tüübile vastab kindel teooria - õigemini küll mudel.

A. Tahked ained

Metallid on elektrotehnika põhimaterjal. Ülekandeliinides huvitab meid võimalikult väike, kütteseadmetes seevastu suur eritakistus. Juhtivusmehhanismina on metallide jaoks levinuim *elektrongaasi teooria*.

Seda, et laengukandjaiks metallis on elektronid (mille avastas Thomson 1897. a.), tegid kindlaks Tolman ja Stewart 1916. a., mõõtes pöörleva pooli pidurdumisel tekkiva inertsivoolu tugevust.

Et eritakistuse temperatuurisõltuvuse valem $\varrho = \varrho_0(1 + \alpha t)$ on sarnane ideaalse gaasi Charles'i ja Gay-Lussac'i valemeile, kujunes nn. *juhtivuse klassikaline elektronteooria* (Drude, Lorentz 1895).

Selle teooria järgi kujutab metall endast ruumilist (kristall)võret, mille sõlmedes asuvad osa elektrone kaotanud aatomite tuumad - ioonid. "Kaotsi läinud" elektronid ise saavad vabalt liikuda kogu metallitüki piires, käitudes seejuures ideaalse gaasina.

Elektritakistust seletatakse elektriväljas kiirendusega liikuvate elektronide perioodiliste põrgetega kristallvõre sõlmede vastu, mille tagajärjel nad kaotavad omandatud kiiruse.

Nii kujuneb elektronide välisest väljast tingitud nn. *triivkiirus* v_E , mis neah olema võrdne laengute suunatud liikumise kiirusega

voolutiheduse valemis $\vec{j} = nq\vec{v}$:

$$\vec{v}_E = \frac{\vec{a}_E \tau}{2} = \frac{q\vec{E} \tau}{m \cdot 2} = \frac{\vec{j}}{nq}$$

Põrgete vahelise aja leidmiseks peame teadma elektronide liikumiskiirust ning keskmist vaba tee pikkust kristallvõres. Klassikalises teoorias võetakse elektroni liikumiskiiruseks soojusliikumise ruutkeskmine kiirus

$$v_s = \sqrt{\frac{3kT}{m_e}},$$

mis temperatuuril 300K tunduvalt ületab triivkiiruse ($v_s \approx 10^5 \text{ m/s}$ versus $v_E \approx 10^{-3} \text{ m/s}$). Seetõttu saame:

$$\tau = \frac{\lambda}{v_s}; \quad \frac{\vec{j}}{ne} = \frac{e\vec{E}\tau}{2m_e} = \frac{e\vec{E}\lambda}{2m_e v_s}$$

Siit avaldame voolutiheduse

$$\vec{j} = \frac{ne^2\lambda}{2m_e v_s} \vec{E},$$

mis langeb kokku Ohm'i seadusega vektorkujul $\vec{j} = \sigma \vec{E}$. Seega annab klassikaline elektronteooria metallide eritakistuse jaoks valemi:

$$\rho = \frac{1}{\sigma} = \frac{2m_e v_s}{ne^2 \lambda}.$$

Siin m_e , e on universaalkonstandid (elektroni mass ja laeng), n , λ sõltuvad keskkonnast (ainest) ja v_s peaks määrama eritakistuse sõltuvuse temperatuurist.

Paraku tuleb siin vastuolu: teame, et eritakistus on võrdeline temperatuuriga, valemis aga seisab ruutkeskmine kiirus, mis on võrdeline ruutjuurega temperatuurist.

Joule-Lenzi seaduse saame, eeldades et kogu elektronide poolt elektriväljas liikudes kogutud kineetiline energia moondub põrgetel soojuseks. Võttes ühel pörkel eralduvaks soojushulgaks

$$Q = E_k = \frac{m_e v_{max}^2}{2}$$

($v_{max} = 2v_F$ on elektroni maksimaalne kiirus pörkemomendil), saame ruumiühikus ajaühiku kohta eralduva energia (erivõimsuse):

$$w = N E_k = \frac{n}{\tau} \frac{m_e v_{max}^2}{2} = \frac{n v_s}{\lambda} \frac{m_e}{2} \left(\frac{e E \lambda}{m_e v_s} \right)^2,$$

ehk pärast lihtsustamist

$$w = \frac{ne^2 \lambda}{2m_e v_s} E^2,$$

nagu juba teada empiirilisest valemist.

Juhtivuse klassikaline teooria annab elektrijuhtivuse mehhanismist hästimõistetava piltliku ettekujutuse: vabadest elektronidest koosnev "gaas" metallitüki sees. Metallist *väljuda* ei saa elektronid sel lihtsal põhjusel, et nad *omavad laengut*. Iga elektroni lahkumine põhjustab metallitüki positiivse laengu, mille elektriväli sunnib lahkunud elektroni tagasi pöörduma.

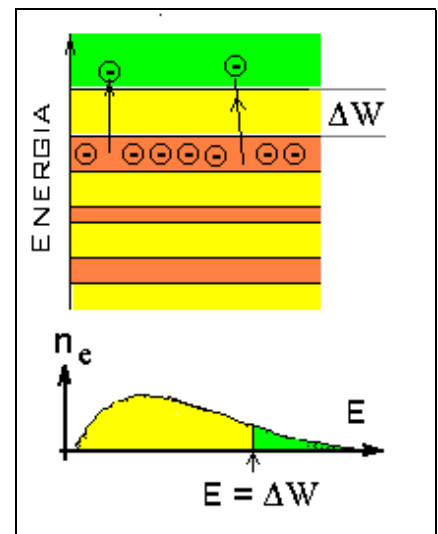
Metallitükki ümbritseb alati elektronide pilv, mille ulatus on seda suurem, mida kõrgem on metalli temperatuur. Seda nähtust (elektronide väljumine metallist soojusliikumise tõttu) nim. **termoelektriliseks emisiooniks** ja kasutatakse vaakumelektronikas (elektronlambid, elektronkiiretoru jms.).

Pooljuhid erinevad metallidest suurema eritakistuse ja selle ümberpööratud temperatuurisõltuvuse (vaata ülalpool, lõik "eritakistus") poolest.

Erinevuse põhjuseks peetakse asjaolu, et pooljuhtides pole laengukandjad "täiesti vabad", vaid on seotud kristallvõre sõlmede - ioonidega. Elektroni vabastamiseks peab tema kineetiline energia olema suurem teda iooniga siduvate (elektri)jõudude potentsiaalsest energiast. Kui nüüd oletada kiiruste Maxwelli jaotust, saame "vabadeks" lugeda vaid osa elektronidest, pealegi väga väikest osa.

Energiavahet ΔW , mis jääb puudu täielikust vabadusest, nimetatakse *keelutsooni laiuseks* (termin on pärit kvantmehaanikast, praegu ei täpsusta) ning seetõttu saame vabade elektronide tiheduseks

$$n_{vabad} = n e^{-\frac{\Delta W}{2kT}}$$



Keelutsoon pooljuhis:

ülemisse "juhtivustsooni" (joonisel roheline) pääsevad ainult need elektronid, mille soojuslik energia ületab keelutsooni (kollane) laiusele võrdse energia ΔW . Alumiste "täidetud" tsoonide elektronidel liikumisvõimalus puudub.

Näeme, et pooljuhtides kasvab laengukandjate arv temperatuuri tõustes; ja ehkki ka siin mõjuvad takistavalt elektronide põrked kristallvõrega, on laengukandjate arvu suurenemisest tingitud juhtivuse tõus olulisem eritakistuse suurenemisest temperatuuri tõttu.

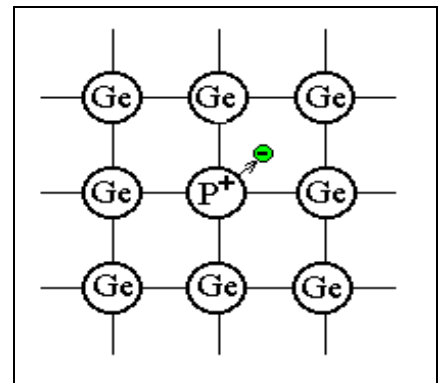
Kui $kT \rightarrow \Delta W$ ja laengukandjaid on juba piisavalt, hakkab kehtima normaalne temperatuurisõltuvus $\rho \sim T$.

Juhtivuse sellist liiki, kus laengukandjad vabanevad kristallvõrest soojusliikumise toimele, nim. pooljuhtide teoorias **omajuhtivuseks**.

Sellest erinev on **lisandjuhtivus**, kus laengukandjaid tekitatakse kunstlikult, lisades lähteainele kõrgema või madalama valentsiga lisandeid. Lisandiatomite "sobitamisel" kristallvõresse jääb elektrone "üle" (kui lisandi valents on kõrgem lähteaine omast) või tuleb puudu (kui valents on madalam).

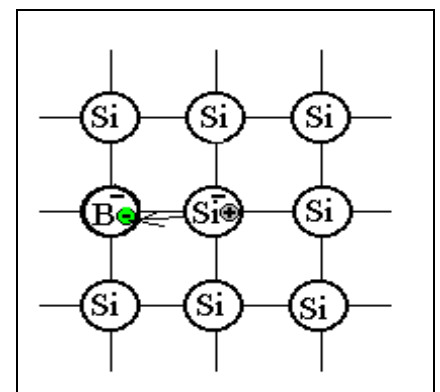
Esimesel juhul tekivad kristallis vabad elektronid, millele vastab *elektronjuhtivusega e. n-pooljuht*. Valentselektronide puudujääk seevastu tekitab võres laengudefekti - nn. "augu". Elektriväljas selline "auk" nihkub ja võib haarata puuduva elektroni naaberaatomilt. Nii tekivad "triivivad augud", millele siis vastab *aukjuhtivusega ehk p-pooljuht*.

Pooljuhtide elektriliste omaduste mitmekesisus ning terav sõltuvus välistingimustest teeb neist ideaalse materjali elektrooniliste seadmete konstrueerimisel. Lihtsamatega neist tutvume laboris.



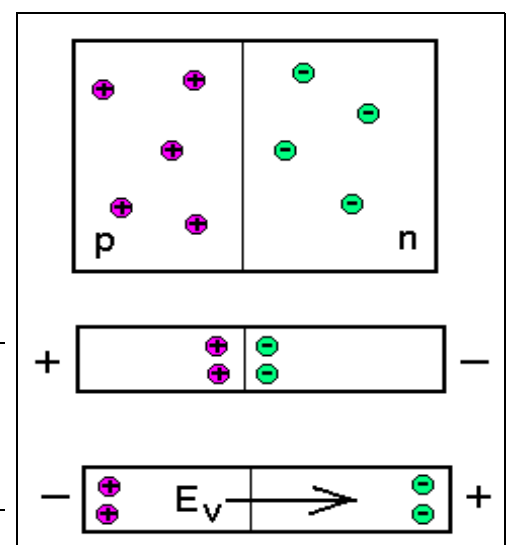
n - pooljuht (elektronjuhtivusega pooljuht).

Kristallvõresse viidud nn. doonorlisandi fosfori aatomil on üks elektron rohkem, see ülearune elektron jääbki kristallis vabalt liikuma.



p - pooljuht (aukjuhtivusega pooljuht)

Lisandi - boori aatomil on üks elektron vähem kui ränil - alumises täidetud tsoonis tekib vaba koht (nn. "auk"), kuhu võib sattuda elektron naaberaatomi juurest.



Pooljuht-ventiil:

n- ja p-pooljuhte eraldavat pinda läbib vool vaid siis, kui elektriväli suunab nii elektronid kui "augud" eralduspinna poole. Vastassuunalise pinge korral tekib pooljuhtide eralduspinnal vastassuunalise väljaga E_v tõkkekiht.

Ülijuhtivus. 1911. a. avastas Kammerlingh-Onnes, et ülimadalatel temperatuuridel (alla 4.2K) muutub elavhõbeda elektritakistus nulliks. Hilisemad uurimused on näidanud, et nii käitub enamik materjale, sõltumata sellest, millised on nende elektrilised omadused normaaltemperatuuril. Takistuse kadumine, mis klassikalise füüsika seisukohalt on võimatu, saab seletuse kvantmehaanikas.

Tehnikas kasutatakse ülijuhte võimsate elektromagnetite valmistamiseks, aga ka elektroonilistes seadmetes. Ülijuhtivuse uurimine on üks kõige paremini finantseeritud alasid elektriuringutes. Eesmärgiks on leida aineid, mis saavutaksid ülijuhtiva oleku kui mitte just toatemperatuuril, siis vähemalt vedela lämmastiku temperatuuril (77K). See muudaks ülijuhtivad seadmed oluliselt odavamaks, kui praegused, vedela heeliumiga jahutatavad. 1985. a. avastati kindla struktuuriga keraamiliste ühendite ülikõrgtemperatuurne (93K) ülijuhtivus.

Paraku on need ained ebastabiilsed ja halvasti töödeldavad, mistõttu esialgsed lootused nende kiireks tehnoloogiliseks rakendamiseks pole end õigustanud.

B. Elektrolüüdid

Elektrolüüdi all oleme harjunud mõistma elektrit juhtivat vedelikku. Üldiselt on aga nii, et vedelad ained (sulametall välja arvatud) elektrit ei juhi. Küll on aga headeks elektrijuhtideks enamiku liitainete (aluste, hapete, soolade) vesilahused - neid me siis elektrolüütideks nimetamegi. Puhas vesi ise elektrit ei juhi.

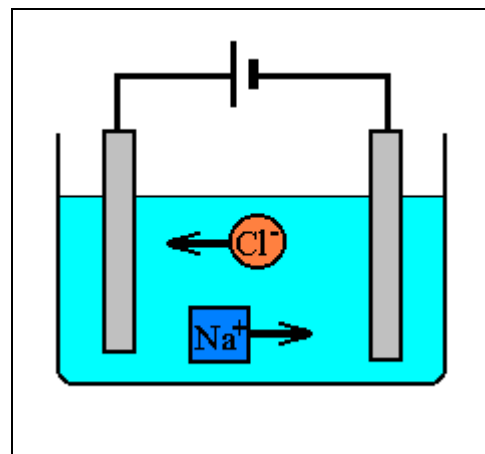
Vee väike tugevalt polaarne molekul on suuteline tungima suuremaid molekule moodustavate ionide vahele ning neid osadeks lõhkuma. Seetõttu ei sisalda näiteks keedusoola vesilahus mitte **NaCl** molekule, vaid naatriumi positiivseid (**Na⁺**) ja kloori negatiivseid (**Cl⁻**) ioone. Endastmõistetavalt juhib selline vedelik elektrit.

Elektrolüütides kehtib Ohm'i seadus:

$$\vec{j} = (n^+ e^+ \vec{u}^+ + n^- e^- \vec{u}^-) \vec{E} = \sigma \vec{E},$$

sulgavaldises tähistab n ionide kontsentratsiooni, $\vec{u}$ - liikuvust (mitte ära segada kiirusega!).

Liikuvus sõltub vedeliku viskoossusest (sisehõõrdest) ning iooni külge "kleepunud" veemolekulide hulgast. Et temperatuuri tõustes mõlemad vähenevad, siis soojendamine suurendab lahuse juhtivust (vähendab eritakistust).



Vool elektrolüüdis:

negatiivsed ioonid suunduvad positiivse, positiivsed ioonid negatiivse elektroodi poole. Koos nendega kandub elektrodidele ka aine.

Elektrolüüs. Mis saab elektrodidele jõudnud ionidest? Ilmselt annab klooriioon ülearuse elektroni positiivsele elektrodile (anoodile) ning leidnud omale paarilise, lahkeb gaasimullina lahusest. Naatriumiga on halvem - tal ei jää üle muud, kui kleepuda negatiivsele elektrodile (katoodile) külge. Et naatrium on keemiliselt aktiivne, haarab ta veest hapnikuaatomi ning seetõttu ladestub katoodile mitte metalliline naatrium, vaid naatriumoksiid.

Metallide aktiivsuse reas vesinikust paremale jäävad metallid (**Cu, Ag, Ni**) sadestuvad puhtal kujul.

1836. a., tehes elektrolüüsikatseid erinevate ainetega, avastas M. Faraday kaks lihtsat seadust:

- **Elektroodil eralduva aine mass on võrdeline elektrolüüti läbinud laenguga.**

$$m = Kq = kIt$$

Võrdetegur k sõltub ainest ja teda nimetatakse *elektrokeemiliseks ekvivalendiks*.

- **Aine elektrokeemiline ekvivalent on võrdeline aatommassi ning pöördvõrdeline valentsiga.**

$$k = \frac{1}{F} \frac{A}{z}$$

Suurust $F = 96.5 \cdot 10^6 \text{ C/kg} - \text{ekv}$ nim. *Faraday arv*uks.

Mõlemad seadused saab kokku võtta ühte valemisse:

$$m = \frac{1}{F} \frac{A}{z} q.$$

Faraday arvu väärtuse saame vahetult molekulaarfüüsikast:

- - iga z -valentne ioon omab laengut ze ja massi $m_i = A/N_A$
- - laeng q viib üle $n = \frac{q}{ze}$ iooni kogumassiga

$$m = nm_i = \frac{q}{ze} \cdot \frac{A}{N_A} \cdot .$$

Seega

$$N_A \cdot e = 6.02 \cdot 10^{26} \cdot 1.6 \cdot 10^{-19} = 9.65 \cdot 10^{-7} = F$$

Faraday seadus(ed) lubavad defineerida laenguühikut:

1 kulon on selline laeng, mis elektrolüüsil eraldab hõbenitraadi lahusest 1.118 mg hõbedat.

Kunagi sellist definitsiooni isegi kasutati. Hea deff, aga täpsust napib: ta ei arvesta isotoopkoostist ja ega need mõõtmisedki lihtsalt ei tule.

Elektrolüüs toimub mitte ainult vesilahustes, vaid ka sulakivimites. Näiteks toodetakse praktiliselt kogu alumiinium alumiiniumoksiidi elektrolüüsi teel. Kuni seda tehnoloogiat ei tuntud, oli alumiinium ja teised aktiivsed metallid ülikallid; praegu on alumiinium maailmatoodangus raua järel teisel kohal. Elektrolüüsi tehnilistest rakendustest mainiksin veel galvanosteeegiat - ainete katmist õhukese metallikihi (nikeldamine, kroomimine, hõbetamine jt.).

Keemilised vooluallikad

Elektrolüüsil vajasime vooluallikat, et lõhkuda muidu keemiliselt stabiilseid ühendeid. Praktikas on võimalik ka vastupidine tegevus - saada elektromotoorjõudu (vooluallikat) keemiliselt aktiivsete ainete reageerimisel. Kuidas selline vooluallikas töötab, sellest oli juttu eespool (elektromotoorjõu osas).

Akumulaator. Erinevalt Galvani elemendist, kus reaktsioon on mittepööratav, on akumulaator konstrueeritud nii, et temast voolu läbilaskmisel tekivad elektrolüüdi suhtes aktiivsed ained, mis hiljem reageerides tekitavad elektromotoorjõu.

Tänapäeval on enamkasutatav *plii-happeaku* ($\mathcal{E} = 2 \text{ V}$, kasutegur 80%) ning *leelisakud* $\mathcal{E} \approx 1.25 \text{ V}$, 55%).

Aku *energiamahutavus* sõltub mõõtmetest, seda väljendatakse *ampertundides*.

Elektrolüüt-kondensaator. Akude eripäraks galvaani elementidega võrreldes on kaduvväike sisetakistus. See asjaolu võimaldab neid kasutada kondensaatorina. Elektrolüüt-kondensaator kujutab endast ülikiiret akumulaatorit; et tema mahtuvus sõltub ainult mõõdetest, võib see ulatuda üsna faradi lähedale. Reagendiks on tavaliselt $\text{Al}(\text{OH})_3$, mis voolu toimel redutseerub veeks ja alumiiniumoksiidiks (Al_2O_3).

C. Vool gaasides

Definitsiooni järgi koosneb gaas vabadest molekulidest; et need peavad olema elektriliselt neutraalsed, ei saa gaas elektrit juhtida. Et gaasilises keskkonnas tekiks vool, tuleb seal kõigepealt tekitada laengukandjaid.

Voolu gaasides nimetatakse *elektrilahenduseks* (*gaaslahenduseks*). See lahendus võib olla kaht tüüpi:

1. Sõltuv lahendus, kui laengukandjaid (ioone, elektrone) tekitab mingi kõrvaline allikas (soojus, valgus, radioaktiivne kiirgus).

Sõltuva lahenduse voolutugevus

- nõrkade voolude korral on ligikaudu võrdeline pingega (kehtib Ohm'i seadus); takistus kahaneb temperatuuri tõustes.

- tugevate voolude korral omandab statsionaarse väärtuse

$I_{max} = q \frac{dn}{dt}$, kus $\frac{dn}{dt}$ on ionide tekkekiirus (allika võimsus).

Voolu I_{max} nimetatakse *küllastusvooluks*.

2. Sõltumatu lahendus, kui laengukandjaid tekitab elektriväli ise, kas siis tema poolt esile kutsutud voolu või otseselt elektrijõudude toimel.

a) Madalatel pingetel - õigem oleks öelda väikese väljatugevuse korral, kuna gaas on alati keskkond, mitte juhe - nimetatakse lahendust *kustuvaks e. Geigeri lahenduseks*.

Kustuvas lahenduses tekitab laengukandjaid elektriväljas kiirendatud ionide põrge neutraalsete aatomitega. Et selleks peab mingi vool juba olema, on lahenduse tekitamiseks vaja algtõuget ja voolu katkemisel lahendus uuesti ei teki, vaatamata välja olemasolule. Geigeri lahendus tekib siis, kui

$$W_i \leq Eq\lambda = m_i v^2 / 2$$

$$E_G \leq E \leq E_L$$

W_i - ionisatsiooniennergia;

E - väljatugevus;

E_G - kustuva lahenduse lävitugevus;

E_L - läbilöögi väljatugevus, mille korral gaasi molekulid lagunevad ionideks elektrivälja jõudude toimel.

Kustuvat lahendust, mis toimub vabas õhus normaalarõhul, nimetatakse *kaarlahenduseks* (kaarlamp, elektrikeevitus); hõrendatud gaasis toimuvat lahendust *huumlahenduseks* (reklaamtorud, päevavalguslambid).

b) Kõrgetel pingetel ($E > E_L \approx 10^6 \text{ V/m}$) on kaks võimalikku lahenduse tüüpi:

- **sädelahendus** ligikaudu homogeense välja korral
- **koroonalahendus** (õigemini kroonlahendus) tugevalt mittehomoogeense välja korral, näiteks elektroodi teravikul.

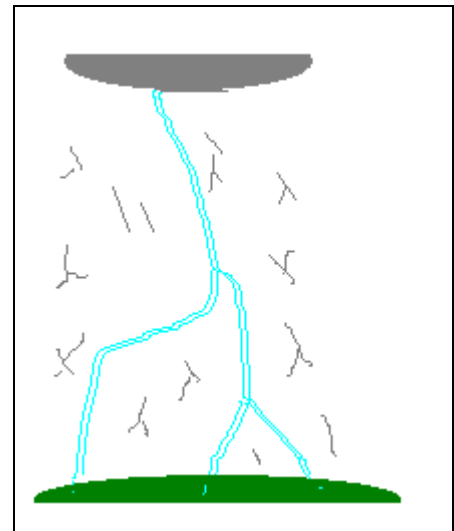
Säde- ja koroonalahendus tekib alati staatilises väljas. Kui on olemas märkimisväärne elektromotoorjõud, kasvab lahendus kiiresti ülivõimsaks kustuvaks lahenduseks - tulemuseks on elektrisüsteemi häving või tulekahju. Staatiliste laengutega on lihtsam, need neutraliseeruvad lahenduse käigus.

Sellelipoolest on tugev sädelahendus ("väike välg") kaunis ohtlik ja tema vältimiseks kasutatakse teravatipulisi *koroneerivaid elektroode*, asendades lühiajalise välgu pideva, kuid nõrga koroonalahendusega.

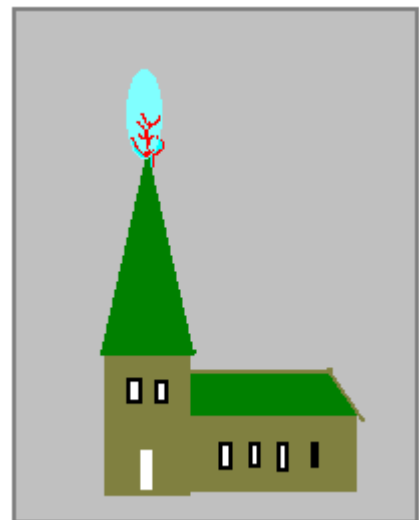
Miks välg pole sirge?

Sellepärast, et gaasimolekulide lagunemine välja toimel on statistilist laadi protsess. Kui molekulid lagunevad kogu väljas korraga, tekiks sädeme asemel küllalt rahulik vool. Tegelikult tekib väljatugevuse lähenemisel kriitilisele läbilöögitugevusele kogu välja ulatuses väikesemõõdulisi kustuvaid lahendusi, nn *striimereid*.

Selline striiimer on mõne sentimeetri pikkune kaskaadlahendus, mis kustub iseenesest potentsiaali ühtlustumise tagajärjel. Säde tekib juhuslikult paiknevate striiimerite ühinemisel, mille tulemusena tekib *ionisatsioonikanal*, mis ei tarvitse olla sirge ja võimsa lahenduse korral võib ka hargneda. Piki seda kanalit toimubki laengute "maandamine".



Striimerid ja võlgukanal



Striimerid koroneerival elektroodil - "Püha Elmo tuled".