E. KILKSON JA J. LANG

FÜÜSIKA

GÜMNAASIUMI V KLASSILE

TARTU EESTI KIRJASTUS

A-14351

E. KILKSON JA J. LANG

FÜÜSIKA

GÜMNAASIUMI V KLASSILE

MAGNETISM JA ELEKTER VOOLAMISNÄHTUSI

TARTU EESTI KIRJASTUS

i33074240

Korrektor A. Tigane.

Trükikäitis „POSTIMEES", Tartu, 1943.

TARTU ÜLIKOOLI
RAAMATUKOGU

Eessõna.

Käesolev „Füüsika gümnaasiumi V klassile" on koostatud 1938. a. õppekavade alusel. Et see õpik on mõeldud kasutamiseks ka reaalharus, hõlmab siin esitatud materjal mõlema koolitüübi kava. See osa materjalist, mis määratud ainult reaalharule, välja arvatud viimne peatükk („Voolamisnähtusi"), on laotud peenema kirjaga. Ka on peenema kirjaga laotud mõned eriküsimused, mis otseselt õppekavas pole tähendatud, kuid mis autorite arvates on tarvilikud läbivõetud materjali selgitamiseks või täiendavaks illustreerimiseks.

Materjali järjekord raamatus vastab üldiselt õppekavale, välja arvatud üksikud väiksemad erandid. Nii näiteks on koondatud ühte elektrimõõduriistad ja elektrimasinad nende hõlpsama käsitlemise huvides.

Raamatus pole käsitlemist leidnud küsimused, mis eelmistes klassides läbi võetud ja millede uuesti esiletoomine pole vajalik läbivõetavast materjalist arusaamiseks. Sel põhjusel on käesolevast raamatust välja jäetud elekterkõlistaja, telegraaf ja mõned teised küsimused. Et neid ka õppekavas pole ette nähtud, siis ei tohiks see raamatule puuduseks olla.

Parema kujutluse andmiseks õpilastele elektrilistest nähtustest, eriti aga elektrivoolust, on rõhutatud osa, mida etendab

seejuures elektron. Elektrivoolu metallides ongi kirjeldatud kui elektronidevoolu.

Samuti on seniste raamatutega võrreldes laiemat käsitlemist leidnud aatomi ehitus ja sellega seoses olevad küsimused, nagu radioaktiivsus, arvestades viimase nähtuse suurt tähtsust moodsas füüsikas ja keemias.

Tartus, juulikuul 1942.

Autorid.

MAGNETISM.

1. Magneti põhiomadused. Magnetiteks nimetatakse kehi, mis rauda ja terast ning vähesel määral ka niklit ja koobaltit külge tõmbavad. Magnetid võivad olla loomulikud ja kunstlikud. Loomulikuks magnetiks on magnetiline rauakivi (Fe_3O_4), mida leidub mõnes kohas maa sees. Kunstlikud magnetid valmistatakse karastatud terasest. Kunstlikule magnetile antakse harilikult varva või hobuseraua kuju.

Tugevamad magnetid valmistatakse volfram- ja koobaltterasest (teras, mis sisaldab pisut volframit või koobaltit).

Uuemal ajal on leiutatud mitmesuguseid sulameid, milledest võib valmistada eriti tugevaid magneteid. Nii kasutatakse elektrotehnikas kunstlike magnetitena örstiiti, mis sisaldab peale raua veel alumiiniumi, koobaltit ja niklit.

Magnetiline tõmbe- ja tõuketung magnetis pole igal pool ühesuurune, vaid see on koondunud magneti kahte punkti, tavaliselt otstesse. Neid punkte nimetatakse **magneti poolusteks.**

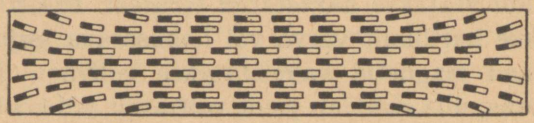
Teravikule asetatud või niidi otsa riputatud vaba magnet asetub alati nii, et ta üks poolus näitab põhja, teine lõuna poole. Seda poolust, mis põhja poole näitab, nimetatakse põhjapooluseks (tähis N), teist vastavalt lõunapooluseks (tähis S). Sellel magneti omadusel põhineb kompassi ehitus, mille tähtsamaks osaks on teravikule asetatud õhuke piklik magnet (magnetnõel). Kompassi tarvitatakse peamiselt merel ja reisudel ilmakaarte määramiseks.

Katsed näitavad, et **samanimelised poolused tõukuvad, isenimelised tõmbavad üksteist külge.**

Magneti poolitamisel ei saada kunagi ainult ühe poolusega magnetit, vaid igal magnetiosal on kaks poolust, üks põhja-,

teine lõunapoolus. See kehtib ka siis, kui poolitamisel on jõutud väga väikeste osakesteni. Sellest nähtusest lähtudes püstitas W. Weber molekulaarmagnetismi hüpoteesi. Igas magnetis, samuti ka tavalises rauas ja terases on isegi väikesimad osakesed täielikud magnetid; neid nimetatakse **molekulaarmagnetiteks.** Rauа- või terasetüki mittemagnetilises olekus on tema molekulaarmagnetite paigutus täiesti korrapäratu, mispärast nende kogumõju on null. Kui aga näiteks terast magnetiseerida, siis paigutuvad molekulaarmagnetid nii, et kõikide nende põhjapoolused on suunatud ühele poole, kuna kõik lõunapoolused on suunatud teisele poole.

Pehmes rauas võivad molekulaarmagnetid kergesti pöörelda, terases on nende pöörlemine takistatud. Seepärast võibki tera-



Joon. 1. Molekulaarmagnetid.

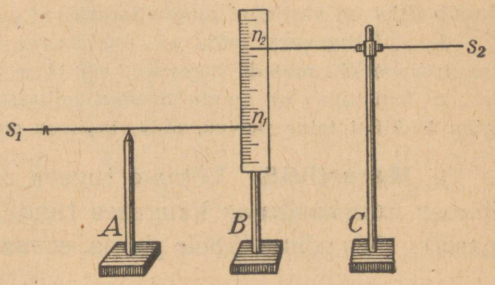
sest saada püsivat magnetit. Magnetiseerimine on seega korrapäratult esinevate molekulaarmagnetite ümberkorraldamine ühesuunalisteks.

Selle hüpoteesi abil võib ka seletada, miks magneti põrutamisega või kuumutamisega ta tugevus väheneb, sest põrutamise ja kuumutamisega kaob korrapärasus molekulaarmagnetite paigutuses.

2. Coulombi seadus. Katsed näitavad, et magnetipooluste tõmbe- või tõuketung võib olla väga mitmesugune. Et võrrelda magnetipooluseid omavahel, seks on tarvitusele võetud magnetipooluse ühik. Magnetipooluse ühikuks (ühikpooluseks) nimetatakse säärast magnetipoolust, mis 1 cm kaugusel leiduvat teist niisama tugevat poolust 1 düüni tugevusega eemale tõukab või lähemale tõmbab. Ühikpooluse sümbolina tarvitame tähti Ü-P.

Katsed näitavad, et magnetipooluste vahel mõjuv tung oleneb pooluste tugevusest ja nende kaugusest. Seda olenevust võib lihtsate vahendite abil järgmise katsega demonstreerida.

Peenike ja pikk magnetvarras (magnetiseeritud sukavarras) on kinnitatud nii, et ta võib pöörelda horisontaalse telje ümber (2. joon., *A*) (näiteks pistetakse magnetiseeritud varda ots vasktorusse, mis asetatakse teravikule; kangitaolise seadise teiseks õlaks on vaskvarras või pöörleb magnetvarras keskelt läbiva telje ümber, nagu 2. joon. näha). Teine samasugune magnetiseeritud varras on kinnitatud vertikaalse statiivi külge, kus teda võib ülesalla nihutada. Kui asetada mõlema magneti põhjapoolused n_1 ja n_2 ühele vertikaaljoonele, nagu joonisel näha, siis telje ümber pöörleva magneti põhjapoolus tõukub allapoole. Asetades vabalt pöörleva magneti teisele õlale vastava ratsuri, võime magneti endisesse horisontaalsesse asendisse tagasi tuua. Magnetipooluste vahel mõjuvat tõuketungi tasakaalustab sel juhul magneti teisele õlale paigutatud ratsur. Kangi seaduse järgi võime arvutada magnetipooluste vahel mõjuva tungi suuruse. Määrates seda tõuketungi magnetipooluste mitmesugustel kaugustel, võime leida seose mõjuva tungi ja pooluste kauguse vahel. Tarvitades ühe magnetvarda asemel mitut magnetvarrast, võime leida seose mõjuva tungi ja magnetipooluste tugevuste vahel. Samal viisil võime määrata tõmbetungi kahe isenimelise pooluse vahel.



Joon. 2. Coulombi seadus.

Katse annab seda paremaid tulemusi, mida pikemad on magnetvardad võrreldes mõõdetavate pooluste kaugustega.

Magnetipooluste vastastikuse mõju suuruse määramisel esinevad mitmesugused raskused. Esiteks pole võimalik katsetel tarvitada ainult ühte poolust, sest säärast magnetit pole. Samuti pole kerge määrata pooluse asukohta. Neile raskustele vaatamata määras Ch. Coulomb 1785. a. katseist kahe magnetipooluse vahel mõjuva tungi suuruse olenevuse pooluste tugevusest ja nende vastastikusest kaugusest. Coulomb'i katsed näitasid, et sel juhul kehtib järgmine seadus: **kahe magnetipooluse**

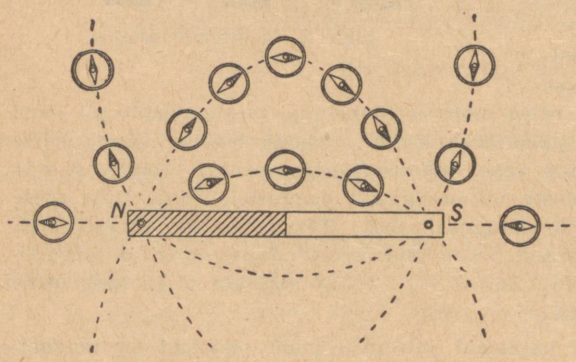
vahel mõjuv tõuke- või tõmbetung on võrdeline pooluste tugevustega ja pöördvõrdeline nende kauguse ruuduga ehk lühidalt:

$$f = \frac{m_1 \cdot m_2}{r^2},$$

kus f on pooluste vahel mõjuv tung düünides, m_1 ja m_2 pooluste tugevused Ü-P-tes ja r magnetipooluste kaugus cm-eis.

1. Kuidas on võimalik magnetnõela abil määrata, kas antud terasvarras on magnetiseeritud?
2. Kahest terasvardast on üks magnetiseeritud. Kuidas määrata, kumb neist on varemini magnetiseeritud?
3. Kui tugevasti mõjuvad üksteisesse kaks 20 cm kaugusel olevat magnetipoolust, millede tugevused on 15 ja 25 Ü-P?
4. Kui tugev on magnetipoolus, millesse 10 cm kaugusel mõjub tungiga 5 düüni teine poolus, mille tugevus on 50 Ü-P?

3. Magnetiväli. Võtame tugeva magneti ja hoiame tema ümber mitmesuguses kauguses tundlikku magnetnõela (kompassi). Siis võime tähele panna, et magnetnõel asetub magnetitungide mõjul igas kohas ise suunas (3. joon.). Seega võime magnetnõela abil määrata magneti mõjupiirkonna. Ruumi magneti ümber, milles avaldub magnetitung, nimetatakse **magnetiväljaks.**



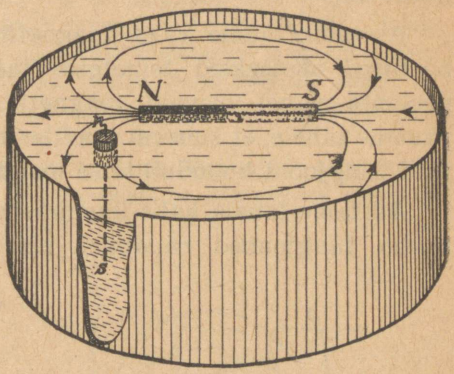
Joon. 3. Magnetiväli.

Magnetnõela abil otsustame magnetitungi suuna üle igas magnetivälja punktis. Sedaviisi magnetitungi suunda jälgides põhjapoolusest alates jõuame kõverjoont mööda lõunapooluseni. Kõverjoont, mis näitab magnetitungi mõjumise sihti, nimetatakse magneti **tungjooneks.** 3. joon. kujutab näitlikult magneti tungjooni magneti ümber.

Magneti tungjoonte suunaks loetakse suunda p õ h j a p o o l u s e s t l õ u n a p o o l u s e s s e. Seega koht, kus magneti

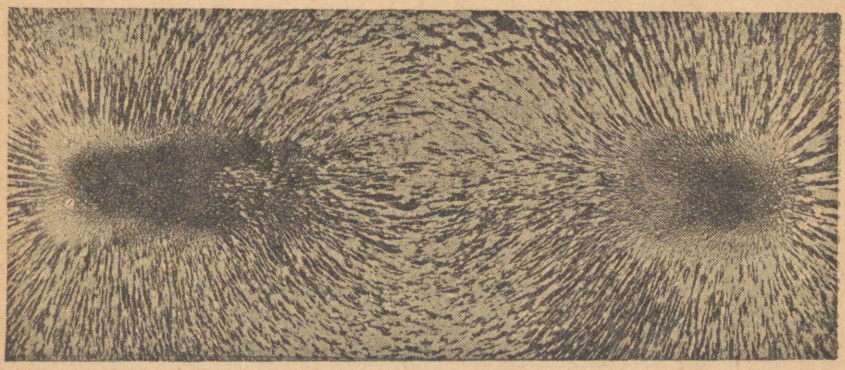
tungjooned väljuvad, on põhjapoolus, koht, kuhu nad suubuvad, — lõunapoolus. Niisiis võib pooluseid vaadelda kui magneti tungjoonte väljumis- ja suubumiskohti magnetis.

Kui tuua magnetivälja näiteks vaba põhjapoolus, siis hakkab see poolus liikuma, kusjuures tema liikumistee kujundab magneti tungjoone.



Joon. 4. Vaba N-pooluse liikumine magnetiväljas.

Magnetipooluse liikumist magnetiväljas võib demonstreerida järgmise katse abil. Pistame õhukesse korki püsti magnetiseeritud õmblusnõela ja paneme siis korgi veepinnale ujuma. Nõela torkame korki nii, et selle põhjapoolus oleks ülalpool. Hoides nüüd veepinna kohal umbes nõela ülemise otsa kõrgusel tugeva magneti, võime tähele panna, kuidas liigub magnetiseeritud nõel ja selle liikumise tee kujutabki magneti tungjoont. Asetades vabalt ujuva magnetiseeritud nõela mitmesugustesse kohtadesse, paneme tähele, et igale nõela asendile vastab eri tungjoon.



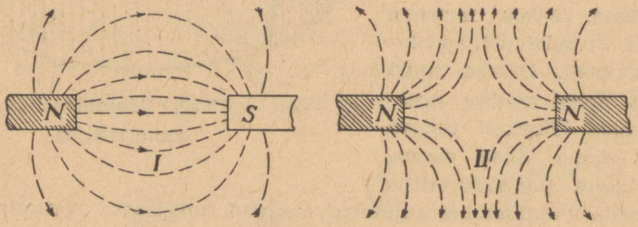
Joon. 5. Magnetiväli nähtavaks tehtuna rauapuru abil.

Magneti tungjooni võib rauapuru abil nähtavaks teha. Selleks võtame magneti ja katame paberiga või õhukese papiga.

Puistame paberile võimalikult ühtlaselt rauapuru. Magnetivälja mõjul muutuvad rauapuru osakesed väikesteks magnetnõelakesteks, mis kõik paberit pisut koputades ketina magneti tungjoonte suunas asetuvad. Nii tulevadki magneti tungjooned nähtavale.

Asetame lauale kaks magnetit nii, et nende isenimelised poolused asetseksid teineteise vastas. Rauapuru abil nende pooluste vahel olevaid magneti tungjooni nähtavaks tehes paneme tähele, et suurem osa ühe magneti põhjapoolusest väljuvaid tungjooni koondub teise magneti lõunapoolusesse.

Asetame lauale kaks ühenimelist poolust teineteise vastu ja teeme tungjooned rauapuru abil nähtavaks. Nüüd paneme



Joon. 6. Kahe pooluse magnetiväli.

tähele, et tungjooned ei lähe ühelt pooluselt teisele, vaid nad tõukavad üksteist eemale.

Katsed näitavad, et magneti tungjooned on suletud kõverad. Magnetipoolusesse suubudes ei lõpe magneti tungjooned seal mitte, vaid jätkuvad magnetis edasi.

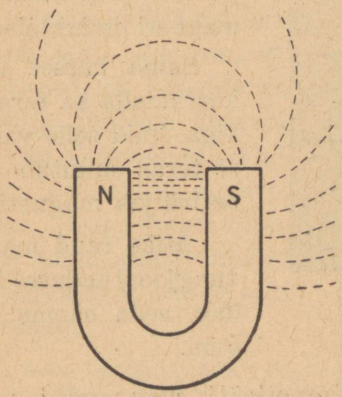
Magneti sees olevad tungjooned tulevad nähtavale magneti poolitamisel: murtud magneti ühest poolest väljuvad magneti tungjooned, et teise magnetipoole murtud kohta suubuda. Magneti tungjoonte väljumiskohas tekib põhjapoolus, kohal, kuhu nad suubuvad, tekib lõunapoolus. Nii seletubki, miks me magneti poolitamisel kunagi ühe poolusega magnetit ei saa, vaid ikka kahe poolusega.

Suleme hobuseraua-kujulise magneti poolused pehmest rauast ankruga (8. joon.). Raud koondab magneti tungjooned

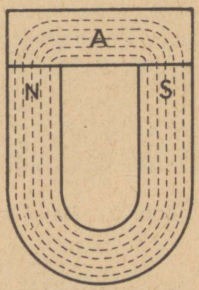
endasse, mille tulemuseks on nähtus, et magneti tungjooned magnetist õhku ei väljugi. Sel juhul on tegemist „poolusteta" magnetiga.

Magnetivälja ja tungjoonte mõiste andis M. Faraday. Faraday lähtus oletusest, et pole olemas kaugmõju, s. o. magnetipoolus mõjub teise magnetipoolusesse mitte otseselt, vaid vahepealse ruumi kaudu. Vahepealses ruumis tekivad muutused, mida me nimetame magnetiväljaks, ja see ongi magnetitungi edasikandjaks. Seega ruum magneti ümber on magnetilise energia kandjaks. Et magnetitung mõjub läbi kehade, samuti läbi tühja ruumi, siis selle tungi kandjaks on ruum.

Faraday võrdles magneti tungjoont pingule tõmmatud kumminööriga, mis püüab kokku tõmbuda. Sellega seletame isenimeliste magneti-



Joon. 7. Hobuseraua-kujulise magneti magnetiväli.



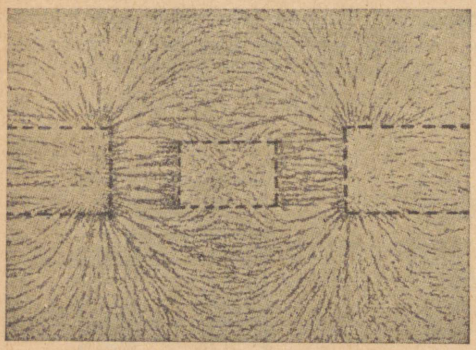
Joon. 8. Suletud magnetiline ring.

pooluste vastastikust külgetõmmet. Peale magneti tungjoonte kokkutõmbumise (pikipinevuse) magneti tungjooned tõukavad üksteist risti nende sihtidega (külgrõhk). Viimase nähtusega võime seletada kahe samanimelise pooluse vastastikust tõukumist.

4. Magneti induktsioon. Võtame pehmest rauast pulga ja kinnitame statiivi külge. Lähendame raua ülemisele otsale magneti põhjapooluse. Nüüd näeme, et raud muutus magnetiks, mis rauapuru külgetõmbamisest selgub. Magnetnõela järele katsudes leiame, et otsas, mis põhjapooluse lähedal, on tekkinud lõunapoolus, vastasolevas otsas põhjapoolus. Eemaldades magnetipooluse, kaotab raudpulk oma magnetilised omadused.

Niisugust nähtust, kus magnetipooluse mõjul pehme raud ise ka magnetiks muutub, nimetatakse magnetiliseks induktsiooniks.

Seda nähtust võime seletada järgmiselt. Teeme rauapuru abil kahe isenimelise magnetipooluse vahel oleva magnetivälja nähtavaks. Asetame nüüd sellesse magnetivälja tüki pehmet rauda. Näeme, et raud koondab endasse magneti tungjooni. Kohal, kus magneti tungjooned rauasse suubuvad, tekib lõunapoolus, kohal, kust nad uuesti väljuvad, põhjapoolus. Nii seletubki magneti induktsioon.



Joon. 9. Raud magnetiväljas.

Sama katset võime korraldada ka terasetükiga, kuid selle vahega, et teras muutub magnetiväljas magnetiks.

Miks raud magneti tungjooni endasse koondab, seda näeme hiljemini.

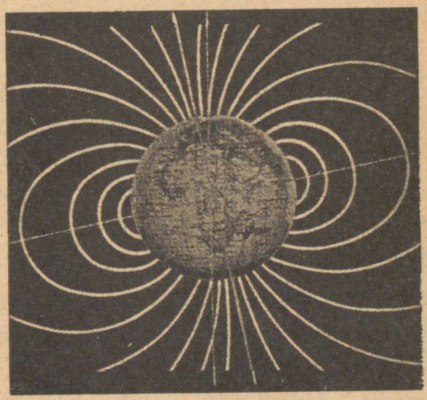
5. Magnetivälja tugevus. Magnetivälja igas punktis mõjub sinnatoodud magnetipoolusesse kindlasuunaline ja kindla suurusega tung. Mida tugevam magnet, seda suurem ja tugevam on tema magnetiväli. Magnetivälja iseloomustatakse nn. magnetivälja tugevuse kaudu. Magnetivälja tugevust antud punktis mõõdab tung, millega mõjub magnetiväli sellesse punkti asetatud ühte pooluseühikusse. Magnetivälja tugevuse ühikuks on 1 örsted. Magnetivälja tugevus on 1 örsted, kui see mõjub ühte pooluseühikusse 1 düüni tugevusega.

Punktikujulise magnetipooluse poolt tekitatud magnetivälja tugevuse võime arvutada Coulombi seadusest. Magnetipoolus tugevusega m mõjub teise magnetipoolusesse m_1, mis asetseb esimesest r cm kaugusel, tungiga $F = \frac{m \cdot m_1}{r^2}$ düüni. Pooluse m poolt tekitatud väljatugevuse

leiame, kui $m_1 = 1$. Siis $H = F = \frac{m}{r^2}$ (örstedi), kus H-ga on tähistatud magnetivälja tugevus. Kui on olemas mitu punktikujulist magnetipoolust, siis nende poolt tekitatud magnetivälja tugevus antud punktis leitakse nii, et liidetakse selles punktis üksikute pooluste magnetivälja tugevused rööpküliku reegli järgi.

Magnetivälja, kus magneti tungjooned on paralleelsed, nimetatakse ühtlaseks ehk homogeenseks magnetiväljaks.

Katsed näitavad, et ühtlases magnetiväljas on magnetivälja tugevus kõigis punktides sama. Samuti näitavad katsed, et seal, kus magneti tungjooned on tihedamalt, on välja tugevus suurem, seal, kus tungjooned on hõredalt, on välja tugevus nõrgem. Seega annab tungjoonte käik meile täieliku pildi magnetiväljast ja selle tugevusest.



Joon. 10. Maa magnetiväli.

1. Leia magnetivälja tugevus punktis, mis asetseb punktikujulisest magnetipoolusest (pooluse tugevus 30 Ü-P) 50 cm kaugusel.

2. Igal magnetil on kaks poolust. Kuidas seletada, et võib magnetiseerida terasvarrast nii, et keskel oleks näiteks põhjapoolus, kummaski otsas aga lõunapoolus?

6. Maa magnetism. Teravikule asetatud magnetnõel, mis võib vabalt vertikaalse telje ümber pöörelda, näitab, nagu teada, alati kindlat sihti. Sellest järeldame, et Maad ümbritseb magnetiväli. Sihti, mida näitab horisontaalses tasapinnas vabalt pöörlev magnetnõel, nimetatakse magnetiliseks meridiaaniks. Täpsemad tähelepanekud näitavad, et magnetiline meridiaan ei ühti täpselt põhja—lõuna sihiga ehk geograafilise meridiaaniga. Nurka, mille moodustab magnetnõela siht

geograafilise meridiaaniga, nimetatakse magnetiliseks deklinatsiooniks ehk käändeks. Selle järgi, kas magnetnõela põhjapoolus kaldub põhja—lõuna sihist ida või lääne poole, kõneldakse ida- või läänedeklinatsioonist. Magnetiline deklinatsioon muutub kohaga Maakera pinnal: eri kohtades on ta ka eri suurusega. Samuti muutub magnetiline deklinatsioon aja kestel. Eestis on praegu magnetiline deklinatsioon ligikaudu null. Õigemini esineb küll väike läänedeklinatsioon, mis kahaneb aastas umbes 8′.

Magnetnõela, mida tarvitatakse magnetilise deklinatsiooni määramiseks, nimetatakse ka deklinatsiooninõelaks.

Võtame magnetnõela, mis võib vertikaal-tasapinnas vabalt pöörduda. Asetame nõela vertikaalsesse tasapinda, mis ühtib deklinatsiooninõela sihiga. Seejuures paneme tähele, et ta pole horisontaalne, vaid Maa põhjapoolmikul on tema põhjapoolus, lõunapoolmikul lõunapoolus kaldu Maa poole. Nurka, mille moodustab magnetnõel horisontaaltasapinnaga, nimetatakse magnetiliseks inklinatsiooniks ehk kaldeks. Tartus on magnetiline inklinatsioon ligikaudu 70°.

Magnetilise inklinatsiooni määramiseks eriti ehitatud magnetnõela nimetatakse inklinatsiooninõelaks.

Magnetiline inklinatsioon on Maa eri kohtades ka eri suurune. Magnetiline inklinatsioon on null magnetilisel ekvaatoril. Magnetilisel ekvaatoril on seega Maa magneti tungjooned horisontaalsed. Täpsemad mõõtmised näitavad, et ka magnetiline ekvaator ei ühti geograafilise ekvaatoriga.

Inklinatsioon suureneb kaugusega ekvaatorist. Tähelepanekud deklinatsiooni- ja inklinatsiooninõelaga näitavad, et Maa on suur kerakujuline magnet.

Kohti, kus kaldenõel vertikaalselt asetseb, s. o. magneti kalle on 90°, nimetatakse Maa magnetipoolusteks. Maa kui magneti lõunapoolus asetseb Põhja-Ameerikas Boothia Felix'i poolsaarel (69° p.-l. ja 96° l.-p. Gr.), põhjapoolus aga Lõuna-Jäämeres lõuna pool Uus-Hollandit (72° l.-l. ja 154° i.-p. Gr.). Niisiis asetsevad Maa magnetipoolused geograafiliste pooluste lähedal, kuid ei ühti viimastega.

Maa magnetilise lõunapooluse avastas kapten J. Ross 1831. a. Maa magnetilise põhjapooluse avastas maadeuurija E. Shackleton 1909. a.

Seetõttu, et magneti tungjooned pole horisontaalsed, mõjub horisontaalses tasapinnas vabalt pöörlevasse magnetnõelasse ainult Maa magnetivälja horisontaalne komponent. Tähistame Maa magnetivälja tugevuse T-ga, selle horisontaalse komponendi H-ga, vertikaalse komponendi V-ga, siis $H = T \cdot \cos i$ ja $V = T \cdot \sin i$, kus i on inklinatsiooninurk. Eestis on Maa magnetivälja horisontaalne komponent pisut vähem kui 0,2 örstedi.

Magnetilist deklinatsiooni, inklinatsiooni ja horisontaalset komponenti nimetatakse Maa magnetivälja elementideks. Need suurused omavad suurt tähtsust praktilises geoloogias, eriti aga mereasjanduses.

Pikaajalised täpsed vaatlused näitavad, et Maa magnetivälja elemendid aja kestel perioodiliselt muutuvad. Nii on tähele pandud ööpäevaseid ja aastasi Maa magnetivälja muutusi. Peale nende esineb pikaajaline pidev muutus, nn. sekulaarne variatsioon.

Sageli esinevad Maa magnetiväljas järsud muutused, nn. magnetilised tormid. Tähelepanekud näitavad, et magnetilised tormid on üheaegsed virmalistega ja nähtustega Päikese peal (protuberantside tekkimisega).

Mõnedes kohtades Maa pinnal pannakse tähele Maa magnetivälja tungjoonte käigus ebakorrapärasusi, nn. anomaaliaid. Nende põhjuseks on maapõues leiduvate rauamaakide lademed. Seega Maa magnetivälja anomaaliate põhjal võib teha järeldusi maapõues peituvate rauamaakide üle.

Maa magnetivälja toimel muutuvad kauemat aega paigal olnud raudkehad, ahjuroop, rööpad, raudlaev magnetilisteks.

Maa magnetivälja päritolu küsimus pole veel selgitatud. Arvatavasti pole selle põhjuseks ainult maapõues leiduvad metallid.

ELEKTER.

Elektrostaatika.

Elektriväli ja elektrilaeng.

7. **Elektrilaeng.** Katsed näitavad, et on olemas kahte liiki elektrit, positiivne ja negatiivne elekter. Positiivne elekter (märgiga +) tekib klaasil, kui teda hõõruda amalgaamitud nahaga, negatiivne elekter (märgiga —) tekib eboniidil, kui teda hõõruda villase riidega. Hõõrdumisel tekib alati kahte liiki elektrit, sest katse näitab, et üks hõõrutavatest kehadest on positiivselt laetud, teine negatiivselt. Elektri hulka kehal nimetatakse elektrilaenguks. Elektrilaengud mõjuvad üksteisesse tõukavalt või tõmbavalt: samanimelised elektrilaengud tõukavad üksteist eemale, isenimelised elektrilaengud aga tõmbavad üksteist lähemale.

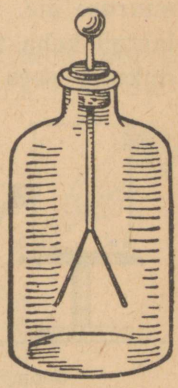
Elektrilaengut võib ühelt kehalt teisele anda ka puute teel. Nii võime elektrilaengu anda elektripendlile, milleks on siidniidi otsas rippuv paberist silinder või kerge kuulike.

Isenimelise elektriga laetud kehade kokkupuutumisel kaotavad nad elektrilaengud: isenimelised elektrilaengud neutraliseerivad üksteist.

8. **Elektroskoop.** Kas antud kehal on elektrilaeng või mitte, seda võib määrata **elektroskoobi** abil. Elektroskoobid on ehituselt väga mitmesugused, kuid kõik nad põhinevad nähtusel, et kaks ühenimelise elektrilaenguga laetud keha tõukavad teineteist eemale. Üht niisugust lihtsat elektroskoopi kujutab

11. joon. Selle tähtsamaks osaks on metallvarb, mille alumise otsa küljes ripuvad õhukesed siidpaberist või metallist (kullast või alumiiniumist) lehekesed. Metallvarb läbib eboniidist või merivaigust korki, mis suleb klaasanuma pudelikujulise kaela.

Tõmbame elektriseeritud kehaga, näit. klaaspulgaga, mööda elektroskoobi metallvarba. Kokkupuutumisel siirdub osa elektrit varvale, varva kaudu lehekestesse ja lehekesed lähevad laiali. Mida tugevamini on elektroskoop laetud, seda laiemale teineteisest lähevad elektroskoobi lehekesed.



Joon. 11. Elektroskoop.

9. Juhid ja mittejuhid. Puudutame laetud elektroskoobikuulikest käega. Lehekesed langevad kohe alla. Elektrilaeng kadus elektroskoobist. Puudutamisel ühendasime elektroskoobi keha kaudu maaga ja elektroskoobis leiduv elekter läks keha kaudu maasse.

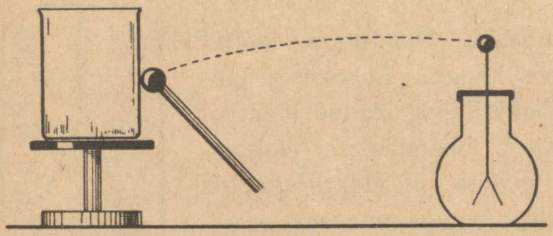
Kirjeldatud elektriliselt laetud kehade tühjendamise viisi nimetatakse maandamiseks. Maandamise katsest järeldub, et on kehi (metallvarb, inimese keha, maa), mida mööda elekter edasi läheb. Niisuguseid kehi nimetatakse elektrijuhtideks. Et kehi elektri juhtivuse suhtes järele katsuda, seks võtame laetud elektroskoobi ja püüame temast elektrit mitmesugusest materjalist esemete abil (puu, kivi, kriit, riie jne.) maasse juhtida. Katsed näitavad, et elektrijuhid on kõik metallid, maa, süsi, loomad, taimed jne.

Mittejuhtide hulka kuuluvad: klaas, kautšuk, kirjalakk, merivaik, siid, parafiin, pigi, väävel, õlid, portselan, tühi ruum, destilleeritud vesi jne.

Mittejuhte nimetatakse ka **isolaatoreiks.** Tahame elektrilaengut juhi peal hoida, nii et ta maasse ei läheks, siis peame selle juhi isolaatoriga maast eraldama ehk **isoleerima.**

Juhil võivad elektrilaengud vabalt liikuda, kuna aga isolaatoril on elektrilaeng kohaga seotud.

10. Elektrilaengu asukoht. Laeme isoleeritud alusele asetatud metallkeha ehk nn. konduktori. Elektrilaengu asukoha määramiseks sellel tarvitame isoleeritud pulga otsa kinnitatud väikest metallkuuli — katsekuulikest. Puudutades katsekuulikesega laetud metallkeha pinda, võtame sellelt puutekohalt elektrilaengu ja anname edasi elektroskoobile, mille lehekese hälbe järgi otsustame kehalt võetud elektrilaengu suuruse üle. Katsed näitavad, et kõige rohkem on elektrit laetud keha teravates servades, lohkudes vähem. Õõnsa konduktori seés puudub elektrilaeng. Seega elektrilaeng asub ainult konduktori välispinnal.



Joon. 12. Elektrilaengu asukoht.

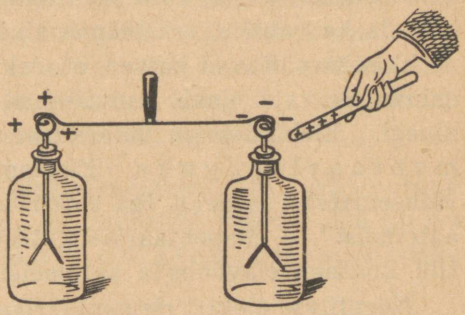
Laetud katsekuulikesega elektroskoobi puudutamisel antakse viimasele ainult osa katsekuulikese laengust. Kui asetada elektroskoobi lehekesehoidjale õõnes metallanum, nn. Faraday anum, ja puudutada siis seda anumat katsekuulikesega seestpoolt, läheb katsekuulikeselt kogu laeng elektroskoobile. Nii on võimalik sisemise puute teel anda kogu laengu ühelt kehalt teisele.

11. Mõjuelekter. Elektriliselt neutraalsed kehad omandavad elektrilaengud juba seega, kui nende lähedale tuua elektriliselt laetud kehad. Sel teel tekkinud elektrilaengut nimetatakse **influents-** ehk **mõjuelektriks.**

Ühendame kaks elektroskoopi isoleeriva käepidemega varustatud metallvardaga (13. joon.). Elektriseeritud klaaspulga lähendamisel lähevad lehekesed laiali, olgugi et me pulgaga otseselt elektroskoope ei puuduta. Kui viia klaaspulk eemale, siis langevad mõlema elektroskoobi lehekesed. Kui aga eraldada mõlemad elektroskoobid metallvarda äravõtmisega enne klaaspulga eemaldamist, siis jäävad mõlemale elektroskoobile

elektrilaengud. Lähemalt nende laengute märke uurides leiame, et klaaspulgale lähemal elektroskoobil on klaaspulgal oleva elektrilaenguga võrreldes vastupidise märgiga elektrilaeng, kaugemal elektroskoobil samanimeline elektrilaeng. Kui enne klaaspulga eemaleviimist puudutada metallvardaga ühendatud elektroskoope, siis kaob samanimeline laeng sealt maasse. Pärast klaaspulga eemaldamist jaotub isenimeline laeng mõlema elektroskoobi vahel ühtlaselt.

Seega laadimata konduktor omandab elektriliselt laetud keha lähendamisel elektrilaengud. Laetud kehale lähemal konduktori poolel tekib isenimeline elektrilaeng, mis on seotud antud elektrilaenguga; kaugemal poolel samanimeline elektrilaeng. Viimane on vaba ja teda võib maasse juhtida. Mõjuelektri nähtusega on seletatav, miks näitab elektroskoop laengut, kui talle lähendada elektriliselt laetud keha.



Joon. 13. Mõjuelekter.

1. Kuidas saab anda elektroskoobile elektrilaengut, ilma et teda seejuures puudutataks?

2. Kuidas määrata elektroskoobil oleva elektrilaengu märki mõjuelektri nähtuse kaudu?

12. Elektriteooria. Elektri tekkimisest hõõrdumisel, influentselektrist ja mitmetest teistest nähtustest järgneb, et kehades on olemas määratu suurel hulgal elektrit. Mittelaetud olekus on kehas negatiivse ja positiivse elektri laengud neutraliseeritud, mistõttu nende olemasolu pole märgata.

Et elektrilaengu andmine kehale ega elektrilaengu ärajuhtimine kehalt keha kaalu ei muuda, siis kaua aega arvati, et elekter on kaaluvaba substants, mida peitub kehades mää-

ratu suurel hulgal. Ühe hüpoteesi järgi oletati, et on olemas kahte liiki seda elektrisubstantsi, positiivset ja negatiivset, teine hüpotees eeldas ainult ühe elektrisubstantsi olemasolu: selle puudujäägiga või ülejäägiga kehas seletati elektrilaengu märki. Kaua aega peeti negatiivset ja positiivset elektrit täiesti sarnasteks.

Viimaste aastakümnete jooksul tehtud uurimised aga on näidanud, et negatiivne elektrilaeng erineb mitmeti positiivsest elektrilaengust. Nähtused, mis esinevad elektri läbiminekul hõrendatud gaasidest, näitavad, et positiivne elektrilaeng on alati seotud ainega, kuna seevastu negatiivne elektrilaeng võib esineda ka vabana, eraldatuna ainest.

Teiseks näitavad katsed, et elektrilaeng ei esine igasugustes suurustes, vaid omab samasugust atomistlikku ehitust nagu ainegi. Elektrilaengu väikesimat osakest nimetatakse e l e m e n t a a r l a e n g u k s. Elementaarlaeng ei jagune enam väiksemateks osadeks. Iga elektrilaeng koosneb seega „elektriaatomeist" — elementaarlaengutest, nagu näiteks elavhõbeda tilk koosneb elavhõbeda aatomeist.

Negatiivse elektri elementaarlaengut, mis võib esineda eraldatuna ainest, nimetatakse **elektroniks.** Elektrijuhtides võivad elektronid vabalt liikuda, kuna seevastu isolaatoreis on nad kohaga seotud. Neutraalses kehas neutraliseerivad elektronide laengut aine molekulidega ja aatomitega seotud positiivsed elektrilaengud. Seetõttu pole nende mõju väljaspool märgata.

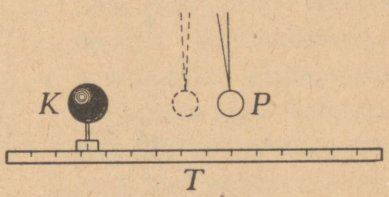
Mitmesugused nähtused, mida hiljemini tundma õpime, põhjustavad oletuse, et iga aine aatom koosneb tuumast ja kestast ehk kattest. Aatomi tuum omab positiivset elektrilaengut ja temasse on koondatud peaaegu kogu aatomi mass. Seda positiivset elektrilaengut neutraliseerivad kattena tuuma ümbritsevad negatiivse elektrilaengu algosakesed — elektronid, mistõttu aatom on elektriliselt neutraalne. Elektronid omavad seejuures massi, mis on ligi $\frac{1}{2000}$ vesinikuaatomi massist. Elektronide teooria järgi omab keha negatiivset elektrilaengut, kui tal on elektronide ü l e j ä ä k, ja positiivset laengut siis, kui kehas on elektronide p u u d u j ä ä k. See nähtamatu midagi,

mis elektrilaengu üleandmisel ühelt kehalt teisele siirdub, ongi elektronid. Lähtudes elektronide teooriast, võime kergesti seletada elektrostaatika põhinähtusi.

Kui hõõruda kaht keha teineteise vastu, siis sellega nad omandavad vastupidised elektrilaengud. Seda nähtust seletame seega, et kehade hõõrdumisel (kokkupuutumisel) läheb osa elektrone ühelt kehalt teisele üle, mistõttu nüüd ühel kehal on elektronide puudujääk, teisel kehal aga ülejääk. Esimene keha on seega positiivselt laetud, teine keha negatiivselt.

Kui kokku puutuvad kaks elektriliselt laetud keha, siis elektronid lähevad ühelt kehalt teisele nii, et neis mõlemas on ühesugune elektronide üle- või puudujääk. Oli üks keha laetud positiivse, teine negatiivse elektriga, siis nende kokkupuutumisel võib esineda juhus, kus mõlemad laengud neutraliseeruvad vastastikku — tulemuseks on neutraalne olek.

13. Coulombi seadus. Elektrilaengute vahel mõjuv tung võib olla mitmesugune, seega ka laengute suurus. Laengu ühikuks võetakse säärane elektrilaeng, mis teist niisama suurt elektrilaengut 1 cm kaugusel tõmbab või tõukab 1 düüni tugevusega. Seda laenguühikut nimetatakse absoluutseks laenguühikuks, sest ta põhineb absoluutsel pikkuse ja tungi ühikul. Et 1 elektrostaatiline laenguühik on väga väike, siis praktikas tarvitatakse laenguühikuna **1 kulonit** ehk ampersekundit. 1 kulon $= 3 \cdot 10^9$ abs. laenguühikut.



Joon. 14. Coulombi seadus.

Katsed näitavad, et elektrilaengute vahel mõjuv tung oleneb laengute suurusest ja kaugusest. Kuidas oleneb tõuke- või tõmbetung laengute suurusest ja kaugusest, seda võib näidata järgmise lihtsa katsega.

Riputame siidniidi otsa kerge kuuli, laeme selle ja lähendame ta teisele isoleeritud alusel olevale ja samanimelise elektriga laetud kuulile. Mõlemad kuulid tõukavad teineteist ja rippuv kuul eemaldub teatud kau-

gusele, mille määrame lauale asetatud mõõdupuult. Vähendame kuuli elektrilaengut neli korda, puudutades teda niisama suure mittelaetud kuuliga kaks korda. Nüüd tuleb kuuli kaks korda pendlile lähemale nihutada, et pendli hälve endine oleks. Sellest järeldame, et neli korda väiksem laeng mõjub sama tugevusega pendlikuulisse kaks korda väiksemal kaugusel.

Kasutades nn. pöördkaale, avastas Coulomb 1785. a., et **kaks elektriliselt laetud keha tõukavad teineteist eemale või tõmbavad lähemale tungiga *f*, mis on võrdeline nende laengute suurustega ja pöördvõrdeline nende kauguse ruuduga r^2, s. o.**

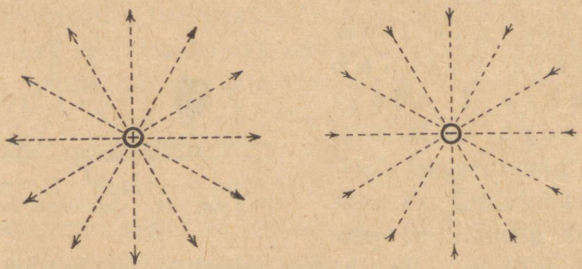
$$f = \frac{e_1 \cdot e_2}{r^2} \text{ (düüni)},$$

kus e_1 ja e_2 on avaldatud abs. laenguühikutes, r — cm-eis.

1. Kui tugevasti tõmbavad teineteist kaks elektrilaengut 12 cm kaugusel, milledest üks on 500 abs. laenguühikut ja teine 80 abs. laenguühikut?

2. Kaks elektrilaengut on teineteisest 1 km kaugusel. Mõlema laengu suurused on 1 kulon. Millise tungiga mõjuvad nad teineteisesse?

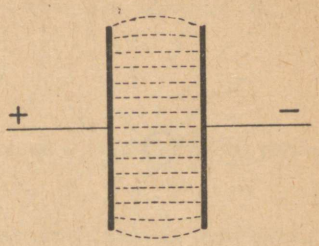
14. Elektriväli. Ruumi elektriliselt laetud keha ümber, milles avaldub laengu mõju, nimetatakse **elektriväljaks.** Tuues



Joon. 15. Elektriväli.

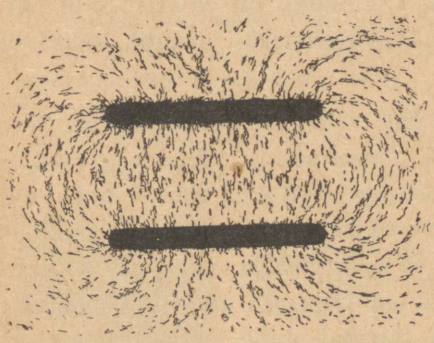
elektrivälja elektrilaengu ühiku, mõjub sellesse kindlasuunaline ja kindla suurusega tung. Sirg- või kõverjoont, mida mööda liigub vaba laenguühik elektriväljas temasse mõjuva tungi toimel, nimetatakse e l e k t r i t u n g j o o n e k s. Elektri tungjoon näitab elektrivälja igas punktis elektrivälja tungi sihti. Seejuures elektri tungjoone suunaks loetakse vaba positiivse laengu liikumissuunda. Vaba negatiivne laenguühik liigub

elektriväljas vastassuunaliselt elektri tungjoone suunaga. Kuulikujulisest elektriga laetud kehast väljuvad tungjooned radiaalselt igale poole laiali, kuna seevastu negatiivselt laetud kehasse tungjooned suubuvad. Selle järgi elektri tungjoonte algus on positiivne laeng, nende lõpp negatiivne laeng. Kahe vastupidiselt laetud plaadi vahel on tungjooned üksteisega rööbiti ja risti plaatide pindadega, äärtel aga kõverduvad tungjooned väljapoole. Elektrivälja, kus tungjooned on rööbikud, nimetatakse ühtlaseks ehk homogeenseks elektriväljaks (16. joon.).



Joon. 16. Homogeenne elektriväli.

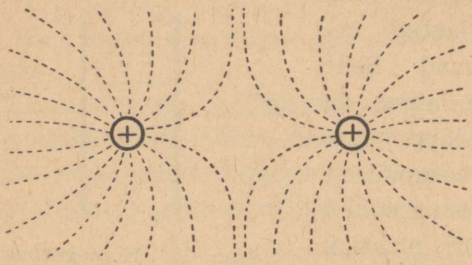
Ka elektrivälja võib nähtavaks teha. Kleebime klaasplaadile tina- või alumiiniumpaberist kujundid ja puistame klaasplaadile näiteks kipsikristalli puru. Kui nüüd anda tinapaberi ribadele elektrilaengud, ühendades neid elektrimasina konduktoritega, siis tulevad klaasplaadil koputamisega tungjooned nähtavale. Ühte sääraselt teel nähtavaks tehtud elektrivälja kujutab 17. joon.


Joon. 17. Elektri tungjooned.

Elektri tungjoonte olemasolust järeldas M. Faraday, et elektrilaengute vastastikune tõmbumine või tõukumine pole mitte kaugmõju, s. o. mõju kaugusse vahetult, ilma et vahepealne keskkond selles mingit tähtsust omaks. Ümberpöördult, Faraday näitas katsete varal, et ruum, mida läbivad elektri tungjooned, ongi elektrilise oleku kandja.

Kerakujuliselt laetud konduktorilt lähtuvad tungjooned ainult selle läheduses radiaalselt, kaugemal nad kõverduvad seinasse või põranda

lähedal olevasse lauasse, kus nad lõpevad. Katsed proovikuuliga näitavad, et iga keha, kuhu need tungjooned suubuvad, omandab negatiivse elektrilaengu. Magneti tungjoontest erinevad elektri tungjooned seega, et elektri tungjooned pole suletud. Nende lõpp ja algus on elektrilaengul.



Joon. 18. Elektriväli samanimeliste laengute vahel.

Vastunimeliselt laetud kehade tõmbumist võib seletada seega, et elektri tungjooned püüavad kokku tõmbuda (pikipinevus), kuna samanimeliselt laetud kehade tõukumine seletub nende külgrõhuga, s. o. elektri tungjooned samuti kui magneti tungjooned tõukavad üksteist risti nende sihtidega.

15. Elektrivälja tugevus. Kui toome elektriväljasse elektrilaengu, siis mõjub sellesse laengusse tung. Selle tungi suurust võime mõõta elektripendliga. Ligikaudu on elektripendli hälve võrdeline tungiga, millega mõjub elektriväli pendli kehal olevasse elektrilaengusse.

Katsed näitavad, et see tung võib olla mitmesugune. Seega võime kõnelda elektrivälja tugevusest. Elektrivälja tugevust mõõdab tung düünides, millega mõjub elektriväli positiivsesse laenguühikusse. Katsed näitavad, et elektrivälja tugevus suureneb laengu suurusega. Mõõdame elektripendli abil näiteks elektrivälja tugevuse laetud kuuli lähedal, mille hälve näitab selle suurust. Võtame kuulilt ½ laengut ära, puudutades teda niisama suure laadimata kuuliga. Katse näitab, et nüüd on pendli hälve ½ eelmisest hälbest, seega ka elektrivälja tugevus on kaks korda väiksem.

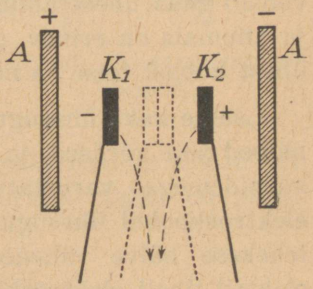
Punktikujulise laengu elektrivälja tugevuse E võime arvutada Coulombi seadusest. Olgu meil laeng e, mis tekitab oma ümbruses elektrivälja. Sellest laengust r cm kaugusel mõjub laeng e teise sinnatoodud

laengusse e_1 tungiga $F = \frac{e \cdot e_1}{r^2}$ düüni. Elektrivälja tugevust mõõdab laenguühikusse mõjuv tung. Siit leiame elektrivälja tugevuse E, kui $e_1 = 1$:

$$E = \frac{e}{r^2}.$$

Kahe või rohkem laengu poolt tekitatud elektrivälja tugevust antud punktis arvutatakse parallelogrammi reegli järgi.

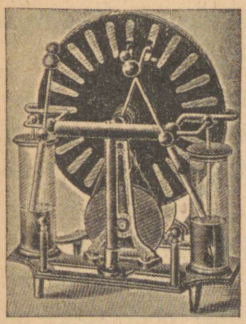
16. Influentselektrimasin. Kui tuua elektrivälja näiteks kahe plaadi A ja A vahele metallkeha $K_1 K_2$ (joon. 19), siis elektrivälja toimel nihkuvad elektronid metallkehas positiivse plaadi poole pööratud otsa. See pool omab nüüd negatiivset laengut, kuna vastaspoolel on positiivne laeng.



Joon. 19.

Kui metallkeha koosneb kahest poolest, milledest kumbki on varustatud isoleeritud käepidemega, siis võib neid osi teineteisest eemaldada ja elektriväljast ära tuua. Nii võime saada influentsi teel elektrilaenguid. Sellel nähtusel põhineb influentselektrimasina tegevus.

Influentselektrimasina peaosadeks on 2 klaas- või eboniitketast, milledele kleebitud isoleeritud metallsektorid. Vastasseisvad sektorid on laetud vastassuunaliselt. Metallvibu kaudu teise ketta sektorid omandavad elektronide nihkumise teel laengud. Ketta pöörlemisel eraldatakse ühe ketta sektorid teise ketta sektoreist ja nende laengud kanduvad teravikkude kaudu masina konduktoritele. Alglaeng sektoritel tekib hõõrdumise teel.


Joon. 19-a. Influentselektrimasin.

Influentselektrimasinat kujutab joonis 19-a. Konduktorite vahel tekib masina töötamisel tugev elektrisäde, mis võib mitukümmend mm pikk olla. Peale valgusnähtuse ja ragina saadavad elektrisädet veel mitmesugused teised nähtused ja toimed: eetriga niisutatud puuvillatükk süttib põlema; elektrisäde võib läbi lüüa papi, klaasi jne.; juhtides elektrisädeme läbi inimese keha, tunneme iseloomulikku elektrilööki. Õhus olev hapnik muutub ozooniks, mida võib tunda erilise lõhna järgi jne.

1. Kui suur on elektrivälja tugevus punktis, mis asetseb 40 cm kaugusel laengust, mille suurus 400 absoluutset laenguühikut?

2. Punktis *A* on pluss-laeng 800 absoluutset laenguühikut. Kui kaugel sellest on elektrivälja tugevus 2 ühikut?

Pinge.

17. Pinge analoogia rõhu ja temperatuuri vahega. Ühendame toruga kaks veega täidetud anumat, milledes veetase on eri kõrgusel. Kohe hakkab voolama vesi anumast, kus veetase kõrgem, sinna, kus veetase madalam. Vee voolamise ühest anumast teise põhjustab siin vee kõrgustasemete vahe. Samuti voolab gaas ühest anumast teise, kui neid toru abil ühendada ja anumais on erinev gaasirõhk. Soojuse levimise põhjuseks ühest kohast teise on nende kohtade temperatuurivahe.

Laeme kaks ühesugust elektroskoopi nii, et nende lehekeste hälbed pole võrdsed, ja ühendame siis elektroskoobid isoleeriva käepidemega varustatud metallvardaga. Kohe omandavad elektroskoobid ühesuguse hälbe, kusjuures ühe elektroskoobi lehekese hälve vähenes, teisel suurenes. Seega voolas osa elektrit ühelt elektroskoobilt teisele. Analoogiliselt vee, gaasi ja soojuse voolamisega on elektri voolamise põhjuseks ühelt kehalt teisele nende kehade elektriseerimisastmete vahe, mida nimetatakse **pingeks.**

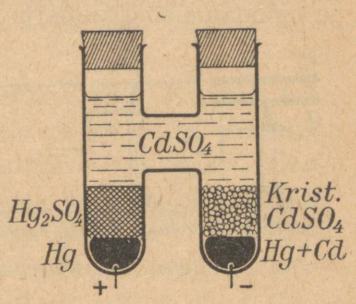
Elektripinget võime võrrelda seega veepinna kõrgusvahega ehk veerõhu vahega, temperatuurivahega, gaasirõhu vahega gaasitorustikus jne.

Keha pinget Maa suhtes nimetatakse **potentsiaaliks.** Isoleeritud alusele asetatud laetud keha pinget määratakse tavaliselt Maa suhtes, mispärast laetud keha kohta öeldakse: ta omab potentsiaali.

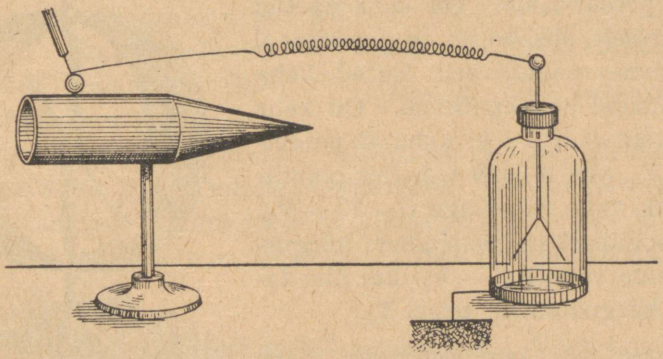
Pinge ja potentsiaali praktiliseks ühikuks on 1 volt (V). Tehnikas on pingeühiku 1 voldi aluseks nn. Westoni normaalelement, s. o. galvaani element, mille poolusteks on elavhõbe ja kadmium. 1 volt on 1,018 osa normaalelemendi pooluste vahelisest pingest. Suurema pingeühikuna tarvita-

takse 1 kilovolti (kV), väiksema ühikuna 1 millivolti (mV), kusjuures 1 kV = 1000 V ja 1 mV = 0,001 V.

Lihtsamaks pinge mõõtmise riistaks on elektroskoop. Et elektroskoop mõõdab mitte elektrihulka keha pinnal, vaid pinget, näitab järgmine katse. Ühendame katsekuulikese peenikese traadi kaudu kaugel oleva elektroskoobiga ja puudutame siis katsekuulikesega isoleerivale alusele paigutatud kandilist keha, millele antud elektrilaeng. Sellele vaatamata, millises punktis me laetud keha katsekuulikesega puudutame, näitab elektroskoop ikka üht ja sama hälvet, olgugi et elektri jaotus kehal pole ühtlane, nagu varemini nägime. Tuleb silmas pidada, et elektroskoop näitab hälvet ainult siis, kui ta välise kesta ja lehekese vahel on pinge.



Joon. 20. Westoni normaalelement.

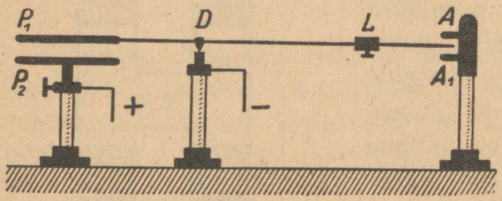

Joon. 21. Elektroskoop mõõdab pinget.

Kui ühendame need mõlemad omavahel, siis ei näita elektroskoop mingit hälvet, olgugi et võime elektroskoopi laadida koos kestaga, asetades ta isoleerivale alusele.

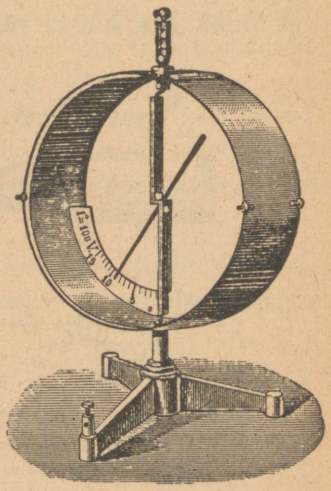
Astmikuga varustatud elektroskoopi, millelt võib otseselt lugeda pinge suurust, nimetatakse **elektromeetriks.**

Kehad, millede vahel on pinge, tõmbavad üksteist lähemale, mida võib näidata pingekaalude abil (joon. 22). Andes plaatidele P_1 ja P_2 pinge, tõmbab plaat P_2 plaati P_1 lähemale.

Veetaseme kõrguse mõõtmisel loeme teatud taseme nulliks ja mõõdame siis, kuipalju antud veetase on kõrgemal või madalamal nulltasemest. Seejuures nullist kõrgemad tasemed loeme positiivseiks ja märgime +-ga, madalamad aga negatiivseiks ja märgime —-ga. Samuti temperatuuri mõõtmisel loeme teatud temperatuuri nulliks ja sellest kõrgemad temperatuurid positiivseiks (+), madalamad negatiivseiks (—). Analoogiliselt keha potentsiaali mõõtmisel loetakse Maa potentsiaal nulliks ja võrreldakse sellega teiste kehade potentsiaale. On keha laetud positiivselt, siis on ka ta potentsiaal positiivne, negatiivselt laetud keha potentsiaal on negatiivne. On keha A potentsiaal V_1 ja keha B potentsiaal V_2, siis A ja B vaheline potentsiaalide vahe ehk pinge $U = V_1 - V_2$. Analoogiliselt on veepindade kõrgustasemete vahe $h_1 - h_2$, kui ühe taseme kõrgus on h_1, teisel h_2.



Joon. 22. Pingekaalud.


Joon. 23. Elektromeeter.

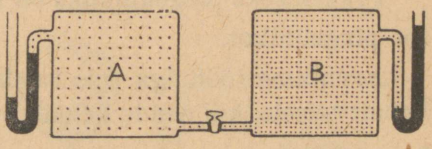
Sageli pole keha potentsiaal teada, küll aga on antud ta pinge mõne teise keha suhtes. Alles kui ühendame teise keha Maaga, võime rääkida antud keha potentsiaalist. Selle nähtuse selgitamiseks olgu järgmine näide.

Aku on elektrielement, mille pooluste vahel on pinge 2 volti. Lähemalt aku tegevust õpime tundma hiljemini. Kui ühendada ühe aku plusspoolus teise aku miinus-poolusega, siis vabaks jäänud pooluste vahel on kahekordne pinge, s. o. 4 volti. Neli selliselt ühendatud akut annavad

neljakordse pinge, s. o. 8 volti. Kui ühendada säärase, nn. akupatarei negatiivne poolus maaga, siis on selle potentsiaal null, positiivse pooluse potentsiaal on aga + 8 volti. Kui ühendada patarei positiivne poolus maaga, siis omab negatiivne poolus potentsiaali — 8 volti. Kui ühendada maaga patarei 2. ja 3. elemendi vahel, siis positiivne poolus omab potentsiaali + 4 volti, negatiivne poolus — 4 volti. Igal juhul patarei pinge on 8 volti.

Elektronide teooria järgi iga metalne juht sisaldab määratu suurel arvul vabu elektrone. Elektrone metallis võime võrrelda gaasiga, mis täidab gaasitorustikku või gaasianumat. Nagu gaas omab seal teatud rõhku, nii omab „elektrongaas" teatud laadimisastet, mida nimetamegi pingeks. Negatiivselt laetud kehal on võrreldes Maaga elektronide ülerõhk, positiivselt laetud kehal on elektronide alarõhk.

Olgu meil kaks anumat *A* ja *B*, mis täidetud õhuga. Olgu *B*-s õhurõhk suurem kui väline õhurõhk, *A*-s aga madalam. Avame neid anumaid ühendava toru kraani — kohe tungib õhk anumast *B* anumasse *A*, kuni õhurõhk neis tasandub. Samuti voolavad elektronid negatiivselt laetud kehalt positiivselt laetud kehale, kui neid ühendada elektrijuhiga. See elektronide üleminek ühelt kehalt teisele toimub alati, kui kehade vahel on pinge. Tasakaalu puhul juhis on kõigis punktides üks ja sama pinge. Analoogiliselt on tasakaalu puhul gaasitorustikus igal pool sama rõhk.



Joon. 24. Õhu voolamine.

18. Pinge ja potentsiaal töö seisukohalt. Veetaseme kõrgust anumas nulltaseme suhtes mõõdetakse pikkusühikuis. Kuid selle asemel võime määrata veetaseme kõrgust seega, et mõõdame tööhulga, mis teeme, kui tõstame näiteks 1 kg vett nulltasemelt antud anuma veetasemeni. On teada, et 1-kg-se koormise tõstmisel 1 m võrra tehtud töö on 1 kgm. Kui 1 kg vee tõstmisel nullpinnalt anuma veetasemeni tehti tööd näiteks 5 kgm, siis võib sellest järeldada, et veetaseme kõrgus anumas on 5 m.

Veetasemete kõrguste vahega võrdlesime pinget kehade vahel. Analoogiliselt eelmisega võib määrata kahe keha vahelist pinget, kui mõõta tööhulka, mis tuleb teha, et viia 1 positiivne laenguühik ühelt kehalt teisele. Samal viisil võib määrata ka laetud keha potentsiaale, s. o. pinget Maa suhtes: keha potentsiaal on võrdne tööhulgaga, mis tuleb teha 1 positiivse laenguühiku toomisel Maa pinnalt kehale. Tehtud töö muutub seejuures laenguühiku potentsiaalseks energiaks samuti nagu raske keha ülestõstmisel tehtud töö muutub ülestõstetud keha potentsiaalseks energiaks. Vastupidi, kui laenguühik liigub elektritungi toimel tungi suunas, siis vabaneb potentsiaalne energia.

Eelmisest selgub ka pinge ja potentsiaali ühik. Absoluutseks elektriliseks pingeühikuks on pinge kahe keha vahel, kui laenguühiku liikumisel ühelt kehalt teisele tehtud töö on 1 erg.

Praktiliseks pingeühikuks on **1 volt.** 1 volt on $\frac{1}{300}$ absoluutset pingeühikut.

Arvutame tööhulga, mis tuleb teha 1 kuloni liikumisel ühelt kehalt teisele, kui nende kehade vahel on pinge 1 volt. Et 1 kulon $= 3 \cdot 10^9$ abs. laenguühikut ja 1 volt $= \frac{1}{300}$ abs. pingeühikut, siis töö $A = 3 \cdot 10^9 \cdot \frac{1}{300}$ ergi $= 10^7$ ergi $= 1$ džaul. Seega võime volti defineerida kui pinget kahe keha vahel, kui 1 kuloni liikumisel ühelt kehalt teisele tehtud töö on 1 džaul.

Elektrivälja toodud positiivne laenguühik omab mitmesugusel hulgal potentsiaalset energiat, olenedes punktist, kuhu ta toodi. Seega elektrivälja punktid evivad potentsiaali.

Samuti võime leida elektrivälja kahe punkti A ja B vahelise pinge, mõõtes tööhulga, mis tuleb teha positiivse laenguühiku viimisel ühest punktist teise.

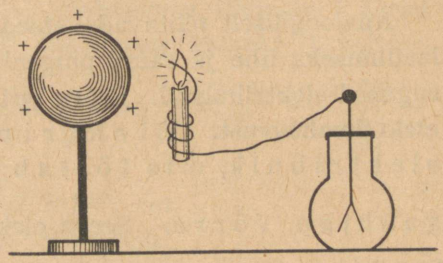
Laetud keha elektrivälja potentsiaali võib demonstreerida järgmiselt. Ühendame küünlaleegi spiraalikeeratud traadi abil kaugel oleva elektromeetriga. Küünlaleeki tarvitame siin seepärast, et leek teeb õhu elektrit juhtivaks ja selle tagajärjel omandab leeki ulatuv traadiots, seega ka sellega ühenduses olev elektromeetri leheke, leeki ümbritseva õhu potentsiaali. Liigutame küünlaleeki elektriväljas, siis näitab elektromeetri

leheke seda suuremat hälvet, mida lähemale viia leek laetud konduktorile. Kokkupuutumisel laetud konduktoriga näitab elektromeeter selle potentsiaali. Liigutame leeki risti elektri tungjoontega, siis elektromeetri lehekese hälve ei muutu. Pinda laetud keha ümber, mille potentsiaal üks ja sama, nimetatakse ekvipotentsiaalpinnaks. Ekvipotentsiaalpinnaga on elektri tungjooned risti. Iga juhi välispind on elektri tasakaalu puhul ekvipotentsiaalpind.

Pinget tähistatakse tavaliselt U-ga. Kui ühe laenguühiku viimisel kehalt A kehale B tehtud töö on võrdne nendevahelise pingega, s. o. U-ga, siis e laenguühiku viimisel kehalt A kehale B tehtud töö on eU ehk lühidalt

$$A = eU.$$

Elektrilaengu viimisel ühelt kehalt või väljapunktilt teisele tehtud töö on võrdne elektrilaengu ja pinge korrutisega. On elektrilaeng mõõdetud kulonites, pinge voltides, saadakse töö džaulides. Liigub seejuures elektrilaeng vastassuunaliselt elektritungiga, tuleb elektrilaengu viimisel tööd teha, liigub aga elektrilaeng elektritungi suunas, siis saadakse tööd. Viimasel juhul töö tehakse elektrivälja, s. o. laetud keha energia kulul.



Joon. 25. Elektrivälja potentsiaal.

Olgu keha B_1 potentsiaal V_1, keha B_2 potentsiaal V_2, siis laengu e viimisel ühelt kehalt teisele tehtud tööd A võib avaldada valemiga

$$A = e(V_1 - V_2).$$

1. Laengut $+20$ abs. laenguühikut punktist A punkti B viies tehtud töö on 100 ergi. Kui suur on nendevaheline pinge voltides?

2. Elektrijaamast tuleva kahe juhtme vahel on pinge 110 V. Kui palju tööd džaulides tuleb teha, et elektritungiga vastassuunaliselt viia 2 kulonit elektrit ühelt juhtmelt teisele?

3. Elektriväljas 0,01 kuloni suuruse elektrilaengu nihkumisel ühest punktist teise tehtud töö on 0,2 džauli. Kui suur on pinge nende punktide vahel iga 1 cm kohta, kui nende punktide kaugus on 1 m?

4. Kahe punkti vaheline pinge on 20 V. Kui suur on tehtud töö ergides, kui viime ühest punktist teise 0,001 kulonit elektrit?

Elektrimahtuvus ja kondensaator.

19. Elektrimahtuvuse mõiste. Katse näitab, et mida suurema laengu kehale anname, seda kõrgemaks tõuseb ta pinge. Seda nähtust võime võrrelda soojendatava kehaga: mida rohkem soojust talle anname, seda suuremaks tõuseb ta temperatuur. Soojusõpetusest teame ka, et kehade soojendamiseks 1° C võrra kulub mitmesugune soojushulk, mis oleneb keha materjalist ja selle hulgast. Soojushulk, mis tõstab keha temperatuuri 1° C võrra, mõõdab keha soojusmahtuvust.

Analoogiliselt näitavad katsed ka, et mitmesuguste kehade laadimiseks ühe ja sama pingeni on tarvis neile anda mitmesugused elektrihulgad. Seega mitmesugused kehad omavad eri **elektrimahtuvust.** Elektrimahtuvust mõõdab elektrihulk, mis tõstab keha pinget ühe pingeühiku võrra. Seega elektrimahtuvus $= \frac{\text{elektrihulk}}{\text{pinge}}$.

Kui tähistame elektrihulga e-ga, pinge U-ga, siis

$$C = \frac{e}{U},$$

kus C on keha elektrimahtuvus. Eelmisest valemist saame ka: $e = CU$.

Keha elektrimahtuvus oleneb keha kujust ja suurusest. Suuruselt ja kujult võrdsete õõnsa ja massiivse keha mahtuvus on võrdne. Keha elektrimahtuvus ei olene keha massist, samuti mitte keha materjalist.

Elektrimahtuvuse tehniliseks ühikuks on 1 farad (F, nimest Faraday). Elektrimahtuvus 1 F on kehal, mille pinge tõstmiseks 1 voldi võrra on tar-

vis talle anda 1 kulon elektrit. Et 1 farad on väga suur elektrimahtuvus, siis tehnikas tarvitatakse elektrimahtuvuse ühikuna 1 mikrofaradit (μF), kusjuures 1 μF = 0,000001 F = 10^{-6} F, ja 1 pikofaradit (pF):

$$1\ \text{pF} = 10^{-12}\ \text{F}.$$

Elektrimahtuvuse absoluutseks ühikuks on säärase keha mahtuvus, mille pinge tõuseb 1 absoluutse pingeühiku võrra, kui anda talle laeng 1 absoluutne laenguühik. Vastavad teoreetilised ja katselised uurimised näitavad, et elektrimahtuvuse 1 absoluutset ühikut omab kera, mille raadius on 1 cm. Seda elektrimahtuvuse ühikut nimetatakse seetõttu ka cm. Edasi näitavad uurimised, et kerakujulise keha elektrimahtuvus on võrdeline kera raadiusega. Seega kera, mille raadius on r cm, omab ka elektrimahtuvust r cm. Elektrimahtuvuse absoluutne ühik on seotud tehnilise mahtuvuse ühikuga 1 farad järgmiselt: 1 kulon = $3 \cdot 10^9$ abs. laenguühikut; 1 volt = $= \frac{1}{300}$ abs. pingeühikut, järelikult 1 farad = $\frac{\text{kulon}}{\text{volt}} = \frac{3 \cdot 10^9}{\frac{1}{300}} =$ $= 9 \cdot 10^{11}$ cm. Seega

$$1\ \text{F} = 9 \cdot 10^{11}\ \text{cm},$$
$$1\ \mu\text{F} = 9 \cdot 10^{5}\ \text{cm},$$
$$1\ \text{pF} = 0{,}9\ \text{cm ja}$$
$$\text{abs. mahtuv. ühik}\quad 1\ \text{cm} = 1{,}1\ \text{pF}.$$

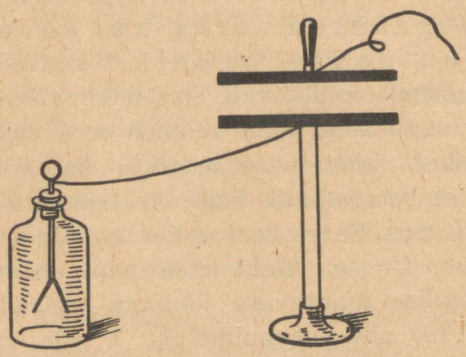
20. Kondensaator. Lähendame käe laetud elektroskoobile, kohe langeb elektroskoobi leheke. Selle nähtuse lähemaks uurimiseks korraldame järgmise katse.

Ühendame elektroskoobi isoleeritud metallplaadiga ja laeme elektroskoobi paraja hälbeni. Lähendame nüüd sellele plaadile teise, maaga ühendatud metallplaadi: katse näitab, et mida lähemale me toome maaga ühendatud metallplaadi elektroskoobi plaadile, seda väiksemaks muutub elektroskoobi lehekese hälve, seda madalamaks muutub laetud keha pinge. Pinge vähenemisest muutumata laengu puhul peame järeldama,

et laetud keha elektrimahtuvus suurenes sellele maaga ühendatud keha lähendamisel.

See katse näitab, et elektrimahtuvus oleneb ligidalolevaist maaga ühendatud juhtidest.

Mahtuvuse muutust siin võime seletada elektri influentsiga. Kui laadida isoleeritud plaat, siis jaguneb elektrilaeng sellel ühtlaselt. Lähendame talle teise maaga ühendatud plaadi, siis esimese plaadi laeng tekitab teisel influentselektri laengud. Isenimeline influentslaeng maaga ühendatud plaadil seob osa isoleeritud plaadil olevast elektrilaengust, kuna samanimeline vaba influentslaeng maasse läheb.



Joon. 26. Elektrimahtuvus oleneb teisest maaga ühendatud juhist.

Kaks teineteisest isoleeriva kihiga eraldatud metallplaati kokku moodustavad nn. **kondensaatori.** Kondensaatoreisse võib suure elektrimahtuvuse tõttu koondada suure elektrilaengu.

Sama katse näitab ka, et plaatide kauguse suurenemisega pinge nende vahel suureneb, ümberpöördult — plaatide kauguse vähenemisega pinge plaatide vahel väheneb. Siit järgneb, et kahest ühesugusest kondensaatorist on selle mahtuvus suurem, kumma plaatide vahekaugus on väiksem. Plaatide kauguse ja elektromeetrilt loetud pinge võrdlemine näitab, et kondensaatori mahtuvus on pöördvõrdeline plaatide kaugusega.

Edasi võib näidata, et kondensaatori mahtuvus on võrdeline plaatide suurusega.

21. Kondensaatori mahtuvuse olenevus dielektrikust. Faraday avastas, et kondensaatori mahtuvus oleneb ka kondensaa-

tori plaatide vahel olevast isolaatorist. Selle olenevuse selgitamiseks korraldame järgmise katse. Võtame klaasplaadi, niisama paksu parafiinplaadi ja 2 samasuguse paksusega parafiiniriba. Eelmises katses kirjeldatud kondensaatori plaadi (alumise) ühendame elektromeetriga ja anname talle siis nii suure laengu, et elektromeetri leheke küllalt suurt hälvet näitaks. Lähendame talle teise, maaga ühendatud plaadi. Et asetada plaate teineteisest kindlale kaugusele, seks seame nende vahele parafiiniribad. Kui maaga ühendatud plaat on parafiiniribadel, loeme elektromeetri lehekese hälbe. Sel juhul on plaatide vahel õhukiht. Nüüd kordame katset, kusjuures asetame plaatide vahele parafiinplaadi. Katse näitab, et juhul, kui kondensaatori isoleerivaks kihiks on parafiinplaat, langeb pinge rohkem. Seega, kui kondensaatori isolaatoriks on parafiinikiht, on tarvis sama pingeni laadimiseks kondensaatorile anda suurema elektrilaengu. Sama katse klaasplaadiga näitab, et võttes isoleerivaks kihiks klaasplaadi, langeb pinge veel rohkem. Seega kondensaatori sama pingeni laadimiseks on tarvis nüüd veelgi suuremat elektrilaengut. Isoleerivat kihti kondensaatori plaatide vahel nimetatakse ka dielektrikuks. Arvu, mis näitab, mitu korda kondensaatori mahtuvus suureneb, kui ta plaatide vahele seada õhkisolaatori asemel mingi teine isolaator, nimetatakse selle aine **dielektriku jäävaks.**

Teoreetiliselt võetakse isolaatorite dielektriku jääv õhutühja ruumi suhtes, kuid et õhu dielektriku jääv on ligikaudu 1, siis praktikas võime võtta isolaatorite dielektriku jäävad õhu suhtes.

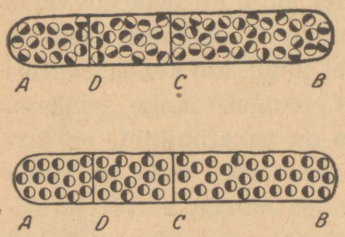
Mõnede ainete dielektriku jäävad:

Õhk	1	Väävel	4
Parafiin	2—2,3	Klaas	5—8
Eboniit	3,2	Vilgukivi	6—8

Dielektriku mõju kondensaatori mahtuvusse võime seletada järgmiselt.

Aine elektrilisest ehitusest olenedes on isolaatori molekulis olemas elektrilaengud. Isolaatoris aga pole elektronid vabad

nagu metallis, vaid nad on molekulidega seotud. Elektrivälja toimel nihkuvad elektronid molekulis, mille tulemuseks on molekuli polarisatsioon, s. o. molekulis tekivad positiivselt ja negatiivselt laetud pooled. Seetõttu polariseeritud molekulid korralduvad nagu molekulaarmagnetid. Nii tekib isolaatori pinnal elektrilaeng, mis osaliselt seob kondensaatori plaadil oleva laengu. Sama pingeni laadimiseks tuleb kondensaatorile seetõttu suurem laeng anda, s. o. ta mahtuvus on nüüd suurenenud.



Joon. 27. Dielektriku polarisatsioon.

Katsed näitavad ka, et isolaatoris väheneb elektrilaengute vahel mõjuv tõuke- või tõmbetung nii mitu korda, kui suur on selle isolaatori dielektriku jääv. Seega Coulombi seadusele dielektrikus tuleb anda järgmine kuju:

$$F = \frac{e_1 e_2}{\varepsilon r^2} \text{ (düüni)},$$

kus ε on dielektriku jääv.

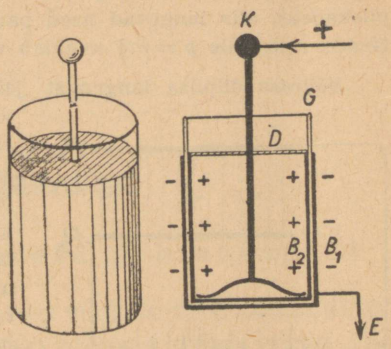
22. Tehnilised kondensaatorid. Vastavad mõõtmised ja arvutused näitavad, et tasapinnalise kondensaatori mahtuvust C võime leida järgmise valemi abil:

$$C = \frac{\varepsilon S}{4\pi d} \text{ (cm)},$$

kus s on kondensaatori plaatide pindala cm²-tes, ε vahekihi isolaatori dielektriku jääv ja d — plaatide kaugus ehk isoleeriva kihi paksus cm-tes.

Tuntumaid ja vanimaid kondensaatoreid on **Leideni purk** (28. joon.). See koosneb silindrilisest klaasanumast, mille väline ja sisemine pind kuni ¾ kõrguseni on kaetud tinapaberiga. Ülemine vaba äär on isolatsiooni suurendamiseks lakitud. Puu- või pappketta kaant läbib metallvarb, mille alumine ots on ühenduses sisemise tinapaberiga, väline ehk ülemine ots on varustatud metallkuuliga. Leideni purk laetakse seega, et influentselektrimasina üks konduktor ühendatakse Leideni purgi

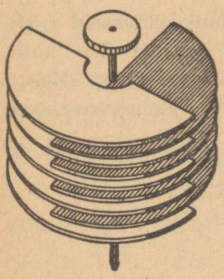
sisemise kihiga, s. o. metallkihiga, kuna väline kiht ühendatakse maaga, samuti ühendatakse maaga ka masina teine konduktor. Leideni purk tühjendatakse erilise isoleeriva käepidemega varustatud t ü h j e n d a j a abil. Leideni purgi tühjendamisel tekkinud sädet saadab tugev ragin. Ka võib see säde läbi lüüa pappi, klaasi jne.



Joon. 28. Leideni purk.

Plokk-kondensaator koosneb kahest metallpaberi ribast, mis teineteisest isoleeritud parafiiniga immutatud paberiga. Need ribad on keeratud rulli, seega tarvitab säärane kondensaator vähe ruumi. Suure pindala ja väikese isoleeriva kihi paksuse tõttu omab plokk-kondensaator suurt mahtuvust, kuid teda ei või laadida kõrgepingeni. Pinge, milleni võib laadida plokk-kondensaatorit, ja tema mahtuvus on märgitud kondensaatoril.

Raadiotehnikas tarvitatakse laialt muutliku mahtuvusega **pöördkondensaatorit.** See koosneb kahest rühmast metallsektoreist, mida võib pöörata üksteise vahele. Seega võib pöördkondensaatori mahtuvust muuta. Pöördkondensaatori isolaatoriks on harilikult õhk.


Joon. 29. Pöördkondensaator.

1. Leia Maa elektrimahtuvus F-tes!

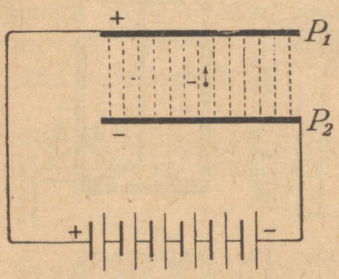
2. Kui suur peab olema kondensaatori elektrimahtuvus, mis laadimisel 110 V-ni sisaldab 0,5 kulonit elektrit?

3. On tarvis ehitada kondensaator mahtuvusega 2 μF, kusjuures isolaatoriks on 0,02 mm paksune parafiinitud paber. Kui suur peab olema selleks vajalik stanniioolpaber?

23. Elementaarlaeng. Katsed näitavad, et elektrilaeng ei saa esineda igasugustes suurustes, vaid on olemas väikesim elektrilaeng — elementaarlaeng, mis pole enam jagatav. Elementaarlaengu suurust võib otseselt määrata nn. h õ l j u m i s m e e t o d i järgi.

Kahele teineteisest mõne cm kaugusel olevale horisontaalsele plaadile antakse pinge, millega tekitatakse nende vahel homogeenne elektriväli. Elektrivälja tugevus E arvutatakse plaatidele antud pingest U ja nende vastastikusest kaugusest. — Kui pihustada õli väga peenikesteks piiskadeks, siis langevad need paigalolevas õhus ühtlase kiirusega alla. Nende raskusele $p = mg$ avaldab vastumõju õhu takistus.

Säärase õlipiisa langemist jälgitakse mikroskoobiga kahe eespool-kirjeldatud laetud plaadi vahel olevas elektriväljas. Õli pihustamisel voolavad õlipiisad torudüüsist välja, kus nad õhu vastu hõõrdudes omandavad väikese elektrilaengu e. Seetõttu mõjub õlipiiskadesse plaatide vahel mitte ainult nende raskus, vaid ka tung $p_1 = eE$, mis järgneb elektrivälja tugevuse definitsioonist: E on tung, millega mõjub elektriväli ühte abs. laenguühikusse. Seega e abs. laenguühikusse mõjub tung eE. Vastavalt tungide p ja p_1 resultandile õlipiisk kas langeb allapoole või tõuseb üles, mida võib jälgida mikroskoobiga. Paraja elektrivälja tugevuse puhul, mis vastab teatud plaatide pingele, võib saavutada olukorra, kus õlipiisk hõljub, s. o. ei lange ega tõuse. Sel juhul $p = p_1$, seega $eE = mg$ ja $e = \frac{mg}{E}$. Eriti täpseid mõõtmisi hõljumismeetodi järgi toimetas Millikan. Suur hulk sääraseid mõõtmisi näitas, et õlipiiskadel olev elektrilaeng on alati võrdne ühe, kahe, kolme või harva rohkema teatud kindla laenguga. See ongi elektri elementaarlaeng. Vastavad mõõtmised andsid, et elementaarlaeng $e = 4{,}802 \cdot 10^{-10}$ abs. laenguühikut. Niisama suurt laengut omab ka elektron.



Joon. 30. Elementaarlaengu määramine.

Elektrodünaamika.

Elektrivool. Elektrivoolu põhinähtused.

24. Elektrivoolu allikad. Et vesi voolaks toru kaudu ühest anumast teise, seks peab kummaski anumas olema erinev vee kõrgustase, järelikult ka rõhk. Seega paneb vee voolama rõhuvahe anumais. Analoogiliselt voolab elekter ühelt kehalt teisele, kui nende vahel on pinge ja kui neid ühendada metallist juhiga ehk juhtmega.

Elektrilaengute ühesuunalist liikumist juhtmes nimetatakse elektrivooluks. Elektrivoolu juhtmes põhjustab pinge. Vool kestab ainult niikaua, kuni püsib pinge.

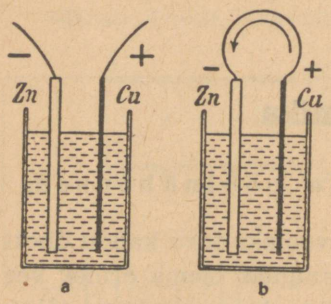
25. Galvaani ehk elektrielement. Kestva veevoolu anumaid ühendavas torus saame, kui hoiame alal vee kõrgustasemete vahe anumais. Samuti saame kestva elektrivoolu juhtmes siis, kui juhtme otstes on kestev pinge. Seega vooluallikas evib kestvat pinget. Koduses majapidamises saadakse elektrivool seinakontaktist. Ka siia juhitud traatide vahel on kestev elektripinge, mida võib näidata näiteks pingekaalude abil.

Aastal 1800 avastas itaalia füüsik A. Volta, et kahe eri metalli vahel tekib elektripinge, kui neid asetada happe- või soolalahusesse. Sellel nähtusel põhinevad keemilised elektrivoolu allikad.

Asetame nõrka väävelhappelahusesse vask- ja tsinkplaadi. Väga tundliku elektroskoobiga võib näidata, et tsink- ja vask-

plaadi vahel on nõrk pinge, umbes 1 volt. Ühendades vaskplaadi tsinkplaadiga metalltraadi ehk nn. juhtme kaudu, tekib selles kestev elektrivool.

Lahjendatud väävelhappesse asetatud vask- ja tsinkplaadi vahel hoiab pinge alal keemiline reaktsioon plaatide ja vedeliku vahel. Kestev pinge põhjustab ka kestva elektrivoolu. Siinkirjeldatud seadeldist, mis annab kestva elektrivoolu, nimetatakse **elektri-** ehk **galvaani elemendiks.** Põhjust, mis hoiab elektrielemendis alal pinge, nimetatakse **elektromotoorseks jõuks.** Elektromotoorse jõu suurust mõõdab pinge, seega on selle ühikuks v o l t.

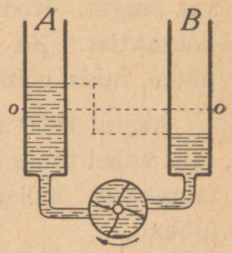


Joon. 31. Galvaani element.

Sõna „galvaani" tuleneb itaalia loodusteadlase L. Galvani nimest, kes esimesena avastas nähtuse, millel põhineb galvaani element. Õige seletuse aga sellele nähtusele andis esimesena itaalia füüsik A. Volta.

Metallplaati, mis omab positiivset laengut, antud juhul vask, nimetatakse **anoodiks,** teist, negatiivselt laetud plaati nimetatakse **katoodiks,** mõlemat aga elemendi **elektroodiks.** Seejuures nimetatakse vedelikust väljaulatuvate elektroodide otsi, millede vahel on elektripinge — **poolusteks.** Eristatakse positiivset ja negatiivset poolust vastavalt nende pingemärgile.

Pinget vooluallika pooluste vahel võime nii seletada, et vooluallika elektromotoorne jõud surub elektrone ühele poolusele ja nimelt negatiivsele poolusele, kuna teiselt pooluselt ta neid ära imeb. Seega võime vooluallikat võrrelda veepumbaga, mis pumpab vett ühest anumast teise, mille tulemuseks on vee kõrgustasemete vahe anumates (32. joon.). Pumba töötamine kestab seni, kuni tekkinud rõhuvahe ta peatab. Ühendades aga anumad omavahel toru kaudu, on pumba töötamise tulemuseks vee kõrgustasemete vahe anumates, kuigi vesi voolab pidevalt ühest anumast teise.



Joon. 32. Hüdrostaatiline analoogia.

Samasugune nähtus esineb ka vooluallikais. Vooluallika pooluste vahel hoiab kestva pinge alal elektromotoorne jõud.

Katsed näitavad, et elemendi elektromotoorne jõud ei olene elemendi plaatide suurusest, vaid ainult elektroodide ja vedeliku ainest.

Ka elektrimasina konduktoreid omavahel ühendades saame kestva elektrivoolu, kuid voolava elektri hulk on liiga väike, mistõttu sel teel tekkinud vool on nõrk.

Eespool-kirjeldatud elektrielementi tegelikult ei tarvitata, sest ta elektromotoorne jõud pole küllalt püsiv. Tarvitatavamaid galvaani elemente vaatleme hiljemini. Kõikide nende ehitus on analoogiline volta elemendiga: kaks erisugust metalli vedelikus.

26. Elektrivoolu ahel. Voolu suund. Elektrivoolu allikat ühes voolu tarvitava riistaga ja ühenduseks vajalikkude juhtmetega nimetatakse **vooluahelaks.**

Vooluahel on suletud ehk ühendatud, kui vooluallika poolused on omavahel ühendatud juhtmete kaudu.

Kokkuleppe põhjal loetakse voolu tehniliseks suunaks positiivse elektri voolamise suunda. Seega voolu suund välisahelas on elektrielemendi positiivselt pooluselt negatiivsele poolusele. Elektrielemendi sees on voolu suund vastupidine.

Varemini nägime, et ühendades metalse juhi kaudu kehad, millede vahel on pinge, voolavad elektronid ühelt kehalt teisele. Elektronid omavad negatiivset elektrilaengut, niisiis elektronide liikumine on vastupidine tehnilise voolu suunaga. Seega on uuema füüsika seisukohalt voolu tehniline suund metallis vastupidine tõelise liikuva elektrilaengu suunaga, mille moodustavad elektronid. Tehnilist ehk kokkuleppelist voolusuunda tarvitatakse tehnikas ja teaduses seepärast, et selle suunaga on seotud kõik voolusuunaga ühenduses olevad seadused, märgid jne.

Igal pool kirjanduses ja mujal, kus räägitakse voolusuunast, mõeldakse sellega tehnilist voolusuunda.

Tehniline voolusuund võeti tarvitusele 100 aastat varem kui avastati elektron.

Voolu tugevus ja takistus. Ohmi seadus.

27. Voolutugevus. Veevoolu tugevust torus mõõdetakse veehulga järgi, mis 1 sekundis toru läbib, näiteks kuupmeetrites või liitrites 1 sekundi kohta.

Veevoolu tugevus on seejuures kõigis toruosades üks ja sama, sest vastasel korral peaks kuhugi vett kogunema. Samuti võime rääkida gaasivoolu tugevusest. Analoogiliselt mõistetakse elektrivoolu tugevuse all elektrihulka, mis 1 sekundi kestel juhet läbib.

Voolutugevuse ühikuks on amper (A), mis tuletatud prantsuse füüsiku M. Ampère'i nimest. **Kui läbi juhtme ristilõike läheb 1 sekundi kestel 1 kulon elektrit, on voolutugevus 1 amper.** Seega voolutugevus

$$I = \frac{e}{t} \text{ (amprit)},$$

kus e on t sekundi kestel juhtmest läbivoolanud elektrihulk kulonites. Väiksema ühikuna tarvitatakse milliamprit (mA), kusjuures 1 mA = 0,001 A.

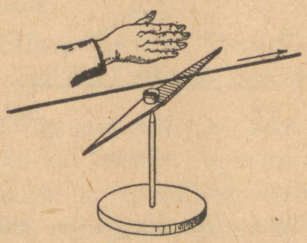
Nagu vee voolamise, nii ka elektrivoolu puhul on voolutugevus kõikides vooluahela juhtme ristilõigetes üks ja sama. Seda näitavad ka ahela mitmesugustesse osadesse lülitud voolutugevuse mõõtjad — ampermeetrid.

28. Elektrivoolu magnetiline toime. Elektrivoolu me otseselt ei näe ega saa ka teiste meeltega otseselt tajuda. Kas juhet läbib elektrivool, seda võime kindlaks teha ainult elektrivoolu toimete kaudu. Nagu hiljemini näeme, on katseliselt kindlaks

tehtud, et juhe, mida läbib elektrivool, soojeneb voolu toimel (soojuslik toime). Läbib elektrivool lahuseid, lagunevad lahustunud ained (keemiline toime). Elektrivoolu olemasolu kindlakstegemisel ja voolu mõõtmisel kasutatakse peamiselt ta magnetilist toimet.

Hoiame magnetnõela kohal voolujuhtme rööbiti magnetnõelaga, kuid viimasest pisut kõrgemal, nagu kujutatud 33. joonisel. Niipea kui juhime voolu läbi kirjeldatud juhtme, kaldub magnetnõel oma tavalisest põhja—lõuna sihist kõrvale.

Korrates sama katset, nii et voolujuhe on allpool, paremal või vasemal pool magnetnõela, näeme, et iga kord magnetnõel püüab voolu mõjul asetuda risti voolusihiga. Seda magnetnõela kõrvalekaldumise suunda võime väljendada järgmiselt (Ampère'i seadus, ka parema käe reegel): kui parem käsi juhtme kohal välja sirutada voolu suunas ja hoida seejuures peopesa magnetnõela poole, siis kaldub magneti põhjapoolus sinnapoole, kuhu näitab pöial. Katsed näitavad, et see kõrvalekaldumine on seda suurem, mida suurem on juhet läbiva voolu tugevus. Selle nähtuse avastas taanlane H. Örsted 1820. aastal.



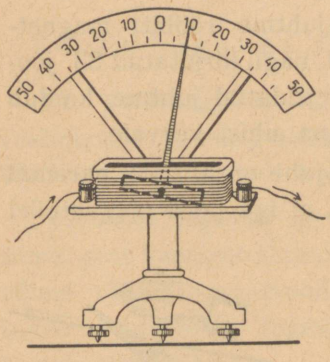
Joon. 33. Voolu magnetiline toime.

29. Galvanomeeter. Voolu mõju magnetnõelale võib suurendada, kui tõmmata voolujuhe mitu korda ümber magnetnõela, nii et viimane jääks voolujuhtme keerdude keskele. Seda kasutatakse galvanoskoopide ja teiste elektri-mõõteriistade ehitamisel.

Vertikaal-galvanoskoopi kujutab 34. joon. Selle galvanoskoobi magnet on osutiga varustatud ja võib kaalukangi-taoliselt horisontaalse telje ümber pöörduda. Ta on asetatud paljudest keerdudest koosnevasse traatpooli. Niipea kui pooli läbib

vool, kaldub magnet oma tavalisest horisontaalsest tasakaaluasendist välja. Nii näitab galvanoskoop, kas vooluahelas on voolu.

Galvanoskoopi, mis varustatud astmikuga, millelt võib lugeda voolutugevust, nimetatakse **galvanomeetriks.** Galvanomeetrit, mille astmikul märgitud voolutugevus amprites, nimetatakse **ampermeetriks.** Nagu hiljemini näeme, võime iga galvanoskoopi ümber ehitada pinge näitajaks. Pingemõõtjat, mille astmikult võib otseselt lugeda pinget voltides, nimetatakse **voltmeetriks.**

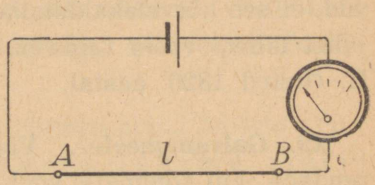


Joon. 34. Vertikaal-galvanoskoop.

30. Takistus. Veevoolu tugevus torus on seda väiksem, mida peenem on toru. Seega võime rääkida toru takistusest veevoolule. Analoogiline nähtus esineb ka elektrivoolu puhul.

Elektrivoolu metallides moodustavad elektronid, mis liiguvad seal pinge toimel. Liikumisel metalli aatomite ja molekulide vahel põrkavad elektronid nendega kokku, mistõttu nad kaotavad osa oma liikumisenergiast. Selle elektronide liikumisenergia kao tulemuseks ongi juhtme takistus.

Katsed näitavad, et juhtmete takistus oleneb juhtme mitmesugustest omadustest.



Joon. 35. Juhtme takistus.

Koostame vooluahela vooluallikast (1 või 2 akut), ampermeetrist ja 1 m pikkusest raud- või nikeliintraadist. Ühendame voolu ja loeme ampermeetrilt voolutugevuse. Asendame nüüd 1 m pikkuse traadi 2 m pikkuse samasuguse traadiga. Katse näitab, et nüüd on voolutugevus ½ sellest, mis oli varemini. Sama katse näitab, et 3, 4 jne. m pikkuse traadi puhul on voolutugevus ⅓, ¼ jne.

sellest, mis algul oli. See näitab, et 2, 3, 4 korda pikema traadi takistus on vastavalt 2, 3, 4 korda suurem.

Asendame 1 m pikkuse traadi niisama pika, kuid 2 korda suurema ristilõikega traadiga või lülime esimese traadiga rööbiti niisama pika ja jämeda traadi. Katse näitab, et nüüd on voolutugevus kaks korda suurem. Kolm korda suurema ristilõikega traadi puhul on voolutugevus kolm korda suurem. Seega traadi takistus on pöördvõrdeline traadi ristilõikega.

Lülides vooluahelasse võrdse pikkusega ja võrdse ristilõikega, kuid mitmesugustest ainetest valmistatud traate, näeme, et kõik ained ei juhi elektrit ühteviisi. Nii näiteks vasktraadi puhul on voolutugevus suurem kui raudtraadi puhul. Seega takistus oleneb ka traadi materjalist.

Eelmistest katsetest järeldame: **ühtlase juhtme (traadi) takistus on võrdeline traadi pikkusega, pöördvõrdeline traadi ristilõikega ja oleneb ka traadi materjalist.**

Samad seadused kehtivad ka vedelikkude kohta. Vedeliku takistuse olenevust vedelikusamba pikkusest ja ristilõikest võib näidata pikliku anuma abil, kus leiduvast vedelikust juhitakse elektrivool läbi kahe söeplaadi kaudu, mida võib teineteisest kaugemale või lähemale nihutada. Samuti võib vedeliku sügavust muuta.

Mitmesuguste juhtmete takistuste võrdlemistel ja mõõtmistel on tarvitusele võetud takistusühik, milleks on **oom** (Ω . Sõna oom tuleneb saksa füüsiku G. Ohmi nimest.

1 oom on 106,3 cm pikkuse ja 1 mm²-se ristilõikega elavhõbedasamba takistus 0° C juures.

Elavhõbe on siin võetud seepärast, et teda on võimalik destilleerimisega puhastada, sest katsed näitavad, et metallide takistused olenevad suurel määral nende puhtusest. Suurema takistusühikuna tarvitatakse ka megoomi, mis võrdub 1 000 000 oomiga.

Takistusi võib mõõta asendamise teel. Takistused on siis võrdsed, kui neid asendades saame samas vooluahelas ka sama tugevusega voolu.

31. Eritakistus. Eespool nägime, et mõned ained juhivad paremini elektrivoolu kui teised. Seda juhtme omadust iseloomustab aine eritakistus. Aine eritakistus on 1 m pikkuse ja 1 mm²-se ristilõikega traadi takistus oomides. Järgmises tabelis on antud mõnede tuntuimate ainete eritakistused 18° juures.

Hõbe	0,016	Plaatina	0,11
Vask	0,017	Seatina	0,21
Kuld	0,022	Elavhõbe	0,958
Alumiinium	0,032	Nikeliin	0,40
Tsink	0,059	Konstantaan	0,50
Nikkel	0,070	Manganiin	0,43
Raud	0,09—0,15		

Nagu sellest tabelist nähtub, on väikese eritakistusega hõbe, vask ja alumiinium. Et hõbe on võrdlemisi kallis metall, valmistatakse tehnikas tarvitatavad elektrijuhtmed peamiselt puhtast vasest, harvemini alumiiniumist. Ka on metallide sulamite eritakistused suuremad kui puhtate metallide takistused.

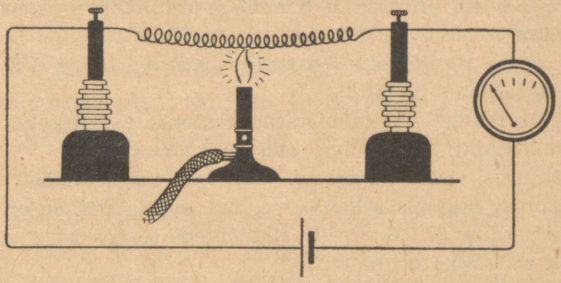
Juhtme takistuse R olenevust juhtme pikkusest l ja ristilõikest s võib avaldada järgmise valemi kujul:

$$R = \varrho \frac{l}{s}.$$

On R mõõdetud oomides, l — m-tes ja s mm²-tes, siis ϱ on võrdne aine eritakistusega. Sageli tarvitatakse eritakistuse pöördväärtust $\chi = \frac{1}{\varrho}$, mida nimetatakse **erijuhtivuseks.** Mida suurem on keha erijuhtivus, seda väiksem on ta takistus.

32. Takistuse olenevus temperatuurist. Koostame vooluahela spiraali keeratud raudtraadist ja ampermeetrist, kusjuures vooluallikana tarvitame ühte või kahte akumulaatorit. Soojendades raudtraati piiritus- või gaasipõletiga näeme, et voolutugevus raudtraadi kuumenemisega tunduvalt väheneb. Sellest järeldame, et raudtraadi takistus temperatuuri tõusuga suureneb. Samu tulemusi annavad ka katsed teiste metallidega.

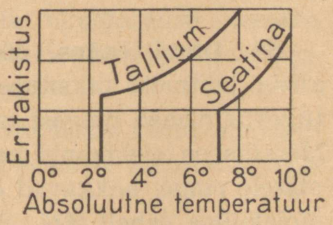
Üldiselt metalse juhi takistus suureneb temperatuuri tõusuga. Metalli eritakistus soojenemisel 1° võrra suureneb keskmiselt 0,04% võrra, seevastu söe ja vedelikkude eritakistused soojenemisel vähenevad.



Joon. 36. Takistuse olenevus temperatuurist.

See nähtus omab tähtsust elektri-hõõglampide puhul. Metallhõõgniidiga lambi süütamisel, niikaua kui hõõgniit on veel külm, läbib hõõglampi märksa tugevam vool kui hiljemini.

Samuti omab see nähtus suurt tähtsust takistus-normaalide valmistamisel. Seepärast ei valmistata takistus-normaalide takistustraate puhtatest metallidest, vaid nende sulamitest, nagu nikeliinist (58% vaske + 41% niklit + 1% mangaani), manganiinist (70% Cu, 30% Mn) ja konstantaanist (60% Cu, 40% Ni), millede eritakistused temperatuuriga peaaegu ei muutu.



Joon. 37. Ülijuhtivus.

33. Ülijuhtivus. Temperatuuri alanemisega väheneb metallide takistus üldiselt reeglipäraselt. Kuid uurides metallide takistusi väga madalatel temperatuuridel, avastas hollandi füüsik H. Kammerlingh-Onnes, et mitmete metallide, nagu elavhõbeda, seatina, tsingi takistus muutub absoluutse nullpunkti lähedal nulliks. Nii näiteks muutub seatina takistus — 266° C juures praktiliselt nulliks. Säärast nähtust nimetatakse **ülijuhtivuseks.** Nähtavasti selle temperatuuri juures, kus molekulid peaaegu täielikult paigal püsivad, ei leia elektronid liikumisel metallis mingit takistust.

34. Takistustermomeeter. Nähtusel, et metallide takistus suureneb temperatuuriga, põhineb takistustermomeetri ehitus. Takistustermomeeter koosneb harilikult spiraalikujulisest plaatinatraadist, mis

paigutatud kvartstorru. Et plaatinatraadi takistus suureneb temperatuuri tõusuga, siis mõõtes traadi takistuse, võime leida temperatuuri. Takistustermomeetrit tarvitatakse tehnikas mitte väga kõrgete temperatuuride mõõtmistel eriti seal, kus temperatuuri lugemine toimub eemal kohast, mille temperatuuri tuleb mõõta.

1. Arvuta 1 km pikkuse ja 8 mm^2-se ristilõikega rauast telegraafijuhtme takistus?

2. Kui suure ristilõikega vasktraat tuleb võtta, et 125 m pikkusel juhtmel oleks takistus 0,44 Ω ?

3. Nikeliintraadist on valmistatud reostaat takistusega 10 Ω. Kui pikk on nikeliintraat, kui ta diameeter on 0,3 mm?

4. Klaastorus, mille diameeter on 5 mm, on elavhõbe. Kui suur on elavhõbedasamba takistus selles torus, kui samba pikkus on 1,25 m?

5. 10 m pikkuse ja 0,6 mm^2-se ristilõikega traadi takistus on 2,5 oomi. Kui suur on selle aine eritakistus?

6. Kui suur on vasktraadi takistus, mille diameeter on 0,5 mm ja traadi kogukaal 2 kg?

7. Elektertrammi tuleb elektrivool elektertrammi jaamast õhujuhtmete kaudu, läbi vibu ja elektrimootori ning läheb raudrööpaid mööda tagasi. Arvuta juhtmete kogutakistus, kui trammivagun on 1 km kaugusel jaamast ja kui vastava juhtme diameeter on 1 cm, eritakistus 0,0314, rööpa ristilõige on 30 cm^2 ning ta eritakistus 0,15 Ω.

8. Vase takistus soojenemisel 1° C võrra suureneb 0,04% võrra. 10° juures on vasktraadi takistus 25 Ω. Kui suur on takistus 100° C juures?

35. Ohmi seadus. Eespool nägime, et voolutugevus oleneb ahela juhtmete takistusest ja vooluallika pingest. Et voolutugevus oleneb pingest, see järgneb ka elektronide teooriast. Metallis on elektronid kergesti liikuvad. Andes metalljuhtme otstele pinge, hakkavad elektronid liikuma juhtme aatomite ja molekulide vahelt läbi. Mida kõrgem on pinge, s. o. mida suurem on elektronide rõhuvahe traadi otstes, seda kiiremini liiguvad elektronid, seega seda rohkem elektrone läbib 1 sekundi kestel juhtme ristilõiget, seda suurem on ka voolutugevus.

Võtame elemendi, ühendame ta poolused kaunis pika traadi abil (et suuremat takistust saada) ampermeetri kaudu ja paneme tähele voolutugevust. Olgu voolutugevus näiteks 0,4 amprit. Nüüd lülime ahelasse ühe elemendi asemel kaks järjestikku ühendatud elementi, mis annab kaks korda suurema pinge. Takistuse jätame endiseks. Voolutugevust tähele pannes leiame, et

ta on 0,8 amprit. Niisiis suurendades pinget kaks korda, suurenes kaks korda ka voolutugevus. Katsed näitavad, et alati, kui kõik muud tingimused jäävad samadeks, on voolutugevus võrdeline pingega.

Vastavalt uurime voolutugevuse olenevust takistusest seega, et muutumatu pinge, näiteks 4 voldi puhul, lülime üksteise järel takistused 2 oomi, 4 oomi, 8 oomi jne. Voolutugevuse mõõtmised annavad vastavalt 2 amprit, 1 amper, 0,5 amprit jne.

Katsed näitavad seega, et voolutugevus on pöördvõrdeline takistusega.

Voolutugevuse olenevust takistusest ja pingest üheks lauseks kokku võttes saame nn. Ohmi seaduse: **elektrivoolu tugevus on võrdeline pingega ja pöördvõrdeline takistusega.** Tähistades voolutugevuse I, pinge U, takistuse R abil, võime Ohmi seaduse kirjutada lühidalt:

$$I = k\,\frac{U}{R},$$

kus k on võrdetegur, mis oleneb valitavaist ühikuist. Et vabaneda võrdetegurist, peame võtma takistuse ühikuks säärase juhtme takistuse, mille otste vahel olev pinge 1 V annab voolutugevuse 1 A. Seda takistusühikut nimetatakse **oomiks.** Nagu eespool nägime, omab takistust 1 oom elavhõbedasammas, mille pikkus on 106,3 cm ja ristilõige 1 mm^2.

Avaldades voolutugevuse, pinge ja takistuse vastavalt amprites, voltides ja oomides, võime Ohmi seaduse kirjutada järgmiselt:

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

Tehnilises kirjanduses antakse Ohmi seadusele sageli järgmine kuju:

$$U = IR.$$

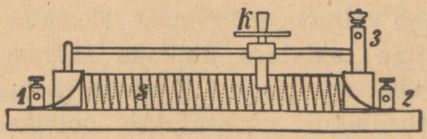
36. Elektronide voolamise kiirus. Uurimised näitavad, et elektrivool levib juhtmes valguse kiirusega. Seda voolu tekkimise kiirust ei tule segada elektronide voolamise kiirusega, mis on väga väike.

Nagu gaasiosakesed voolavad gaasitorustikus ja veeosakesed veetorustikus rõhu mõjul, nii liiguvad elektronid metallis pinge toimel.

Elektroni mass on võrreldes aatomite massidega väga väike, seetõttu elektronide vool — elektrivool metallis on praktiliselt inertsivaba ja järgneb silmapilkselt pinge muutustele. Elektripinge ja elektrivälja tekkimise levimiskiirus on väga suur: vastavad mõõtmised näitavad, et elektripinge levib ruumis kiirusega 300 000 km/sek, seega valguse kiirusega. Vastupidiselt sellele kiirusele näitavad arvutused, et elektronide voolamise kiirus on seejuures väga väike, näiteks 1-amprise voolutugevuse puhul vasktraadis, mille ristilõige on 1 mm², on elektronide liikumise kiirus umbes 0,01 cm/sek. Analoogiline nähtus toimub vee ja gaasi voolamisel torustikus. Et vesi või gaas voolaks torustikus, seks on tarvis rõhuvahet. Mõõtmised näitavad, et rõhk levib vees ja gaasis hääle kiirusega. Hoopis väiksem on seejuures vee- ja gaasiosakeste voolamise kiirus. Viimane oleneb peale rõhu veel voolamise tugevusest ja toru ristilõikest.

Elektrivoolu tekkimiseks on tarvilik pinge. Pinge levib valguse kiirusega ja see ongi elektrivoolu tekkimise levimiskiirus.

37. Reostaat. Voolutugevuse reguleerimiseks tarvitatakse erilisi hõlpsalt muudetavaid takistusi, mis lülitakse vooluahelasse. Niisuguseid takistusi nimetatakse **reostaatideks.** Reostaat koosneb paraja pikkuse ja jämedusega takistustraadist, mis on keritud spiraaliks, et ta vähem ruumi tarvitaks. Takistustraatidena reostaatide ehitamisel tarvitatakse peamiselt nikeliin-, manganiin-, konstantaan- jt. traate. Konstruktsiooni suhtes eristatakse mitut tüüpi reostaate.

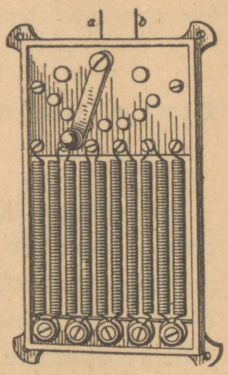


Joon. 38. Lükat-reostaat.

Lükat- ehk rullreostaat koosneb spiraalina isoleerivale silindrile keritud takistustraadist. Spiraali üksikud keerud on üksteisest isoleeritud traadi pinda katva oksüüdikihiga. Takistustraadi üks ots on kinnitatud klemmiga 1, teine ots klemmiga 2, kuna klemmiga 3 on ühendatud liikuv kontakt, mida võib lükata spiraali peal edasi-tagasi. Niisiis võib klemmide 1 ja 3 vahel lülitud keerdude arvu pidevalt muuta, seega ka reostaadi takistust.

Joon. 39 kujutab **väntreostaati.** Selle reostaadi takistust muudetakse vaskvända pööramisega vaskkontaktidel. Voolu-

juhtmed on ühendatud ühe äärmise kontaktiga ja vändaga. Pöörates vänta teisele äärmisele kontaktile, lülitub vooluahelasse kogu takistus. Vända pööramisega väheneb kontaktide vahele lülitud takistustraadi keerdude arv, seega ka reostaadi takistus.

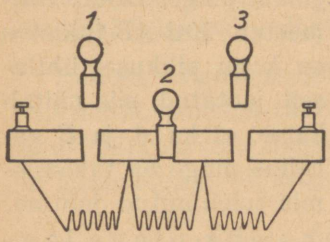


Joon. 39. Vänt-reostaat.

Kirjeldatud reostaate tarvitatakse voolu reguleerimiseks.

Teist liiki, nn. **mõõtereostaate** tarvitatakse takistuste mõõtmistel. Need on palju täpsemad kui reguleerimisreostaadid. Ühte niisugust mõõtereostaati, nn. **takistuskasti** ehk **reostaatmagasini** kujutab 40. joonis.

Isoleerivale lauale on kinnitatud messingplaadid, mis on omavahel ühendatud takistustraadist valmistatud traatspiraalide kaudu. Neid vaskplaate võib ühendada ka otseselt, pistes plaatide vahele vastavasse auku vaskpulga. On kõik pulgad sees, siis reostaadi takistus on null. Pulga väljavõtmisega lülitakse vastav takistus vooluahelasse. Säärased takistuskastid omavad takistusi 1, 2, 2, 5, 10, 20, 20, 50, 100 jne. oomi. Iga pulga kohal on märgitud vastav takistus. Mõõtereostaatidest võib läbi lasta ainult nõrka voolu.



Joon. 40. Reostaat-magasin.

Kõikidel reostaatidel on märgitud maksimaalne voolutugevus, mida neist võib läbi lasta, samuti ka nende takistus oomides.

1. Juhtme takistus on 44 Ω. Leia voolutugevus, kui pinge on 220 V.

2. Kui suur on hõõglambi takistus, mida läbib 220 V pingel vool tugevusega 0,2 A?

3. Kui suur peab olema 10 m pika manganiintraadi ristilõige, et 40 V pinge juures voolutugevus temas oleks 0,5 A?

4. Milline pinge on tarvis anda juhtmele, mille takistus on 2 Ω, et voolutugevus oleks 60 A?

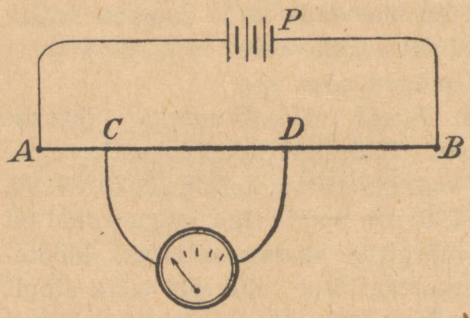
TARTU ÜLIKOOLI
RAAMATUKOGU

5. Arvuta voolutugevus juhtmes, mis koosneb 20 m pikkusest ja 0,8 mm läbimõõduga konstantaantraadist, kui juhtme otstele on antud pinge 40 V.

6. Kui suur on elektertriikraua takistus, kui 220-voldise pinge juures läbib teda elektrivool tugevusega 2,5 A?

Pinge langus. Ohmi seadus juhtme üksikute osade kohta.

38. Pinge langus. Suure takistusega juhtme (takistustraadi) otsmiste punktide *A* ja *B* vahel on pinge *U*, mille tulemuseks on elektrivool tugevusega *I*. Olgu voolu suund *A*-st *B*-sse. Vaatleme, kuidas jaotub pinge vooluahelas, võrreldes juhtme otsmiste punktidega. Ühendame voltmeetrist tulevad traadiotsad mitmesuguste punktidega takistustraadil. Katse näitab, et mida kaugemal olevaid punkte *D* ja *C* takistustraadil võtame, seda kõrgemat pinget näitab voltmeeter. Kui *AB* takistus on kogu pikkusel ühtlaselt jaotatud, siis näitab katse, et ka *A* ja *B* vaheline pinge on takistustraadil ühtlaselt jaotatud. Pinge osa, mis tuleb antud juhtmeosale, nimetatakse pinge kaotuseks ehk pinge languseks sellel juhtmeosal.



Joon. 41. Pinge langus juhtmel.

Kui vooluahelasse lülitud juhe pole ühtlase takistusega, vaid koosneb mitmesuguse jämedusega traatidest, siis näitab katse, et pinge langeb traadi peenemas osas rohkem kui jämedamas osas. Mõõtmised näitavad, et pinge langus on võrdeline selle juhtmeosa takistusega. Seega kogu pinge jaotub ahelas võrdeliselt juhtmeosade takistusega.

Ka Ohmi seadusest võime sama arvutada. Koosnegu juhtmete kogu välistakistus kolmest osatakistusest r_1, r_2, r_3. Ohmi seaduse järgi voolutugevus I arvutatakse valemist

$$I = \frac{U}{r_1 + r_2 + r_3}. \qquad (1)$$

Sama seadust võib kirjutada ka järgmiselt:

$$U = Ir_1 + Ir_2 + Ir_3. \qquad (2)$$

Seega pinge U jaotub kolmeks osaks:

$$U_1 = Ir_1; \qquad U_2 = Ir_2; \qquad U_3 = Ir_3. \qquad (3)$$

Seejuures $U = U_1 + U_2 + U_3$.

Pinged U_1, U_2 ja U_3 ongi pinge langused juhtmeosadel 1, 2 ja 3. Kui ühe osa, näiteks r_1, takistus on võrreldes teistega väga suur, siis kogu pinge kaotus langeb takistuse sellele osale.

Tehnikas on pinge kaotusel juhtmes suur tähtsus. Magistraalliinidel tõmmatakse üles jämedad vasktraadid, et neil ei esineks tunduvat pinge kaotust. Ka tubaste juhtmete takistus peab olema väike võrreldes voolu tarvitavate riistade, nagu elektrihõõglampide, elekterkeetja jt., takistustega.

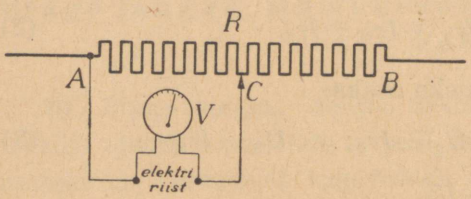
Lülides valgustusvoolu näiteks elekterkeetjasse või elektertriikrauda, paneme tähele, et voolu ühendamise hetkel hõõglamp märgatavalt nõrgemini põlema hakkab. Selle põhjuseks on pinge langus tubastes juhtmetes.

Valemeid (3) võime kirjutada ka järgmiselt:

$$I = \frac{U_1}{r_1}; \qquad I = \frac{U_2}{r_2}; \qquad I = \frac{U_3}{r_3}.$$

Et U_1, U_2, U_3 on pinge juhtmeosade otste vahel, siis järgneb sellest, et Ohmi seadus on kehtiv ka juhtme üksikute osade kohta. Seega võime leida voolutugevuse, kui teame pinge kaotuse juhtmeosa kohta ja vastava takistuse.

39. Potentsiomeeter. Pinge langust juhtmel kasutatakse tehnikas ja laboratooriumides madala pinge saamiseks kõrgemapingelise vooluallika puhul. Sääraseid seadiseid nimetatakse **pingejaotajateks** ehk **potentsiomeetriteks.** 42. joonis kujutab potentsiomeetri skeemi. Vooluahelasse lülitud takistuse R otste A ja B vahel on pinge, mis võrdub vooluallika pingega. On takistustraat R ühtlase takistusega, siis toimub ühtlaselt ka pinge langus A ja B vahel. Nihutades liugekontakti C takistustraadil, võime saada A ja C vahel mistahes pinget alates nullist kuni A ja B vahelise pingeni. On näiteks A ja B vaheline pinge 1 volt, siis, asetades liugekontakti C ühe kolmandiku kaugusele takistustraadil alates otsast A, saame A ja C vahel pinge $\frac{1}{3}$ volti. Nagu siit näha, võimaldab potentsiomeeter ka pidevat pinge muutust.



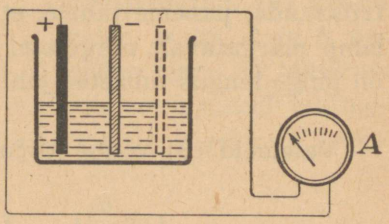
Joon. 42. Potentsiomeeter.

1. Milline on pinge kaotus juhtmel, mille takistus 5 oomi, kui teda läbib vool tugevusega 3 amprit?

2. Pinge kaotus reostaadis on 100 Ω. Leia reostaadi takistus, kui voolutugevus on seejuures 5 A?

3. Vooluahelasse on lülitud takistused 3 Ω, 4 Ω ja 6 Ω. Kui suur on pinge langus üksikutes takistustes?

40. Sisetakistus. Võtame vooluallikaks elektrielemendi, mille elektroodide kaugust võib muuta. Koostame vooluahela tähendatud elemendist, ampermeetrist ja takistustraadist, mille valime niisuguse, et voolutugevus oleks 1—2 amprit. Muudame nüüd elektroodide kaugust neid teineteisest eemale viies. Katse näitab, et mida kaugemale elektroodid teineteisest viime, seda nõrgemaks muutub vool. Samuti suureneb voolutugevus, kui elemendisse vedelikku juurde lisame. Katse näitab ka, et voolutugevus suureneb, kui võtta suuremad elektroodid. Seega ka elemendi vedelik ja elektroodid omavad takistust. Seda osa vooluahela takistusest nimetatakse **sisetakistuseks.**



Joon. 43. Sisetakistus.

Niisiis koosneb vooluahela kogu takistus R välisjuhtmete takistusest R_v ja vooluallika sisetakistusest R_s:

$$R = R_v + R_s.$$

Rakendades Ohmi seadust kogu vooluahela, sisemise ja välise osa kohta, võime anda Ohmi seadusele kuju:

$$I = \frac{E}{R_v + R_s}$$

ehk $$E = IR_v + IR_s,$$

kus E on elektrielemendi elektromotoorne jõud. $IR_v = U$ on pinge elektriallika klemmide vahel, mispärast seda sageli nimetatakse ka **klemmide pingeks.**

IR_s on pinge kaotus vooluallikas. Eelmisest valemist näeme, et suletud vooluallika elektromotoorne jõud = klemmide pinge + pinge kaotus vooluallikas. Seega üldiselt klemmide pinge on väiksem kui vooluallika elektromotoorne jõud (lüh. EMJ).

1. Elektrielemendi EMJ on 1,8 V, sisetakistus 2,2 Ω. Leia voolutugevus, kui välistakistus on 7,8 Ω.

2. Elektrielemendi EMJ on 1,5 V. Välisahela takistus on 2 Ω. Leia elemendi sisetakistus, kui ta annab voolu tugevusega 0,5 A.

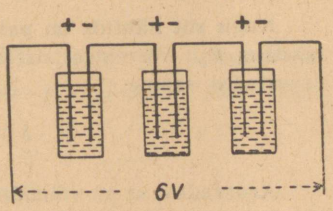
3. Elektrielemendi sisetakistus on 0,6 Ω, välisahela takistus 0,4 Ω. Leia selle elemendi EMJ ja klemmide pinge, kui voolutugevus on 1,6 A.

4. Mispärast on pinge hõõglambi pesas praktiliselt niisama suur kui elektrivõrgu juhtmete vahel?

41. Elektrielementide patarei. Kui ühest galvaani elemendi voolust ei jätku antud otstarbeks, siis võib mitu galvaani elementi ühendada **patareiks.**

Elemente võib ühendada üheks patareiks mitmel viisil.

Järjestikusel ehk **jadalülitusel** ühendatakse ühe elemendi pluss-poolus teise elemendi miinus-poolusega, teise elemendi pluss-poolus kolmanda elemendi miinus-poolusega jne. Vabaks jäänud viimase elemendi pluss-pooluse ja esimese elemendi miinus-pooluse vahel olev elektromotoorne jõud on võrdne kõikide patareisse lülitud elementide elektromotoorsete jõudude summaga. Et järjestikusel ühendamisel vool peab läbima kõikide elementide vedelikke, siis on arusaadav, et järjestikusel lülitusel patarei sisetakistus on suurem kui üksiku elemendi sisetakistus ja nimelt võrdne kõikide elementide sise-



Joon. 44. Järjestikune lülitus.

takistuste summaga. Olgu ühe elemendi elektromotoorne jõud E, sisetakistus R_s ja vooluahela välistakistus R_v, siis voolutugevus I, mille annab n järjestikku lülitud elementi, võrdub:

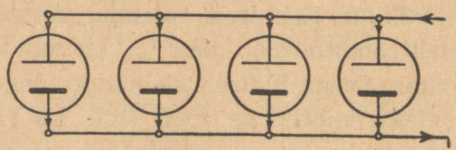
$$I = \frac{nE}{nR_s + R_v}.$$

Nagu siit näha, on säärane lülitus ainult siis kasulik, kui välistakistus R_v on võrreldes sisetakistusega nR suur, sest siis

$$I = \frac{nE}{R_v},$$

kuna nR_s kui väga väikest suurust võrreldes R_v-ga võib lugeda nulliks.

Elektrielemente võib ka nii ühendada ühiseks patareiks, et kõikide elementide pluss-poolused ühendatakse omavahel, samuti ka kõik miinus-poolused omavahel. Seda lülitusviisi nimetatakse **paralleelseks lülituseks.** Sel juhul patarei elektromotoorne jõud on niisama suur kui üksiku elemendi elektromotoorne jõud, sest kogu patarei pole midagi muud kui üks suuremate elektroodidega element. Sisetakistus aga on n elemendi puhul n korda väiksem. Ohmi seaduse järgi voolutugevus



Joon. 45. Paralleelne lülitus.

$$I = \frac{E}{\frac{R_s}{n} + R_v} = \frac{nE}{R_s + nR_v}.$$

Nagu siit nähtub, on paralleelne lülitus ainult siis kasulik, kui välistakistus R_v võrreldes sisetakistusega R_s on väga väike. R_v-d mitte arvestades saame

$$I = \frac{nE}{R_s}.$$

Arusaadav, et on võimalik teha ka teissuguseid lülitusi: ühendada elemendid kahe- või kolmekaupa paralleelselt ja siis neist moodustada patarei järjestikusel lülitamisel.

1. Patarei koosneb 3 järjestikku ühendatud kuivelemendist, millede igaühe sisetakistus $R_s = 0{,}5\ \Omega$ ja elektromotoorne jõud 1,5 V. Leia voolutugevus, kui välisahela takistus on 4 Ω.

2. Lahenda eelmine ülesanne, kui kõik kolm elementi on ühendatud paralleelselt.

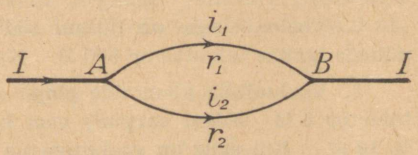
42. Voolu harunemine. Tavaliselt elektrivoolu tarvitavad aparaadid — hõõglambid, elektertriikrauad, elekterkeetjad — lülitakse vooluahelasse rööbiti, seega on siin tegemist voolu harunemisega. Vaatleme, kuidas on lugu voolutugevusega harudes (46. joon.).

Vool hargneb punktis A kaheks haruks 1 ja 2, mis punktis B uuesti ühinevad. Olgu peavoolu tugevus I, haruvoolude tugevused i_1 ja i_2. Arvestades, et harudesse voolanud elektrihulk võrdub sealt ära voolanud elektrihulgaga, leiame

$$I = i_1 + i_2,$$

s. o. **peavoolu tugevus on võrdne haruvoolude tugevuste summaga** (1. Kirchhoffi seadus).

Olgu harude takistused r_1 ja r_2 ja pinge A ja B vahel U, siis Ohmi seaduse järgi võib pinget U avaldada kahel viisil:



Joon. 46. Voolu harunemine.

$$U = i_1 r_1 \text{ ja } U = i_2 r_2.$$

Siit järgneb: $i_1 r_1 = i_2 r_2$ ehk

$$\frac{i_1}{i_2} = \frac{r_2}{r_1}.$$

Tähendab, **haruvoolude tugevused on pöördvõrdelised harude takistustega.**

Arvutame harude üldtakistuse. Et pinge U harunemispunktide A ja B vahel on kõikide harude puhul sama, siis Ohmi seaduse järgi

$$i_1 = \frac{U}{r_1}; \qquad i_2 = \frac{U}{r_2}.$$

Eelmise põhjal

$$I = i_1 + i_2 = \frac{U}{r_1} + \frac{U}{r_2}.$$

Kujutleme, et harud on asendatud ühe juhtmega üldtakistusega R, siis läbib seda takistust vool $I = \frac{U}{R}$.

Siit järgneb

$$\frac{U}{R} = \frac{U}{r_1} + \frac{U}{r_2} \quad \text{ehk} \quad \frac{1}{R} = \frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2}.$$

Harude üldtakistuse pöördväärtus on võrdne üksikute harude takistuste pöördväärtuste summaga. Sama reegel kehtib ka siis, kui harude arv on suurem kui 2:

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} + \frac{1}{r_3} + \ldots\ldots\ldots$$

Tõesta seda!

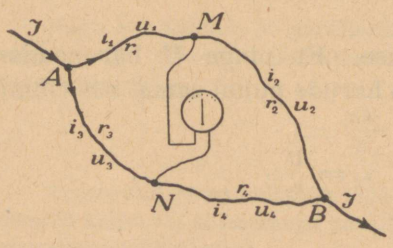
1. Peavoolu tugevus on 4 A, harude takistused on $r_1 = 2\Omega$ ja $r_2 = 3\Omega$. Kui suured on haruvoolu tugevused? Kui suur on harude üldtakistus?

2. Vooluahelasse on lülitud rööbiti 10 söeniidilampi (lampreostaat), millede igaühe takistus on 500 Ω. Kui suur on nende lampide üldtakistus?

3. Vooluallika klemmide pinge on 20 V. Sellesse ahelasse on lülitud takistus 5 Ω. Edasi hargneb vool kaheks haruks, millede takistus on 4 ja 10 Ω. Kui suur on voolutugevus ja välisahela üldtakistus?

43. Takistuse mõõtmine. Tehnikas määratakse juhtmete takistused katse teel, väga harva arvutamise teel juhtme eritakistusest, pikkusest ja ristilõikest.

Takistust R võib määrata Ohmi seaduse põhjal voolutugevuse I ja pinge U mõõtmisega, sest $R = \frac{U}{I}$. Säärane meetod nõuab vastava mõõtepiirkonnaga täpseid mõõteriistu. Seepärast tarvitatakse takistuste mõõtmiseks sagedamini vooluharu seadusel põhinevat **Wheatstone'i silda.** Kui ühendada kahe vooluharu punktid A ja B juhtmega, millesse lülitud galvanomeeter, siis näitab galvanomeeter üldiselt voolu. Kui M ja N vahel on pinge null, siis vool puudub. Seda nähtust võib võrrelda jõe kahe haruga. Neid ühendavas kraavis ei voola vesi, kui jõgede pindade kõrgused ühenduskohtades on ühekõrgused. Kui haru MN on vooluta, siis on pinge A ja M vahel niisama suur kui A ja N vahel ning M ja B vahel niisama suur kui N ja B vahel. Tähistame juhtmete takistused AM, MB, AN ja NB vastavalt r_1, r_2, r_3 ja r_4. On



Joon. 47. Wheatstone'i silla skeem.

silla haru MN vooluta, siis on voolutugevused i_1 ja i_2 takistustes r_1 ja r_2 samad. Ohmi seaduse põhjal saame:

$$i_1 = \frac{u_1}{r_1} = \frac{u_2}{r_2}, \text{ millest } \frac{r_1}{r_2} = \frac{u_1}{u_2}.$$

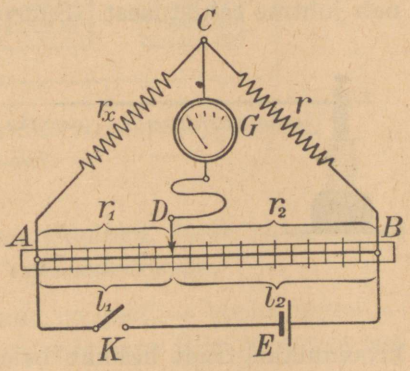
Samuti võime kirjutada teise haru kohta:

$$i_2 = \frac{u_3}{r_3} = \frac{u_4}{r_4}, \text{ millest } \frac{r_3}{r_4} = \frac{u_3}{u_4}.$$

Et $u_1 = u_3$ ja $u_2 = u_4$, siis järgneb siit:

$$\frac{r_1}{r_2} = \frac{r_3}{r_4}.$$

Praktiliselt on Wheatstone'i silla ehitus järgmine (joon. 48). Takistused r_1 ja r_2 (AD ja DB) on moodustatud millimeeter-jaotustega varustatud mõõdupuule sirgu tõmmatud ühtlase jämedusega takistustraadist. Kui tundmatu takistus on r_x, siis r on võrreldav takistus (takistuskast). Liugekontakti D nihutatakse takistustraadil edasi-tagasi, kuni sillaharu CD on vooluta. Et seda kindlaks teha, on sillaharru lülitud tundlik galvanomeeter. Et r_1 ja r_2 on moodustatud ühtlase takistusega traadist, siis r_1 ja r_2 suhtuvad kui nende pikkused l_1 ja l_2. On sillaharu vooluta, siis kehtib seos $r_x : r = l_1 : l_2$, millest võime arvutada r_x.



Joon. 48. Wheatstone'i sild.

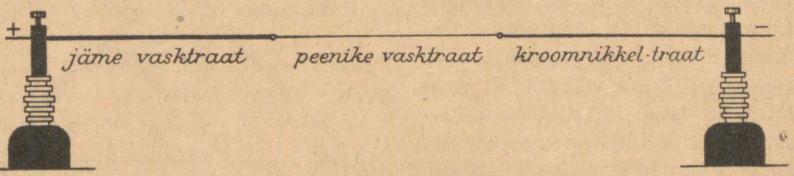
Wheatstone'i silla meetodit tarvitatakse ka vedelikkude takistuste määramistel. Vedelikkude takistuste mõõtmine on selle poolest raskem, et neis tekivad voolu läbimisel elektroodidel keemilised muutused, mis mõjustavad segavalt mõõtmisi. Sellest raskusest on üle saadud seega, et vedelikkude takistuste mõõtmistel tarvitatakse vahelduvvoolu, s. o. voolu, mille suund kiiresti muutub. Katse näitab, et säärane vool neid muutusi elektroodidel ei tekita. Galvanomeetri asemel tarvitatakse sel juhul telefoni, milles tuleb vahelduvvool häälena kuuldavale.

1. Hõõglambi takistuse määramisel Wheatstone'i sillal $r = 150\ \Omega$. Galvanomeeter ei näidanud voolu, kui $l_1 = 62{,}5$ cm, kusjuures kogu mõõtetraadi pikkus oli 100 cm. Kui suur on hõõglambi takistus?

2. Wheatstone'i silla mõõtetraadi pikkus on 100 cm. Võrreldavate takistuste suurused on 10 ja 15 Ω. Kuidas jagab liugekontakt silla mõõtetraadi pikkuse?

Voolusoojus. Voolu võimsus.

44. Joule'i seadus. Katsed näitavad, et kõik juhtmed elektrivoolu läbimisel soojenevad, kuigi mitte ühesugusel määral. Tõmbame kahe klemmi vahele juhtme, mis koosneb jämedast vasktraadist, peenikesest vasktraadist ning takistustraadist (kroomnikkel-traadist) ja juhime sellest voolu läbi. Voolu toimel kroomnikkel-traat hõõgub silmanähtavalt, peenike vasktraat läheb soojaks, kuna jäme vasktraat märgatavalt ei soojenegi. Seega soojushulk, mis juhtmes voolu toimel vabaneb, oleneb juhtme takistusest. Suurendades voolutugevust näeme, et



Joon. 49. Voolusoojus.

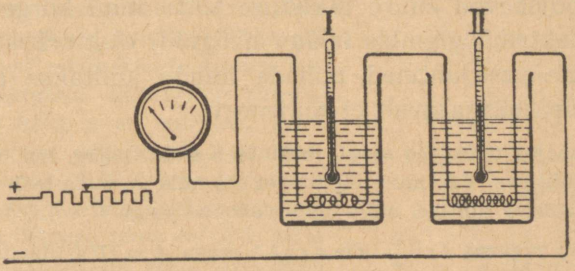
kroomnikkel-traat hakkab heledamalt hõõguma, samuti soojeneb peenike vasktraat. Seega voolu toimel vabanenud soojushulk oleneb ka voolu tugevusest. Voolu toimel juhtmes tekkinud soojushulka nimetatakse **voolusoojuseks.**

Kuidas oleneb voolusoojus juhtme takistusest ja voolutugevusest, seda võime näha järgmisest katsest.

Kahte ühesugusesse kalorimeetrisse — keeduklaasi — on asetatud kumbagi takistustraadist spiraalid, milledest ühe takistus on kaks korda suurem kui teise spiraali takistus. Kalorimeetritesse kallame ühepalju destilleeritud vett ja lülime nad järjestikku vooluahelasse, kuhu on veel lülitud ampermeeter ja

voolutugevuse reguleerimiseks reostaat. Ühendame voolu ja jälgime vee temperatuuri tõusu kalorimeetris. Katse näitab, et kalorimeetris, kus on kahekordse takistusega spiraal, ka temperatuuri tõus on kaks korda suurem: seega **voolusoojus juhtmes on võrdeline juhtme takistusega.**

Nüüd suurendame reostaadi abil voolutugevuse kahekordseks. Katse näitab, et kahekordse voolutugevuse puhul tekib sama aja kestel $2 \cdot 2 = 4$ korda rohkem soojust. Seega **voolu-**



Joon. 50. Voolusoojuse olenevus takistusest ja voolutugevusest.

soojus on võrdeline voolutugevuse ruuduga. Sama katse näitab ka, et **voolusoojus on võrdeline voolu kestusega.**

Voolu toimel juhtmes tekkinud soojust — voolusoojust — mõõtis esimesena Joule (1841. a.), kelle nime järgi tuntakse seadust, mis annab seose tekkinud soojushulga Q, voolutugevuse I, juhtme takistuse R ja voolu kestuse t vahel:

$$Q = cI^2Rt,$$

kus c on võrdetegur, mis oleneb valitavaist ühikuist. Mõõdame Q kalorites, I — ampreis, R — oomides ja t sekundeis, siis $c = 0{,}24$, seega

$$Q = 0{,}24\, I^2R\, t.$$

Voolusoojust nimetatakse mõnikord ka J o u l e'i s o o j u s e k s.

Ohmi seaduse järgi voolutugevus $I = \frac{U}{R}$ ehk $R = \frac{U}{I}$; seetõttu võib Joule'i seadusele anda ka järgmise kuju:

$$Q = 0{,}24\, IUt \text{ (cal)},$$

kus U on juhtme otste vaheline pinge.

Joule'i seadusest järgneb, et elektrivoolu toimel soojeneb see osa juhtmest rohkem, mille takistus on suurem. On juhtme mõne osa takistus väga väike, siis see osa voolu toimel märgatavalt ei soojenegi.

Nii soojenevad suure takistuse tõttu kuni kõrge temperatuurini elektrihõõglambis leiduv hõõgniit, elekterkeetjas hõõgtraat, kuna vaskjuhtmed, millede kaudu juhitakse elektrivool tarvitajaile, märgatavalt ei soojenegi.

Voolusoojus tekib töö arvel, mida teeb elektrilaeng, kui ta pinge toimel läbib juhtme. Varemini nägime, et töö hulk A, mida teeb elektrilaeng e kulonit, läbides juhtme, mille otste vaheline pinge U volti, on eU džauli. Elektrivoolu tugevus $I = \frac{e}{t}$, siit $e = I\,t$, seega $A = IU\,t$ (džauli), kus t on voolu kestus. Arvestades, et $U = IR$, saame

$$A = I^2R\,t \text{ (džauli)}.$$

Mehhaanikast teame, et 1 džaul on ekvivalentne 0,24 kaloriga, seega

$$Q = 0{,}24\, I^2Rt = \\ = 0{,}24\, IUt.$$

Seega saime sama tulemuse, mille andis katsegi.

1. Kui palju soojust tekib 1 tunni kestel hõõglambis, mis 220 V pinge juures tarvitab 0,25 A?

2. Reostaadi takistus on 44 Ω. Kui palju soojust tekib reostaadis 20 minuti kestel, kui voolutugevus on 5 A?

3. Takistustraadist spiraal, mille takistus 6 Ω, on asetatud vette. Veehulk on 500 g, algtemperatuur 16° C. Kui suur on spiraali läbiva voolu tugevus, mis soojendab selle vee temperatuuri 10 minuti kestel 100°-ni, mille juures soojuskadu on 25%?

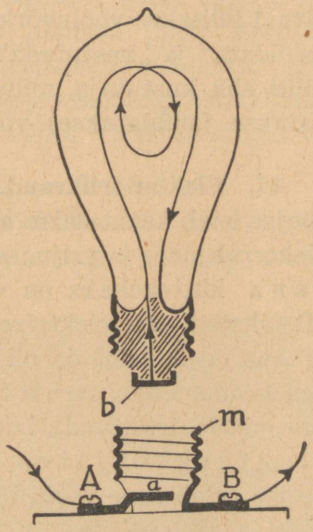
4. Elekterkeetja tarvitab 220 V pinge juures 4,1 A. Mis aja kestel soojeneb selles 2 l vett 14°-st kuni 100° C, kui soojuskadu on 30%?

5. Leia traadi takistus, milles 5-amprine vool tekitab 15 minuti kestel 10 kcal soojust?

45. Elektrivalgustus. Hõõglamp. Nähtusel, et peenike traat voolu toimel hõõgub ja valgust kiirgab, põhineb elektri-

hõõglambi tarvitamine. Elektrihõõglamp ehk elektripirn koosneb õhutühjast või keemiliselt inertse gaasiga täidetud klaaspirnist, millesse on paigutatud söest või raskesti sulavast metallist *hõõgniit*. Hõõgniidi jämedus ja pikkus on nii valitud, et ta antud pinge juures voolu läbimisel parajasti heledalt hõõgub.

46. Hõõglambi ajaloost. H. Davy pani esimesena tähele (1801. a.), et plaatinatraat voolu toimel kuumenes, kuni ta hõõguma hakkas. Kuid kulus palju uurimistööd ja katsetamisi, enne kui sellel nähtusel põhinev elektrihõõglamp kasutamiskõlblikuks sai. Katsed ja teoreetilised arvutused näitavad, et kiirgamisel muutub seda suurem osa kiirgamisenergiast nähtavaks kiirguseks, mida kõrgem on kiirgava keha temperatuur ja seda rohkem valgusenergiat tuleb ka 1 W kohta. Seega tuli selle küsimuse lahendusel leida aine, mis võimalikult kõrget temperatuuri välja kannatab. Esimesena võeti tarvitusele söeniidist hõõglambid (Th. Edison). Kuigi söe sulamistemperatuur on väga kõrge, u. 4200° C, ei või teda elektripirnis üle 1850° C kuumutada, sest kõrgema temperatuuri juures ta pihustub kiiresti (muutub tolmuks) ja sadestub pirni klaasseinale musta, läbipaistmatu kihina. Ühtlasi muutub ta siis väga rabedaks.



Joon. 51. Hõõglamp.

Söeniidi asemel võeti hiljemini tarvitusele osmium, siis tantaal ja lõpuks volfram, mis metall teised metallid sellel alal on välja tõrjunud. Volframi sulamistemperatuur on kõrge, u. 3400° C, ja volframist valmistatud hõõgniiti võib kuumutada õhutühjas ruumis kuni 2080° C, ilma et ta pihustuks. Suuri tehnilisi raskusi oli peenikeste volframniitide valmistamisel. Järgmine edusamm hõõglampide täiendamise alal oli see, et hõõgniit paigutati pirni spiraalina ja pirn ise täideti keemiliselt inertse gaasiga (näiteks lämmastikuga, argoniga). Hõõgniidile spiraalikuju andmine vähendab tunduvalt soojuskadu hõõglambi täitegaasi kaudu, täitegaas aga takistab hõõgniidi pihustumist. Seetõttu on võimalik kuumutada hõõgniiti kõrgema temperatuurini. Gaasiga täidetud hõõglampides on hõõgniidi temperatuur 2625° C, kusjuures energiatarvidus 1 Hefneri küünla kohta on kuni ½ vatti.

Hõõglambi keskmine põlemiskestus on u. 1000 tundi. Elektrihõõglampidel on alati märgitud, millise pinge jaoks on antud elektripirn ehitatud, ja neid võib tarvitada ainult märgitud pinge juures. Kui juhtida näiteks 110-voldisesse elektripirni 220-voldise pingega vool, siis põleb elektripirn läbi, ümberpöördult aga — 220 voldi tarvis ettenähtud elektripirn 110-voldisel pingel hõõgub nõrgalt. Elektripirnid kruvitakse vastavaisse pesadesse, millede kaudu juhitakse vool elektripirni. Jälgi voolu käiku hõõglambis 51. joonise järgi! Kõik elektripirnid lülitakse vooluvõrku rööbiti, mis võimaldab neid üksikult „süüdata" ja „kustutada". Seega igal lambil on tavaliselt oma lüliti ehk kustutaja, mille abil elektripirni läbiv vool kas ühendatakse (süüdatakse) või katkestatakse (kustutatakse).

47. **Elekter-triikraud. Elekterkeetjad. Elekterahi.** Voolusoojus leiab kasutamist elekter-triikraudades, elekterkeetjates, elekterahjudes ja paljudes teistes riistades. E l e k t e r - t r i i k - r a u a küttekehaks on vilgukiviplaadi ümber keritud kroomnikkeltraat, mis elektrivooluga kuumaks aetakse. Selle traadi pikkus ja jämedus on nii valitud, et teda vooluallikaga ühendades kuumeneb ta paraja temperatuurini. Küttekehalt levib soojus mööda triikrauda laiali. Samasugused küttekehad on ka e l e k t e r k e e t j a t e s ja e l e k t e r a h j u d e s. Elekterkeetja tuleb enne voolu ühendamist veega täita, vastasel korral võib ta läbi põleda.

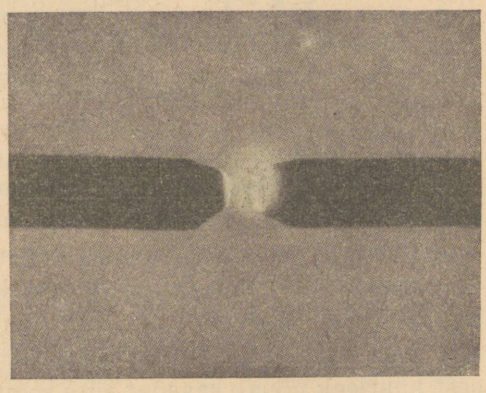
48. **Lühiühendus.** Juhtmed, millede kaudu toimetatakse elektrivool elektrijaamast tarvitajaile, on võrdlemisi jämedad vasktraadid. Seetõttu on nende takistus elektrivoolule väga väike. Pisut peenemad on need juhtmed, mida tarvitatakse tubades elektriseadmeis, kuid ka nende takistus elektrivoolule on väga väike. Teisiti on lugu väga peenikese söest või metallist hõõgniidiga elektripirnis. Selle takistus elektrivoolule on väga suur.

Igas riistas, kus elektrivoolu tarvitatakse, on osa juhtmeid suure takistusega, mistõttu elektrivool neis kunagi liiga suureks ei tõuse.

Kuid elektrivool võib tekkida ka otse elektrijuhtmete vahel, kui nad ühendusse satuvad mingi elektriseadme rikke tõttu või mõnel teisel põhjusel. Säärast ühendust nimetatakse **lühiühenduseks.** Niisugusel juhul kasvab vigastatud koha kaudu elektrivoolu tugevus väga suureks. Juhtmed võivad ise hõõguma hakata ja põhjustada tulikahju tekkimist.

49. Kaitsmed. Et juhtmeid, lampe jne. lühiühenduse eest kaitseda, seks lülitakse vooluahelasse kaitsmed, milleks on peenike (seatina- või hõbe-) traat, mis kohe ära sulab ehk „läbi põleb", kui voolutugevus tõuseb üle lubatud piiri. Peenike kaitsetraat paigutatakse harilikult padrunisse (kaitsekork), mis keeratakse nagu elektripirn vastavasse pessa. Seega on kaitsme ehk kaitsekorgi vahetamine lihtne. Kõik elektriseadmed on varustatud kaitsmetega.

50. Kaarleek. Ühendame kaks söepulka 40—50 või kõrgemapingelise vooluallikaga ja lähendame siis söepulga otsad teineteisele kuni kokkupuutumiseni. Voolu toimel kuumenevad eriti tugevasti söepulga otsad, kus takistus kõige suurem, seetõttu ei katke vool söeotsi teineteisest 0,5—1 cm-ni eemaldades, vaid söeotste vahel tekib kaarekujuline väga hele leek, mida nimetatakse **kaarleegiks** ehk **volta kaareks** (Davy 1812). Kui kaarleek kumerläätse abil ekraanile projitseerida, siis võib tähele panna, et positiivne süsi on palju heledam kui negatiivne süsi. Aja jooksul põleb positiivse söe otsa lohk, nn. k r a a t e r, mis kiirgab kuni 85% kogu kaarleegi valgusest. Kaarleegi valgustugevus on väga suur ja suureneb voolutuge-

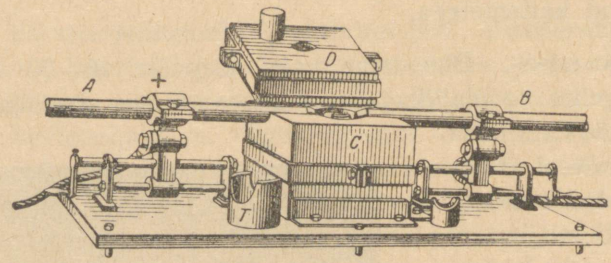


Joon. 52. Kaarleek.

vusega. Kaarleegi süütamisel on suur tähtsus katoodi temperatuuril: kaarleek tekib süte vahel ainult siis, kui katood on kuumutatud hõõgumiseni.

Et kuum katood on olulise tähtsusega kaarleegi tekkimisel, nähtub sellest, et kaarleeki võib tekitada söepulga ja mõne elektrit juhtiva vedeliku (näiteks soodalahuse) või metallplaadi vahel ainult siis, kui söepulk on katoodiks, vedelik või metallplaat aga anoodiks, mitte aga ümberpöördult, sest vedelikku või metallplaati pole võimalik kokkupuutumisel söepulgaga kuumutada hõõgumiseni.

Vastavad uurimised näitavad, et kaarleegi puhul väljuvad negatiivsest söest kõrge temperatuuri tõttu elektronid, mis liikudes sütevahelises ruumis, kaarleegis, muudavad õhu elektrit juhtivaks ja positiivsele söele langedes panevad selle heledalt hõõguma.

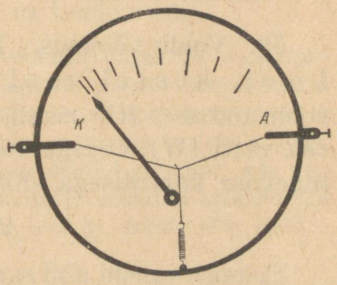


Joon. 53. Kaarleegiahi.

Kaarleegi temperatuur tõuseb kuni 4000° C, kõrgrõhu abil aga on võimalik kaarleegi temperatuuri tõsta kuni 6000° C. Kaarleek kui punktikujuline ja tugev valgusallikas leiab laialdast kasutamist kino- ja teistes projektsiooniaparaatides, kiirteheitjates jm. Varemini tarvitati kaarleeki ka tänavate valgustamiseks, kust teda aga on välja tõrjunud suured hõõglambid, sest kaarleek nõuab sagedat süte reguleerimist ja vahetamist — söed põlevad aja jooksul ära.

Elekter-kaarleegil põhineb e l e k t e r a h i, mida tarvitatakse raskesti sulavate ainete sulatamiseks. See koosneb kahest jämedast söepulgast, mis paigutatud tulekindlasse ainesse tehtud õnarusse. Söepulkade vahel tekitatakse tugev kaarleek, kusjuures voolutugevus tõstetakse 1000 amprini, sageli ka enam. Kaarleegi põhimõttel töötab ka elavhõbedaauru-lamp

ehk kunstlik kõrguspäike. See koosneb painutatud kvartstorust, kus tekitatakse kaarleek elavhõbedaaurus kahe elavhõbedapinna vahel. Elavhõbedaauru kaarleek kiirgab suurel määral silmale nähtamatuid ultravioletseid kiiri, mis omavad tugevat keemilist ja füsioloogilist toimet. Need kiired mõjuvad kahjulikult silmadele, seepärast tuleb selle kaarleegi tarvitamisel kaitseda silmi prillidega, mis ultravioletseid kiiri läbi ei lase. Teiselt poolt tarvitatakse kvartslampi mõnede haiguste ravimisel (näit. rahhiit).



Joon. 54. Kuumtraat-mõõduriista printsiip.

51. Termilised elektrimõõduriistad. Traadi pikenemist voolusoojuse toimel kasutatakse elektrimõõduriistade ehitamisel, milliseid tuntakse kuumtraadi ehk termiliste riistade nime all. Nende riistade tähtsamaks osaks on plaatina-hõbetraat, mis kinnitatud mõlemas otsas *A* ja *K*. Plaatina-hõbetraadi keskkoha külge on kinnitatud vedru abil pingule tõmmatud traat. Voolu läbimisel plaatina-hõbetraat pikeneb, kusjuures ta keskmine osa nihkub vedru mõjul kõrvale. See nihkumine kantakse üle osutile. Viimane liigub mõõduriista astmiku kohal. Kuumtraat-riista hälve on võrdeline voolutugevuse ruuduga, kuid ei olene voolu suunast. Ta puuduseks on, et ta võib kergesti läbi põleda ja et teda mõjustab ka ümbruse temperatuur.

Elektrienergia.

52. Voolu töö. Soojusõpetusest teame, et soojus on energia. Selle põhjal võime soojushulga järgi, mida elektrivool juhtmes tekitab, arvutada ka voolu töö. Nagu teame, on 1 kcal ekvivalentne 427 kgm-ga. Siin tarvitame tööühikuna 1 džauli. 1 kgm = 9,81 džauli, seega 1 kcal = 427 · 9,81 džauli = 4189 džauli ja 1 cal = 4,189 džauli. Joule'i seaduse järgi voolusoojus $Q = 0{,}24\ IUt$ cal, seega arvutatakse voolu töö A džaulides valemist:

$$A = 4{,}189 \cdot 0{,}24 \cdot IUt = IUt \text{ džauli,}$$

s. o. voolu töö võrdub voolutugevuse, pinge ja voolu kestuse korrutisega.

Sama tulemuse saime ka varemini 31. lk., kui arvutasime tööhulga, mida teeb elektrilaeng e, liikudes läbi juhtme, mille otste vaheline pinge on U. See töö A oli

$$A = eU.$$

Et $e = It$, siis $A = IUt$.

Nagu siit nähtub, on elektriühikud nii valitud, et võrdetegur töö valemis võrdub 1.

53. Voolu võimsus. Elektrivoolu võimsust mõõdab 1 sek. kestel voolu poolt tehtud tööhulk. Et voolu töö $A = IUt$ džauli, siis voolu võimsus $N = UI$ džauli/sek ehk vatti (W). Seega **voolu võimsus N mõõtub pinge ja voolutugevuse korrutisega** ehk lühidalt:

$$N = U \cdot I \text{ vatti.}$$

Eelmise valemi abil saame voolu võimsuse vattides, kui voolu tugevus on mõõdetud amprites ja pinge voltides, seega

1 vatt = 1 volt × 1 amper.

Suurema võimsusühikuna tarvitatakse kilovatti (kW):

1 kilovatt = 1000 vatti.

Tehnikas omab suurt tähtsust voolu võimsuse teadmine. Vooluallika, näiteks dünamo, võimsust mõõdab energiahulk, mis vooluallikas 1 sekundi kestel annab. Seega mõistetakse siin võimsuse all sama, mis aurumasina, plahvatusmootori ja turbiini puhul. Seevastu elektrivoolu tarvitava riista vooluvõimsuse all mõistetakse energiahulka, mis antud riist normaalsel töötamisel 1 sekundi kestel tarvitab, ja seda nimetatakse voolu tarviduseks ning märgitakse peaaegu alati riistale ühes pingega. Nii antakse tavaliselt hõõglambi, elektertriikraua, elekterkeetja voolutarvidus vattides, elektrimootorite ja raadio-saatejaama voolutarvidus kilovattides. Võimsusest ja tarvitatavast pingest on kerge arvutada voolutugevust: $I = \frac{N}{U}$.

Näide. Elekterkeetja voolutarvidus $N = 550$ vatti, tarvitatav pinge on 220 V. Seega voolutugevus elekterkeetjas $I = \frac{550}{220} = 2{,}5$ (A).

Voolu töö annab voolu võimsuse ja kestuse korrutis. Et tavaliselt voolu võimsus antakse vattides, siis on voolutöö ühikuna džauli asemel tarvitusele võetud vatt-sekund. Et see on praktiliseks kasutamiseks liiga väike, tarvitatakse tavaliselt elektrienergia ühikuna kilovatt-tundi (kWt):

$$1 \text{ kilovatt-tund} = 3{,}6 \cdot 10^6 \text{ vatt-sekundit.}$$

Vooluenergia mõõtmiseks varustatakse voolutarvitajad nn. voolulugejatega ehk voolumõõtjatega. Voolulugeja näitab otseselt äratarvitatud elektrivoolu energiat kilovatt-tundides. Tavalises elektrilugejas pöörleb ketas, mille kiirus on võrdeline voolu võimsusega, seega vattide arvuga. Pöörlev ketas paneb pöörlema numbritega varustatud silindrid, mis näitavadki äratarvitatud elektrienergiat. Voolulugeja näidatud elektrihulga järgi koostab elektrijaama ametnik vastava arve ja esitab selle elektrivoolu tarvitajale.

1. Elektrihõõglampi läbib vool tugevusega 0,5 A pinge juures 220 V. Kui suur on hõõglambi voolutarvidus vattides?

2. Elektertriikraud tarvitab 450 vatti. Kui suur on voolutugevus 220 V pinge juures?

3. Kui palju maksab 10 tunni kestel hõõglambi põlemine, mida läbib 220 V pinge juures 0,2 A vool, kusjuures 1 kWt maksab 16 rpn.?

4. Kui palju maksab 800-vatise elekterkeetja tarvitamine 15 minuti kestel, kui 1 kWt maksab 24 rpn.?

5. Palju soojust tekib 10 minuti kestel elekterpliidis, mille voolutarvidus on 1200 vatti?

6. Mitu 60-vatist hõõglampi võib lülida rööbiti 220 V pinge juures, kui kaitsmed põlevad läbi 6 A puhul?

7. Kas võib tarvitada 1800-vatist elekterpliiti, kui kaitsmed on 6-amprised? Pinge on 220 V.

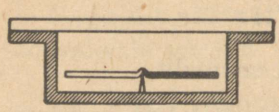
8. Kui suur on 25-vatise hõõglambi takistus? Hõõglamp on ette nähtud 1) 110 V jaoks, 2) 220 V jaoks.

9. Elekterkeetjal on märgitud voolutarvidus 600 vatti. 1 l vett soojenes 15 minuti kestel 14°-st kuni 100° C. Kui suur on siin soojuskadu ja mitu % voolult saadud energiast kulus vee soojendamiseks?

Termoelekter.

54. Termoelement. Kui joota kokku kaks erisugust metalli, näiteks raud- ja konstantaantraat, ja jootekohta soojendada või jahutada, siis tekib selles metallipaaris elektrivool, mida näitab sellega ühendatud galvanoskoop. Eriti tugevat voolu näitab vismutist ja antimonist koostatud

metallipaar. Sageli tarvitatakse seks otstarbeks vismutist ja antimonist moodustatud raami (55. joon.). Soojendades ühte jootekohta, näitab raami keskele paigutatud magnetnõel elektrivoolu. Sama jootekohta jahutades tekib eelmisega vastupidine elektrivool. Nii kokkujoodetud metallipaaris tekkinud elektrivoolu nimetatakse **termoelektriliseks** ehk **termovooluks** ja metallipaari ennast **termoelemendiks.** Seega tekib termoelemendis jootekoha soojendamisel või jahutamisel elektromotoorne jõud, mida nimetatakse termoelektriliseks ehk termojõuks. Termojõud ei muutu, kui juhtmesse lülida rida teisi metalltraate, nende ühenduskohad aga hoida ühel ja samal temperatuuril. Seega võib metallipaaris tekkinud termovoolu mõõta, ühendades termoelemendi vabad otsad galvanomeetriga. Termojõud oleneb metallipaari ainesest ja suureneb termoelemendi jootekoha ja lahtiste otste (galvanomeetri) temperatuurivahega. Teatud piiride on termojõud võrdeline selle temperatuurivahega.

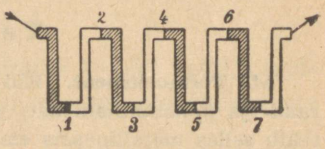


Joon. 55. Termoelement.

Üldiselt on termojõud väike, näiteks vismutist ja antimonist termopaari termojõud jootekohtade temperatuurivahe juures 1° C on 100 mikrovolti [1 mikrovolt (μV) = 1 miljondik volti], raud ja konstantaan annavad termojõu 53 μV.

55. Termopatarei. Et suuremat pinget ja voolu saada, seks lülitakse mitu termoelementi järjestikku. Sääraseid mitmest termoelemendist koosnevaid termopatareisid ühes tundliku peegelgalvanomeetriga tarvitatakse väga väikeste temperatuurivahede mõõtmiseks, näiteks soojusenergia jaotuse uurimisel spektris, ultrapunaste kiirte kindlaksmääramisel jne.

Termoelementi kasutatakse temperatuuride määramistel. Elavhõbe- ja piiritustermomeetrite kõrval tarvitatakse termoelementi sageli seepärast, et temperatuuri lugemine toimub vastavast kehast eemal, et termoelemendi soojusmahtuvus on võrreldes elavhõbe-termomeetriga väga väike ja et ta võimaldab mõõta ka kõrgeid temperatuure. Temperatuuride mõõtmiseks 0° kuni +500° C tarvitatakse peamiselt raud-konstantaanist termoelemente. Kõrgemate temperatuuride mõõtmiseks kasutatakse väärismetallidest termoelemente. Nii näiteks temperatuurini kuni 1600° tarvitatakse termoelemente plaatinast + plaatina-



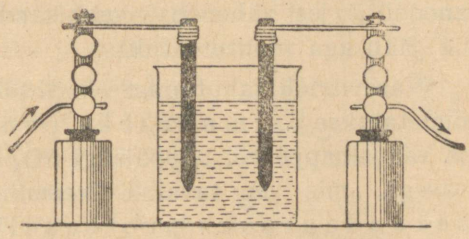
Joon. 56. Termopatarei.

roodiumist. Vooluallikatena termoelemente ega termopatareisid ei kasutata, sest nende pinge on liiga madal. Põhimõtteliselt omab aga termoelement suurt tähtsust, sest ta võimaldab otseselt muuta soojusenergiat elektrienergiaks. Nagu soojusmasinais, nii ka siin muutub ainult osa soojusenergiast teisekujuliseks energiaks, antud juhul elektrienergiaks.

Elektrolüüs.

56. Vasevitrioli elektrolüüs. Nagu nägime (§ 26), elektrivoolu metallides moodustavad metallis leiduvad vabad elektronid, mis liiguvad pinge toimel. Metalli molekulid ise jäävad seejuures paigale. Hoopis teissugune on lahuste elektrijuhtivus.

Katsed näitavad, et täiesti puhas vesi elektrit ei juhi. Lahustame vees mõnd hapet, leelist või soola, siis muutub saadud lahus elektrit juhtivaks.



Joon. 57. Vasevitrioli elektrolüüs.

Kallame klaasanumasse, näiteks keeduklaasi, vasevitriolilahust ja asetame sellesse kaks söepulka või plaatinapleki-riba. Ühendame söepulgad või plaatinaribad vooluallika poolustega ja juhime elektrivoolu läbi vasevitriolilahuse. Lühikese aja pärast paneme tähele, et üks söepulk, mis ühendatud vooluallika negatiivse poolusega, on kattunud metalse vasekihiga.

Sellest katsest näeme, et elektrivoolu toimel vasevitrioli ($CuSO_4$) lahus keemiliselt lahutub. Niisugust keemilist lahutamist nimetatakse **elektrolüüsiks,** lahutatavat vedelikku, antud juhul vasevitriolilahust, **elektrolüüdiks.** Söepulki või plaatinaribasid, millede kaudu juhitakse vool elektrolüüti, nimetatakse **elektroodideks,** ja nimelt negatiivse poolusega ühendatud elektroodi **katoodiks,** positiivse poolusega ühendatud elektroodi **anoodiks.** Vasevitriolilahuse elektrolüüsi seletame nii: Vase-

vitrioli ($CuSO_4$) lahustumisel vees osa $CuSO_4$ molekule lagunes osadeks Cu ja SO_4, mida sümboolselt võime üles kirjutada järgmiselt: $CuSO_4 \rightarrow Cu + SO_4$. Voolu mõjul liikus Cu katoodile ja sadestus seal, kuna SO_4 liikus anoodile, millel ta sadestus. Need lagunenud ained kogunevad alati elektroodidele, mitte kunagi mujale. Anoodile sadestunud jääk SO_4 pole püsiv, vaid ühineb veemolekuliga H_2O:

$$SO_4 + H_2O \rightarrow H_2SO_4 + O.$$

Sel viisil tekkinud väävelhappemolekul (H_2SO_4) jääb lahusesse, kuna hapnik (O) eraldub anoodil.

Kui tarvitada süsi- või plaatina-elektroodide asemel vaskanoodi, siis ühineb anoodil eraldunud SO_4 vasega Cu ja annab uuesti vasevitrioli $CuSO_4$, mis lahustub vees. Seega vase hulk anoodil järjest väheneb — vask kandub anoodilt katoodile, vedelik jääb aga muutumatuks.

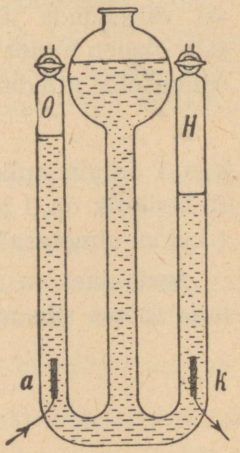
Vasevitrioli lahutamist elektrolüüsil ($CuSO_4 \rightarrow Cu + SO_4$) nimetatakse primaarseks protsessiks, kuna hapniku ja väävelhappe või happejäägi SO_4 keemilist ühinemist anoodi vasega, mis on tavaline keemiline protsess, nimetatakse sekundaarseks protsessiks. Sekundaarse protsessi vältimiseks elektroodidele sadestunud ainete ja elektroodide ainese vahel tarvitatakse elektrolüüsil plaatinast või söest elektroode.

Samaselt toimub teiste metallide, hõbeda, nikli, kulla jne. soolalahuste elektrolüüs. Kui seejuures tarvitada samast metallist anoodi, siis väheneb anoodi mass niipalju, kuipalju seda sadestub katoodile.

Üldiselt kehtib reegel: elektrolüüsil eralduvad katoodil metallid ja, nagu hiljemini näeme, hapete elektrolüüsi puhul ka vesinik, teised lagunenud molekulide osad eralduvad anoodile.

57. Vee elektrolüüs. Lisandame veele pisut väävelhapet, mille tõttu vesi muutub elektrit juhtivaks, ja juhime siis temast elektrivoolu läbi. Niipea kui voolu ühendame, algab elektroo-

didel elav gaasimullide tekkimine, mis sealt veepinnale tõusevad. Et paremini uurida tekkinud gaase, seks tarvitame riista, nagu seda 58. joon. kujutab. Riista mõlemasse äärmisse harusse on juhitud plaatinast elektroodid. Elektrivoolu läbimisel tekivad elektroodidel gaasimullikesed, mis mööda torusid üles tõusevad ja kogunevad suletud kraanide puhul torude ülemistesse otstesse, kusjuures vedeliku pind neis vastavalt langeb. Katse näitab, et torus, kus asetseb katood (*k*), tekib ruumala poolest kaks korda rohkem gaasi kui selles torus, kus asetseb anood (*a*). Neid gaase uurides leiame, et katoodil on tekkinud vesinik (H), anoodil hapnik (O). Esimene põleb nõrga sinise leegiga, teine paneb hõõguva söe heledalt leegitsema. Et vesi on hapniku ja vesiniku keemiline ühend ruumala vahekorras 1:2, siis võib sellest katsest järeldada, et voolu läbimisel lagunes vesi. Tõeliselt toimus siin lahutamine järgmiselt: Vees lahustunud väävelhappemolekulid lagunevad H_2 ja SO_4 osadeks, kusjuures H_2 eraldub katoodil, SO_4 anoodil. Viimane astub keemilisse ühendusse veemolekuliga H_2O, tekitades sekundaarse protsessi



Joon. 58. Vee elektrolüüsi riist.

$$SO_4 + H_2O \rightarrow H_2SO_4 + O.$$

Seega tekib uuesti väävelhappemolekul, kuna vabakssaanud hapnik koguneb anoodile, moodustades seal gaasimulle. Nii jääb väävelhappe hulk elektrolüüdis muutumatuks, väheneb aga vee hulk. Seepärast võimegi rääkida siin vee elektrolüüsist. Korjates vee elektrolüüsil elektroodidel eraldunud gaasid ühte anumasse, saame hapniku ja vesiniku mehhaanilise segu — p a u k g a a s i, mis süüdates suure jõuga plahvatab. Seepärast ettevaatust katsetel paukgaasiga!

58. Faraday I seadus. Faraday avastas, et elektrolüüsil voolu toimel elektroodidel sadestunud aine hulgad on võrdelised voolutugevusega ja voolu kestusega. Et voolutugevuse ja

voolukestuse korrutis (It) mõõdab elektrihulka, siis elektroodil sadestunud aine hulk oleneb ainult läbivoolanud elektrihulgast. Nii näiteks vool tugevusega 1 A lahutab 30 min. kestel niisama palju vaske kui vool tugevusega 5 A 6 minuti kestel. Seepärast võime eelmise korrapärasuse, mis tuntud Faraday I seaduse nime all, väljendada järgmiselt: **Elektrolüüsil eraldunud aine hulk (Q) oleneb ainult läbivoolanud elektrihulgast ja on sellega võrdeline** ehk lühidalt:

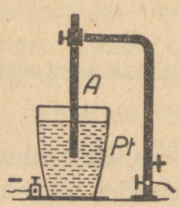
$$Q = AI\ t,$$

kus A on ainehulk, mis eraldub elektrolüüdist, kui läbivoolanud elektrihulk on 1 kulon. Ainehulka, mida eraldab elektrolüüsil 1 kulon, nimetatakse selle aine **elektrokeemiliseks ekvivalendiks.**

Igal ainel on erisuurune elektrokeemiline ekvivalent. Näitena toome siin mõnede ainete elektrokeemilised ekvivalendid:

Hõbe — 1,118 mg,
vask — 0,329 mg,
nikkel — 0,304 mg.

Et elektrolüüsil eraldatud ainehulka võib kaalumise teel suure täpsusega määrata, põhineb sellel nähtusel tehnilise voolutugevuse ühiku — 1 ampri definitsioon: **elektrivool tugevusega 1 amper on niisugune konstantne elektrivool, mis 1 sekundi kestel eraldab elektrolüüsil hõbedasoolast 1,1180 mg hõbedat.**



Joon. 59. Hõbekulonmeeter.

Faraday I seaduse alusel võib elektrolüüsi abil täpselt kaliibrida ampermeetrit. Elektrolüüsiaparaati, mida seks otstarbeks tarvitatakse, nimetatakse kulonmeetriks (varemal ajal ka voltameetriks).

Näide. Elektrivool eraldas 15 minuti kestel elektrolüüsil 1,2 g = 1200 mg hõbedat. Kui suur oli voolutugevus?

Et $Q = AIt$, siis

$$I = \frac{Q}{At}.$$

Antud juhul $Q = 1200$ mg, $A = 1{,}118$ mg, $t = 15$ minutit $=$ $= 15 \cdot 60 = 900$ sekundit. Seega

$$I = \frac{1200}{1{,}118 \cdot 900} = 1{,}19 \text{ amprit.}$$

59. Faraday II seadus. Edasi võrdles Faraday ainehulki, mida eraldab üks ja sama elektrihulk mitmesugustest elektrolüütidest. Seks lülis ta mitu elektrolüüsiaparaati järjestikku ja laskis neist sama elektrihulga läbi. Sääraste katsete tulemused võttis ta kokku seaduses, mida tuntakse nüüd Faraday II seaduse nime all.

Mitmesuguseid elektrolüüte läbides eraldab sama elektrihulk ainete hulgad, mis on võrdelised nende ainete keemiliste ekvivalentkaaludega. Keemiline ekvivalentkaal võrdub aine aatomkaaluga, jagatud ta valentsusega. Nii näiteks elektrihulk, mis lahutab 1 g vesinikku, lahutab $\frac{16}{2} = 8$ g kahevalentset hapnikku (aatomkaal $= 16$), $\frac{63{,}2}{2} = 31{,}6$ g kahevalentset vaske (Cu aatomkaal on 63,2), 108 g ühevalentset hõbedat (Ag aatomkaal on 108). Neid hulki lahutab sama elektrihulk sellele vaatamata, millise ühendi need ained moodustavad. Faraday II seadusest järgneb ka, et ainete elektrokeemilised ekvivalendid suhtuvad kui nende ekvivalentkaalud.

60. Elektrolüütiline dissotsiatsioon. Elektrivoolu läbimine kut vedelikkudest ja selles lahustunud aine lagunemist seletab moodne füüsika järgmiselt. R. Clausiuse ja S. Arrheniuse järgi osa lahustunud aine molekule lahustamise momendil jagunevad osadeks, aatomiteks või aatomirühmadeks. Seejuures mõlemad osakesed pole enam elektriliselt neutraalsed, vaid lagunemisel üks pool, kaotades osa oma elektronidest, omandas positiivse elektrilaengu, teine pool niisama suure negatiivse laengu. Neid laetud osakesi nimetatakse **ioonideks.** Molekulide jagunemist ioonideks nimetatakse **elektrolüütiliseks dissotsiatsiooniks.**

Seega on lahuses üheaegselt neutraalsete molekulidega ka ioonid. Nii näiteks vasevitrioli lahuses osa neutraalseist $CuSO_4$

molekulidest on dissotsieerunud ioonideks: positiivselt laetud Cu ja negatiivselt laetud SO_4 ioonideks. Asetades lahusesse elektroodid, hakkavad ioonid elektroodide-vahelise pinge mõjul liikuma, tekitades seega elektrolüüdis elektrivoolu. Positiivselt laetud ioone, mis liiguvad katoodile, nimetatakse **katioonideks,** negatiivselt laetud ioone, mis liiguvad anoodile, **anioonideks.** Ioonid annavad elektroodidele jõudes neile oma laengud ja muutuvad ise seejuures neutraalseiks aatomeiks või aatomite rühmaks. Elektroodidel eraldunud aine aatomid või aatomite rühmad võivad anda elektrolüüsil esinevaid sekundaarseid protsesse.

Niisiis on elektrivoolu kandjaiks elektrolüütides aineosakesed, vastandina elektrivoolule metallides, kus elektrivoolu moodustavad liikuvad elektronid. Ioonide liikumise kiirus on väga väike.

Tarvitades värvilist elektrolüüti, võib otseselt mõõta ioonide liikumise kiirust. Vastavad mõõtmised näitavad, et näiteks 10 min. kestel ioonid liiguvad edasi ainult mõne mm võrra.

Arusaadav, et elektrolüütide elektrijuhtivus oleneb ioonide kiirusest ja ioonide hulgast: mida kiiremini liiguvad ioonid ja mida rohkem neid on, seda paremini juhib vedelik elektrivoolu.

Ka tahketes kehades võib kuumutamisega molekule ioonideks lahutada. Kuumutades näiteks klaastoru Bunseni põleti leegil, võime tähele panna, et klaas kõrge temperatuuri juures hakkab elektrit juhtima. Ka siin on elektri edasikandjaiks neutraalsete molekulide elektrolüütilisel dissotsiatsioonil tekkinud ioonid.

Üldiselt toimub hapete, leeliste ja soolade elektrolüütiline dissotsiatsioon järgmiselt. Happe molekulid dissotsieeruvad positiivselt laetud vesinikuioonideks ja negatiivselt laetud happejäägi ioonideks, näiteks:

$$HCl \rightarrow H + Cl,$$
$$HNO_3 \rightarrow H + NO_3.$$

Leelised dissotsieeruvad pluss-laenguga metalli iooniks ja miinus-laenguga hüdroksüüli iooniks:

$$NaOH \rightarrow Na + OH.$$

Soolad dissotsieeruvad samuti positiivselt laetud metalli iooniks ja negatiivselt laetud happejäägi iooniks:

$$NaNO_3 \rightarrow Na + NO_3.$$

Ioonid erinevad mitmeti neutraalsetest molekulidest. Nii ei ühine ioonid keemiliselt veega. Näiteks Na ioon ei ühine veega, kuna neutraalne Na aatom ühineb. Lahuses toimub üheaegselt kaks vastassuunalist nähtust: ühelt poolt vastupidiselt laetud ioonid võivad uuesti ühineda neutraalseteks molekulideks, samal ajal võivad järjest uued molekulid laguneda ioonideks. On mõlemad protsessid tasakaalus, jääb ioonide koguarv muutumatuks. Üldiselt oleneb ioonide arv lahuse kontsentratsioonist, s. o. 1 cm^3-s lahustunud aine hulgast.

Mõõtes läbi elektrolüüdi voolanud elektrihulga ja seejuures ka elektroodile liikunud ioonide arvu (ainehulga), võime arvutada ühe iooni laengu. Vastavad uurimised näitavad, et ühevalentse iooni laeng on $4{,}80 \cdot 10^{-10}$ abs. laenguühikut, seega võrdne ühe elementaarlaenguga. Kahevalentse iooni laeng võrdub kahe elementaarlaenguga jne. Nii järgneb ka elektrolüüsinähtustest, et elektrilaengul on atomistlik ehitus.

1. Kui suur on voolu tugevus, mis 30 min. kestel eraldab 1,8 g hõbedat?

2. Kui palju niklit eraldab 2-amprine vool nikkelsulfaadist 1 tunni kestel?

3. Kui pika aja kestel tuleb 0,8-amprisel voolul läbi vasevitrioli lahuse voolata lasta, et katoodil, mille pindala 2 dm^2, sadestuks 0,4 mm paksune vasekiht?

4. Hõbetamisel sadestub vastavast soolalahusest 2,5 tunni kestel katoodil 50,4 g hõbedat. Määra voolutugevus ja elektrolüüsiaparaadi klemmide-vaheline pinge, kui lahuse takistus on 0,8 Ω.

5. Vool 2 A läbib väävelhappelahust 10 min. kestel. Leia elektroodidel kogunenud vesiniku ja hapniku ruumalad! Vesiniku erikaal on 0,00009 g/cm^3, hapniku oma 0,00143 g/cm^3.

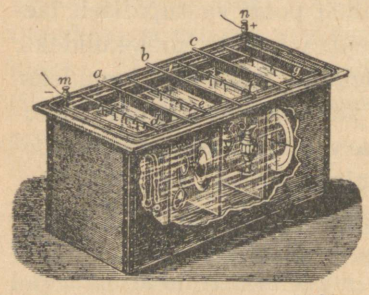
6. Mitu elektroni läheb läbi juhtme 3 sekundi kestel, kui voolutugevus on 1,5 A?

Elektrolüüsi rakendusi.

61. Galvanoplastika ja galvanosteegia. Elektrolüüsinähtused leiavad laialdast praktilist rakendamist kehade katmisel õhukese metallikihiga, nagu kuldamisel, hõbetamisel, nikelda-

misel, reljeefkujude kopeerimisel, samuti ka keemiliselt puhta metalli saamisel jne.

Esemetest reljeefkujude saamine (galvanoplastika) toimub järgmiselt. Antud esemest, näiteks rahast, tehakse vahast või kipsist negatiivkuju ja kaetakse õhukese grafiidikihiga, et kuju pinda elektrit juhtivaks muuta. See negatiiv ehk matriitskuju asetatakse elektrolüüsivanni, milles on näiteks vasevitriolilahus. Kuju on katoodiks, anoodiks on anoodplaat. Voolu läbi lastes eraldub lahusest vask ja koguneb katoodile, kattes eseme negatiivkuju vasekihiga. On kihi paksus küllaldane, siis katkestatakse vool. Negatiivile kogunenud vasekiht ongi antud eseme täpne positiivkuju.



Joon. 60. Hõbetamine.

Kui elektrolüüsi teel soovitakse näiteks esemeid hõbedaga katta (galvanosteegia), siis võetakse elektrolüüdiks hõbedasoola lahus, hõbetatav ese asetatakse sinna vedelikku ja ühendatakse vooluallika negatiivse poolusega. Voolu läbimisel kattub katoodiks olev ese õhukese hõbedakihiga. Samuti toimub ka nikeldamine, kuldamine jne.

62. **Elektrometallurgia.** Eriti suurt tähtsust omab elektrolüüs puhtate metallide saamisel, mis tehnikaala nimetatakse elektrometallurgiaks. Nii saadakse elektrolüüsi teel puhast vaske, alumiiniumi jt.

Vase valmistamine toimub järgmiselt: elektrolüüsivannides on elektrolüüdina vasesoola lahus ja anoodiks mittepuhas vask. Juhtides sellest voolu läbi, eraldub vask katoodil. Valides paraja voolutugevuse, saadakse ainult puhast vaske.

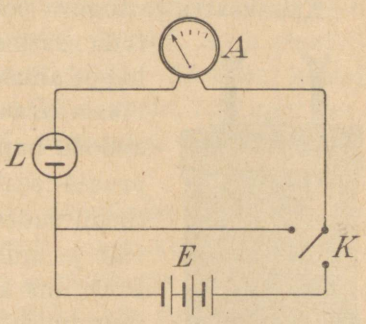
Alumiiniumi saamiseks tarvitatakse elektrolüüsimiseks mitte alumiiniumisoolade lahuseid, vaid kõrge temperatuuri juures sulaks muutunud alumiiniumioksüüdi, sest ka sulameis toimub elektrolüüs. Suurtesse tiiglitesse valatakse alumiiniumimaagist,

nn. boksiidist saadud alumiiniumioksüüd Al_2O_3. Tiigel on ühtlasi katoodiks. Anoodiks on söepulgad. Algul viiakse söepulgad kokkupuutumiseni tiiglis oleva massiga, tekitades seega elektrivoolu, siis eemaldatakse söed, kusjuures tekib süte ja tiiglis oleva massi vahel volta kaar, mis sulatab massi. Puhas alumiinium sadestub tiigli põhja, kust see aeg-ajalt välja juhitakse. Kogu maailma alumiiniumitoodang saadakse elektrolüütilisel teel.

Elektrolüütilisel teel saadakse ka metalne naatrium, kaalium, samuti seebikivi jne.

Polarisatsioonivool.

63. Polarisatsiooni põhinähtused. Koostame elektrolüüsiaparaadi L kahest väävelhappelahusesse pistetud süsielektroodist (joon. 61) ja lülime siis selle vooluahelasse järjestikku ampermeetriga A. Voolu läbimisel eralduvad elektroodidel gaasimullid. Voolu tugevust ja suunda näitab ampermeeter. Mõne aja pärast lülime vooluallika ahelast välja ja ühendame vabaks saanud traadiotsad otseselt. Nüüd näitab ampermeeter lühiajalist vastassuunalist voolu. Selle allikaks võib olla ainult elektrolüüt ühes elektroodidega, mis voolu läbimisega muutus ise vooluallikaks. Säärast primaarse vooluga vastassuunalist voolu nimetatakse **polarisatsioonivooluks** ja nähtust ennast **polarisatsiooniks.**



Joon. 61. Polarisatsioonivool.

Polarisatsioonivoolu tekkimise põhjuseks antud juhul on vesiniku ja hapniku kogunemine elektroodidel. Seda tõendab ka järgmine katse: Võtame süsielektroodide asemel plaatinast elektroodid, siis saame pärast primaarse voolu läbimist samasuguse polarisatsioonivoolu nagu vareminigi. Kui aga pärast primaarse voolu katkestamist võtta plaatinast elektroodid

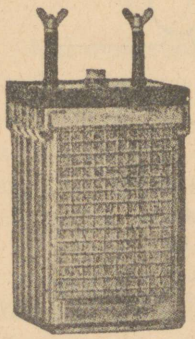
elektrolüüdist välja ja kõrvaldada neile kogunenud gaasid näiteks kuumutamisega, siis neid uuesti tagasi asetades elektrolüüti ei teki enam mingit polarisatsioonivoolu.

Seega on eraldunud gaasidega kaetud plaadid *polariseeritud* ja neid võib vaadelda kui galvaani elemendi isesugusest metallist elektroode; ka on nende vahel pinge, antud juhul umbes 2 volti. Polariseeritud plaatide ühendamisel tekib primaarse vooluga vastassuunaline vool, kusjuures gaasid aja jooksul ära kaovad ja polarisatsioonivool muutub nulliks.

Vastassuunaline polarisatsioonipinge tekib igal elektrolüüsil. Seepärast peab elektrolüüsil tarvitama vooluallikat, mis annab kõrgema pinge, kui seda on vastassuunaline polarisatsioonipinge.

64. Akumulaator. Akumulaatorite ehk akude abil on võimalik muuta elektrienergiat keemiliseks energiaks, et seda hiljemini jälle elektrienergiana tagasi saada. Aku tegevus põhineb polarisatsiooninähtusel.

Kauakestva ja tugeva polarisatsioonivoolu saame, kui tarvitada seatinast elektroode, mis asetatud väävelhappelahusesse. Juhtides säärasest elektrolüüsiaparaadist elektrivoolu läbi, sadestub anoodil hapnik, mis seatinaga ühinedes annab pruuni seatina-ülihapendi (PbO_2), kuna katoodil sadestunud vesinik mõjub redutseerivalt ja muudab seatina pinnal oleva oksüüdi PbO, mis kiht tekib seal juba õhuga kokkupuutumisel, poorseks seatinaks. Niiviisi polariseeritud elektroodid annavad tugeva polarisatsioonivoolu.



Joon. 62. Aku.

Seatina-akude elektroodid koosnevad eriliselt valmistatud seatinaplaatidest. Need plaadid on võretaolised, kusjuures võrede vahed on täidetud vastavate seatinaühenditega.

Vedelikuks on 20%-ne väävelhappelahus. Et aku voolu annaks, tuleb temast enne vool läbi lasta; seda nimetatakse **laadimiseks.** Laadimisel toimub järgmine keemiline protsess:

$$2PbSO_4 + 2H_2O \underset{\text{tühjenemine}}{\overset{\text{laadimine}}{\rightleftharpoons}} PbO_2 + Pb + 2H_2SO_4,$$

kusjuures seatina-ülihapend PbO_2 sadestub anoodile, mis annab talle iseloomuliku pruuni värvuse, kuna metalne seatina Pb sadestub hallika poorse seatinana katoodile. Nagu nähtub, suureneb laadimisel väävelhappe hulk, lahuse kontsentratsioon muutub seega suuremaks. Voolu võtmisel ehk tühjenemisel toimub vastupidine keemiline protsess. Et tühjenemisel väheneb väävelhappe hulk, siis võib väävelhappelahuse kontsentratsiooni järgi otsustada, kas aku on laetud või mitte. Et akudesse rohkem elektrienergiat koguda, seks tehakse plaadid suure pindalaga ja mitu negatiivset ning mitu positiivset plaati ühendatakse omavahel.

Aku mahtuvust mõõdetakse elektrihulgaga, mis ta võib anda tühjenemisel. Aku mahtuvus väljendatakse ampertundides. 1 amper-tund on elektrihulk, mis annab voolu 1 amper 1 tunni jooksul. Seega on 1 amper-tund 3600 ampersekundit (kulonit). Näiteks aku mahtuvusega 15 ampertundi võib anda $15 \cdot 3600 = 54\,000$ amper-sekundit elektrit. Seda elektrihulka võib ära kasutada mitmesugusel viisil: 15 tunni kestel võib saada 1 A voolu, 30 tunni kestel 0,5 A voolu, 7,5 tunni kestel 2 A voolu jne. Seatina-akud ehitatakse mahtuvusega 5—1000 amper-tundi.

Seatina-aku pinge on ligi 2 volti. Laadimise alguses on ta pinge 2,2 V, laadimise lõpuks tõuseb pinge kuni 2,7 voldini. Tühjenemisel langeb pinge 2 voldini ja püsib siis pikemat aega.

Seatina-aku sisetakistus on väga väike, alla 0,01 oomi, seega praktiliselt null. Seatina-akud võivad kergesti rikki minna. Seepärast tuleb neid tarvitamisel hoolikalt käidelda ja vältida kõike, mis akusid rikub. Nii ei tohi seatina-akusid laadimata olekus seista lasta, tühjendamisel ei tohi pinge langeda alla 1,8 V. Samuti pole lubatud laadimisel ega tühjendamisel voolutugevust tõsta üle lubatud piiri (iga tüübi kohta antakse see eraldi). Aeg-ajalt tuleb väävelhappe kontsentratsiooni kontrollida ja vajaduse korral lisandada destilleeritud vett või hapet.

Akusid kasutatakse laialt autode, vagunite valgustamisel, raadioaparaatide juures jm.

Palju vastupidavamad kui seatina-akud on nn. leelis-akud. Edisoni leelis-aku elektrolüüdiks on 20%-ne sööbe-

kaaliumi (KOH) lahus, elektroodiks nikkel- ja raudplaadid. Leelis-akud on vähe tundlikud tühjalt seismise ja ülekoormatuse vastu. Nende pinge on 1,3 volti.

Akude kasuteguriks nimetatakse suhet laadimisel tarvitatud ja tühjenemisel saadud elektrienergia vahel. Kui akut laeti t tunni kestel voolutugevusega I amprit, kusjuures pinge aku poolustel oli U, siis laadimiseks kulunud elektrienergia hulk on IUt vatt-tundi. Tühjenemisel andis sama aku t_1 tunni kestel I_1-amprise voolutugevuse pinge U_1 juures, seega tühjenemisel andis aku $I_1U_1t_1$ vatt-tundi. Aku kasutegur

$$\eta = \frac{I_1 U_1 t_1}{IUt}.$$

Seatina-aku kasutegur on 75—85%.

Leelis-akud annavad tühjenemisel väiksema protsendi elektrienergiat tagasi kui seatina-akud. Nende kasutegur on kuni 57%.

1. 15 leelis-akut on ühendatud patareiks järjestikku. Kui suur on patarei pinge?

2. Aku mahtuvus on 25 amper-tundi. Mitu kulonit on selles elektrit? Kui suure voolu võib anda säärane patarei 10 päeva kestel, kui ta töötab 8 tundi päevas?

3. Viiele elektrihõõglambile saadakse vool akude patareist, mille mahtuvus on 120 amper-tundi. Kui pikaks ajaks jätkub voolu sellest patareist, kui lambid on lülitud rööbiti ja igaüks neist tarvitab 0,4-amprist voolu?

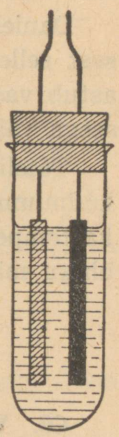
4. Auto-akude patarei koosneb kolmest järjestikku lülitud akust, millede igaühe sisetakistus on 0,1 Ω ja elektromotoorne jõud 2 V. Välisahela takistus on 11,7 Ω. Kui suur on voolutugevus ja kui suur on klemmide pinge suletud vooluahela puhul?

5. Aku elektromotoorne jõud on 2 V, sisetakistus 0,01 Ω, lubatud tühjendusvoolu tugevuse piiriks on 20 A. Mitu korda ületab lühiühenduse puhul voolutugevus lubatud voolutugevuse?

6. Aku laadimine toimus 5-amprise vooluga 10 tundi, kusjuures pinge on 2,20 V. Tühjendamisel 7 tunni 10 minuti kestel andis aku 6-amprise voolu 2-voldise pinge juures. Kui suur on aku kasutegur?

65. Galvaani elemendid. Galvaani elemendi sees voolab elekter voolu võtmisel negatiivselt pooluselt positiivsele poolusele, vastassuunaliselt välisahela vooluga, kusjuures tekib samasugune polarisatsioon nagu elektrolüüsiaparaadiski. Volta ele-

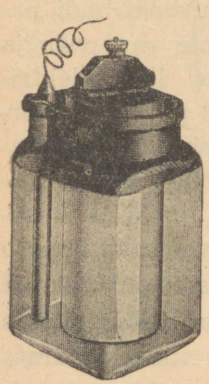
mendis, mis koosneb väävelhappe (H_2SO_4) lahusesse asetatud tsink- ja vaskelektroodidest, sadestub voolu võtmisel vaskelektroodidele vesinik. Vesiniku kogunemisega sinna tekib polarisatsioonipinge, mis vähendab elemendi pooluste vahel olevat pinget. Seega volta elemendi pinge ei ole püsiv. Ühendades volta elemendi poolused ampermeetri kaudu näeme, et voolu võtmisel voolutugevus langeb kiiresti.



Joon. 63. Elemendi polarisatsioon.

63. joonisel kujutatud volta elemendis võib jälgida polarisatsiooni tekkimist: ühendades elemendi poolused, tekivad vaskelektroodil vesinikumullikesed, kuna tsinkelektroodil tekib tsinksulfaat, mis vees lahustudes vajub oma suurema erikaalu tõttu põhja. See tuleb nähtavale allapoole suunduva voolamisena. Et galvaani elemendis takistada polarisatsiooni, seks tuleb positiivsel poolusel vabanenud vesinik keemiliselt siduda; siduvat ainet nimetatakse depolarisaatoriks.

Leclanché elemendi katoodiks on tsink, anoodiks süsi, mida ümbritseb mangaanülihapend (MnO_2). Vedelikuks on salmiaagi (NH_4Cl) lahus. Ta elektromotoorne jõud on umbes 1,4 V, kuid tarvitamisel see langeb. Depolarisaatoriks on siin mangaanülihapend, mis voolu võtmisel seob süsielektroodil vabanenud vesiniku. Leclanché elementi tarvitatakse palju nn. kuivelemendina, kus vedelik on saepuru või muu sellesarnase materjaliga muudetud paksuks pudruks. Tavaliselt on kuivelement pealt kaetud pigiga.



Joon. 64. Leclanché element.

Kuivelemente tarvitatakse vooluallikatena telefoni- ja telegraafiaparaatides, elektrikõlistajais jm. Laialdast tarvitamist leiab kuivelement ka elektritaskulambis. Selles on vooluallikaks nn. taskulambi patarei, mis koosneb 3 kuivelemendist.

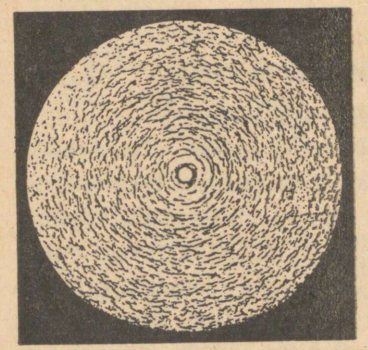
Danielli elemendi anoodiks on vask vasevitriollahuses ja katoodiks tsink nõrgas väävelhappelahuses. Mõlemad vedelikud on teineteisest eraldatud poorse vaheseinaga. Danielli elemendi elektromotoorne jõud on püsiv ja võrdub 1,1 voldiga.

Danielli element omab konstantset elektromotoorset jõudu, sest selles on polarisatsioon kõrvaldatud. Tekkinud vesinik astub vasevitrioli molekulis vaseaatomi asemele, moodustades seega väävelhappe.

Täielikult konstantset elektromotoorset jõudu omab Westoni kadmiumi normaalelement, mille elektromotoorne jõud ei olene ka temperatuurist. Seepärast tarvitatakse seda elementi pingeühiku määramisel.

Elektromagnetism.

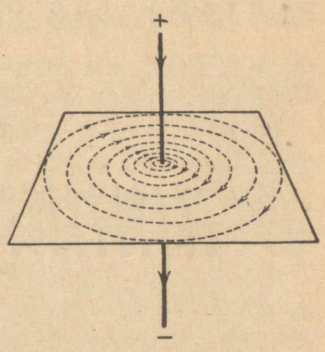
66. Voolu magnetiväli. Voolu mõjust magnetnõelasse (lk. 43) peame järeldama, et juhet, mida läbib elektrivool, ümbritseb magnetiväli. Sirge voolujuhtme ehk nn. sirgvoolu magnetivälja lähemaks selgitamiseks korraldame järgmise katse. Tõmbame risti läbi papitüki jämeda vasktraadi, papitükile puistame rauapuru ja traadist juhime läbi elektrivoolu. Kui nüüd papitükile nõrgalt koputada, siis asetub rauapuru traadi ümber kontsentriliste ringidena, millede keskpunktiks on voolujuhe. See katse näitab, et voolu ümbritseb magnetiväli, kusjuures magneti tungjooned asetuvad suletud ringidena ümber voolu. Neid magneti tungjooni võib jälgida ka tundliku magnetnõelaga. Magnetnõela abil võime määrata ka tungjoonte suunda. 65. joonis kujutab magneti tungjoonte käiku ümber voolu. Tungjoonte suunda võime määrata järg-



Joon. 65. Voolu magnetiväli.

mise reegli abil: vaadates voolu suunas lähevad tungjooned kellaosuti liikumise suunas (päripäeva).

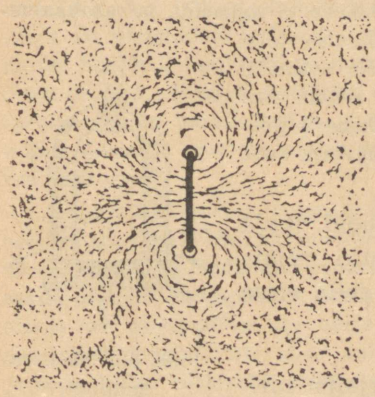
Samaks otstarbeks võib kasutada ka nn. Maxwelli kruvireeglit: kui kruvi keeramisel kruvi edasinihkumise suund ühtib voolu suunaga, siis kruvi pööramise suund näitab tungjoonte suunda (66. joon.).



Joon. 66. Tungjoonte suund.

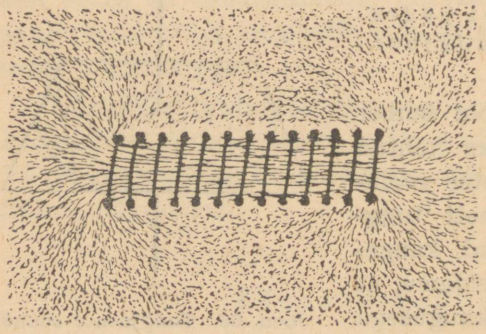
Uurides lähemalt voolu ümber rauapuru abil nähtavaks tehtud magnetivälja leiame, et otse voolujuhtme lähedal on magneti tungjooned selgemini nähtavad, kaugemal nõrgemini. Siit järeldame, et magnetiväli nõrgeneb kaugusega voolujuhtmest.

Võtame sirgvoolu asemel ringiks keeratud voolujuhtme ja tõmbame ka selle läbi papi nii, et üks pool sellest oleks ülalpool, teine allpool pappi. Puistame papile rauapuru ja ühendame voolu. Papile koputades teeme nähtavaks magneti tungjooned. Katse näitab, et magneti tungjooned väljuvad ringvoolu ühest otsast ja suubuvad teise otsa. Ringvool sarnaneb seega väga lühikese magnetiga.


Joon. 67. Ringvoolu magnetiväli.

67. Solenoidi magnetiväli. Eriti suurt tähtsust omab spiraali keeratud voolujuhe, mida nimetatakse ka **solenoidiks.** Selle magnetivälja lähemaks uurimiseks tõmbame traadi läbi papi, nagu kujutatud 68. joonisel. Puistame papile rauapuru, juhime voolu läbi solenoidi ja koputame papile: koputamisega tuleb solenoidi magnetiväli nähtavale.

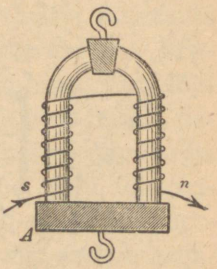
Nagu katse näitab, on magnetiväli solenoidi sees ühtlane. Arvestades voolu magnetivälja suunda eespool-toodud reegli järgi, võime määrata magneti tungjoonte suuna solenoidi, samuti ka ringvoolu puhul järgmiselt: Solenoidi põhjapoolus on selles otsas, kus voolusuund on vastupidine kellaosuti liikumise suunaga, ja lõunapoolus selles otsas, kus voolusuund ühtib kellaosuti liikumise suunaga. Seega sarnaneb solenoid magnetiliste omaduste poolest hariliku sirge magnetiga.



Joon. 68. Solenoidi magnetiväli.

Seda sarnasust võime näidata ka katse teel. Riputame solenoidi traatide otsa, millede kaudu võime juhtida voolu solenoidi, ja tasakaalustame ta nii, et ta võib pöörelda vertikaalse telje ümber. Kui lähendame ühele või teisele solenoidi poolusele magnetipooluse, siis järgneb sellele kas tõukumine või tõmbumine, vastavalt läheneva pooluse märgile. Samuti võime katse teel näidata kahe solenoidi mõju teineteisesse.

Samuti näeme katsest, et solenoid, mida läbib vool, tõmbab nagu magnetki rauda lähemale ja püüab koguni rauda enda sisse tõmmata.



Joon. 69. Elektromagnet.

68. Elektromagnet. Solenoidikujulist mitmekordset traatmähist nimetatakse pooliks. Asetame poolisse raudpulga: katse näitab, et raudpulk muutub tugevaks magnetiks, kui pooli mähisest juhime läbi elektrivoolu. Pooli raudsüdamikuga nimetatakse **elektromagnetiks.** Elektromagneti pooluste asukoha määrab voolu suund, nagu seda nägime solenoidi puhul.

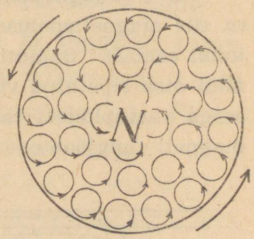
Raudpulk poolis (elektromagneti raudsüdamik) jääb niikauaks magnetiliseks, kuni kestab vool. Voolu katkestamisel kaotab raud peaaegu kõik oma magnetilised omadused.

Samal viisil magnetiseeritud teras aga säilitab oma magnetilised omadused, muutudes seega magnetiks. Harilikult toimubki kunstlikkude magnetite magnetiseerimine eespool-toodud viisil.

Elektromagnetid on märksa tugevamad kui niisama suured harilikud magnetid. Kuju poolest on elektromagnetid väga mitmesugused: sirged, hobuseraua-kujulised jne.

Elektromagnet leiab laialdast praktilist tarvitamist mitmesuguste riistade ja masinate ehitamisel, nagu elekterkõlistajas, telegraafis, telefonis, elektrimootoris jm.

Ampère'i molekulaarmagnetismi teooria. Ring, samuti ka solenoid, mida läbib elektrivool, sarnaneb magnetiga. See sarnasus viis Ampère'i mõttele seletada raua, terase, nikli jt. kehade omadusi elektrivooluga. Ampère'i järgi oletatakse, et kehades esinevad molekulide ümber elektrivoolud, mistõttu neid võib vaadelda kui solenoidi- või ringikujulisi magneteid. Neid elektrivoole molekulide ümber nimetatakse molekulaarvooludeks. Magnetiseerimata rauas ja terases on molekulaarvoolud korrapäratult suunatud, mistõttu nende väline magnetiline kogumõju on null. Magnetiseerimisel muutuvad molekulaarvoolud paralleelseiks ja seetõttu nende kogu välismõju pole enam null, vaid omab teatud suurust.



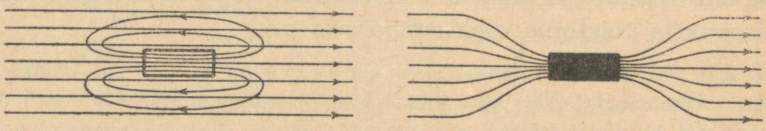
Joon. 70. Ampère'i voolud.

Ampère'i oletustest järgneb, et erilist magnetilist ainet pole olemas, mistõttu pole ka võimalik täiesti eraldada üht poolust teisest, s. o. saada näiteks põhjapoolust üksikult. Ampère'i oletus on kokkukõlas ka meie kujutelmaga aatomi ehitusest, mille järgi aatom koosneb positiivselt laetud tuumast ja selle ümber tiirlevaist elektronidest. Et ainult vähesed ained on tugevalt magnetilised, seletatakse sellega, et tavaliselt elektronide teede paigutus ümber tuuma pole sümmeetriline. Seetõttu nende väline magnetiline kogumõju on null. Erandi moodustavad raud, nikkel jt.

69. Paramagnetism. Mittemagnetilises rauas on molekulaarmagnetid suunatud kaootiliselt, korrapäratult, kusjuures molekulaarmagneti sihiks loeme telge, mille ümber toimuvad molekulaarvoolud. Tuues raua mag-

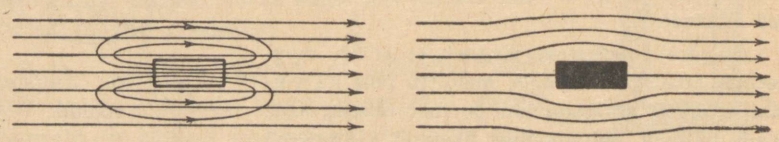
netivälja, paigutuvad molekulaarmagnetid ühesuunaliselt, mistõttu raud muutub magnetiks. Olemasolevaile magneti tungjoontele lisanduvad molekulaarmagnetite tungjooned. Rauas on nendel tungjoontel ühesugune suund, väljaspool on nad vastassuunalised. Nii seletub, miks raud tungjooni endasse tõmbab. Samuti seletub ka, miks raudsüdamikuga pool tugevama magneti moodustab kui raudsüdamikuta pool. Juurde tulevad molekulaarvoolude magneti tungjooned.

Samal põhjusel paigutub rauatükk magnetiväljas rööbiti magneti tungjoontega. Magnetipoolus tõmbab rauda lähemale seepärast, et välja tugevus pooluse läheduses on suurem ja raud püüab võimalikult palju tungjooni endasse tõmmata. Faraday nimetas kehi, mis käituvad magnetiväljas nagu raud, paramagnetilisteks.



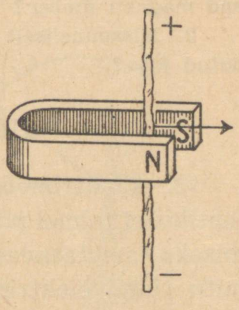
Joon. 71. Paramagnetiline keha.

70. Diamagnetism. Riputame vismut-kuuli niidi otsa ja lähendame ta siis magnetipoolusele: katse näitab, et magnetipoolus tõukab vismutkuuli eemale. Samuti näitab katse, et kahe vastunimelise pooluse vahele niidi otsa riputatud vismutist pulgake asetub risti magneti tungjoontega, seega vastupidiselt raudpulgale, mis asetub magnetiväljas alati rööbiti magneti tungjoontega. Sääraseid kehi, nagu vismut, nimetatakse diamagnetilisteks. Asetades diamagnetilise keha magnetivälja näeme, et diamagnetiline keha hajutab magneti tungjooni, s. o. diamagnetilises kehas on magneti tungjoonte tihedus väiksem kui see esineb ilma diamagnetilise kehata (72. joon.). Sellest järeldame, et molekulaarsete voolude suund diamagnetilistes kehades on säärane, et nende poolt tekitatud magneti tungjoonte suund kehas on vastupidine magnetivälja tungjoonte suunaga. Diamagnetilised on peale vismuti veel antimon, tsink jne.

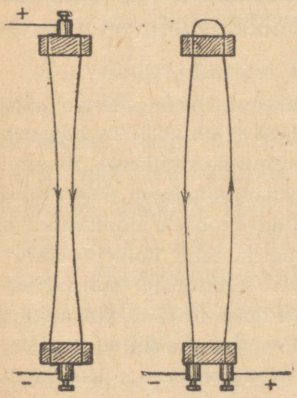


Joon. 72. Diamagnetiline keha magnetipooluste vahel.

71. Magnetivälja mõju voolujuhtmesse. Et vool mõjub magnetnõelasse, siis vastupidi magnet mõjub voolusse. See vastastikune mõju oleneb sellest, et mõlemat ümbritseb magnetiväli. Et selgitada, kuidas oleneb magneti mõju voolusse, seks tarvitame painduvat elektrijuhet (lametti). Riputame niisuguse painduva voolujuhtme hobuseraua-kujulise magneti pooluste vahele (73. joon.), mille magneti tungjooned on, nagu teada, horisontaalsed. Katse näitab, et voolu läbimisel voolujuhe püüab liikuda r i s t i magneti tungjoontega kas magnetipooluste vahelt välja või ümberpöördult. Voolusuuna muutmisel muutub ka voolujuhtme liikumise suund.



Joon. 73. Voolujuhe magnetiväljas.



Joon. 74. Samasuunaliste ja vastassuunaliste voolude magnetiväljad.

Arvestades voolu ja magneti tungjoonte suunda, võime väljendada voolu liikumise suuna järgmise, nn. Flemmingi vasema käe reegli kujul: k u i h o i d a v a s a k k ä s i v o o l u j u h t m e s i h i s n i i, e t m a g n e t i t u n g j o o n e d l a n g e v a d p e o p e s s a j a s õ r m e d o n a s e t a t u d v o o l u s u u n a s, s i i s n ä i t a b p ö i a l v o o l u j u h t m e l i i k u m i s e s u u n d a.

72. Voolude vastastikune mõju. Riputades kaks painduvat voolujuhet kõrvuti, nagu kujutatud 74. joonisel, võime leida, kuidas mõjuvad paralleelsed voolud üksteisesse. Katsed näitavad, et paralleelsed ühesuunalised voolud tõmbavad üksteist lähemale, kuna paralleelsed vastassuunalised voolud tõukavad üksteist eemale.

Pole sirgvoolud paralleelsed, vaid moodustavad omavahel nurga, siis püüavad nad asetuda üksteise suhtes paralleelselt, nii et nende suunad ühtiksid.

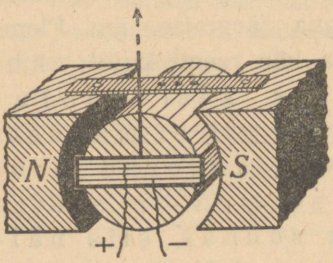
1. Kuidas seletada, miks painduv juhe, mida läbib elektrivool, kerib end magneti ümber?

2. Missuunaliselt kerib end magneti ümber eelmises küsimuses tähendatud juhe?

Elektrimõõduriistad.

73. Elektrimõõduriistade tüübid. Magnetite ja voolude vastastikusel toimel põhinevad elektrivoolu tugevuse ja pinge mõõtmiseks tarvitatavad riistad — **elektrimõõduriistad.** On olemas mitu tüüpi elektrimõõduriistu. Kahte tüüpi vaatlesime varemini — mõõduriistad liikuva magnetiga ja kuumtraat-mõõduriistad. Mõlemad nimetatud tüübid on vähetundlikud, mistõttu neid ei saa tarvitada nõrkade voolude mõõtmisel; ka omavad nad rea teisi puudusi. Parimaid elektrimõõduriistu on pöördpooliga mõõduriistad.

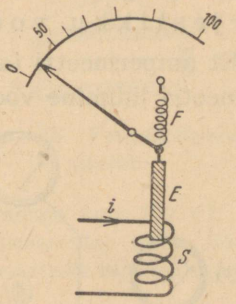
Pöördpooliga ehk **Deprez' süsteemi** mõõduriista ehitus põhineb nähtusel, et magnetiväli avaldab mõju juhtmesse, mida läbib vool. Ta koosneb tugevast hobuseraua-kujulisest magnetist, mille pooluste vahele on paigutatud kergele ristküliku-taolisele alumiiniumist raamile keritud ja telje ümber pöörlev pool. Pool on kinnitatud spiraalvedrude külge, mis hoiavad pooli tasakaalus nii, et pooli keerdude tasapind on rööbiti magneti tungjoontega. Kui pooli läbib elektrivool, siis, nagu eespool nägime, püüab voolujuhe liikuda risti magneti tungjoontega ning paneb seega pooli pöörduma. See pööre on seda suurem, mida suurem on voolutugevus. Ühes pooliga liigub selle külge kinnitatud osuti vastava kaarekujulise astmiku kohal. Pooli pöörde suund oleneb seejuures voolu suunast. Voolu suunda muutes toimub ka pööre vastassuunas. Voolu katkestades tuleb pool vedrude elastsuse tõttu endisesse tasakaaluasendisse tagasi. Pöörleva pooli sisse on paigutatud pehmest rauast silinder, mis ei võta osa pooli liikumisest. Selle silindri ülesandeks on koondada võimalikult palju



Joon. 75. Pöördpooliga mõõduriist.

magneti tungjooni poolisse. Pöördpooliga mõõduriistad on tundlikumaid ja parimaid mõõduriistu, kuid hinnalt ka kalleimaid.

Tehnikas tarvitatakse juhtumeil, kus pole nõutav suur täpsus, nn. p e h m e r a u d - m õ õ d u r i i s t u. Pehmeraud-mõõduriista printsiipi kujutab 76. joonis. *S* on pool, mida läbib mõõdetav vool, selle pooli ühe otsa ees asetseb vedru abil kinnitatud raudpulk *E*. Raudpulga ja vedru külge on kinnitatud mõõduriista osuti, mis võib pöörelda telje ümber. Kui juhtida läbi pooli vool, tõmbab pool raudpulga enda sisse (vt. lk. 86). See liikumine kandub üle ka mõõduriista osutile. Seejuures tõmbab pool raudpulka seda tugevamini, mida suurem on pooli läbiva voolu tugevus; seda rohkem pikeneb vedru ning seda suurem on ka mõõduriista osuti hälve. Et pool tõmbab pehmest rauast pulka enda sisse sellele vaatamata, milline on voolu suund, siis kõlbab see riist ka vahelduvvoolu jaoks.



Joon. 76. Pehmeraud-mõõduriist.

74. Ampermeeter ja voltmeeter. Galvanoskoop on üldiselt tundlik ka nõrkade voolude suhtes ja omab võrdlemisi suurt takistust, seepärast pole võimalik galvanoskoopi otseselt tarvitada tugevate voolude mõõtmistel. Et galvanoskoopi ehitada riistaks, millega võib mõõta ka suuri voolutugevusi, seks lülitakse galvanomeetriga rööbiti väikese takistusega traat, nn. **šunt.** Haruvoolu seaduse järgi on voolutugevused harudes pöördvõrdelised nende takistustega. Valides näiteks šundi takistuse 100 korda väiksema galvanomeetri takistusest, läbib galvanomeetrit ka 100 korda väiksema tugevusega vool.

Olgu galvanoskoobi takistus näiteks 20 Ω, kusjuures ta annab täishälbe, kui teda läbib vool tugevusega 5 mA.

Tahame sellest galvanomeetrist ehitada ampermeetrit, mis annaks täishälbe 10-amprise voolutugevuse puhul, siis peame lülima temaga rööbiti säärase šundi, millest läbi läheks 10 A — 5 mA = 9995 milliamprit. Eeltoodu põhjal leiame šundi takistuse järgmiselt:

$$\frac{r}{20} = \frac{10}{9995}\text{, millest}$$

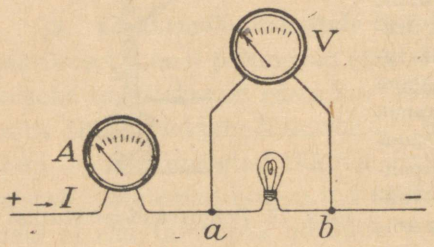
$$r = 0{,}02\ \Omega.$$

Seejuures kogu ampermeetri takistus on pisut vähem kui 0,02 Ω.

Nii võime alati leida soovitava mõõtepiirkonna jaoks vajaliku šundi takistuse.

Ampermeeter lülitakse vooluahelasse järjestikku voolu tarvitava riistaga.

Et ampermeetri takistus on praktiliselt null, siis ainult ampermeetri lülimine vooluallika pooluste vahele põhjustaks lühiühenduse ja riista hävimise. Seepärast tuleb ampermeetri tarvitamisel sellele tähelepanu pöörata.



Joon. 77. Volt- ja ampermeetri lülitus.

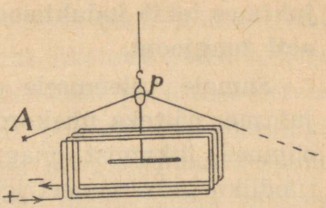
Voltmeeter. Iga galvanomeetrit võib ümber ehitada voltmeetriks. Seks lülitakse riistaga järjestikku suur eeltakistus. On näiteks riista takistus ühes eeltakistusega 2000 Ω, siis 2-voldise pinge puhul on voolutugevus 0,001 A, 4-voldise pinge puhul 0,002 A, 10-voldise pinge puhul 0,01 A jne. Seega riista hälve on võrdeline pingega. Voltmeetri takistus valitakse nii suur, et muu osa vooluahela takistusest on väga väike võrreldes voltmeetri eeltakistusega.

Nagu šuntki, ehitatakse eeltakistus riista sisse. Pinge mõõtmisel lülitakse voltmeeter voolu tarvitava riistaga rööbiti.

Väga sageli tarvitatakse tehnikas, eriti aga koolides katsete korraldamistel universaalmõõduriista. See koosneb tundlikust galvanomeetrist, mille alusele on monteeritud rida šunte ja eeltakistusi. Vastava šundi või eeltakistuse lülimisega muutub riist amper- või voltmeetriks.

75. Peegelgalvanomeeter. Osutiga galvanomeeter pole küllalt tundlik väga nõrkade voolude mõõtmiseks. Palju tundlikum on peegelgalvanomeeter. Peegelgalvanomeetri liikuv osa ripub siid- või peenikese metallniidi otsas. Selle niidi külge on kinnitatud väike vertikaalne peegel, mis pöörleb ühes liikuva osaga. Kui asetada peegli ette mingi valgusallikas, siis peeglist peegeldunud kiired annavad eemal seinal või ekraanil valguslaigu. See valguslaik kaldub kõrvale juba väga nõrkade voolude

puhul, sest liikuva osa niidi otsa riputamisega on kõrvaldatud hõõrdumine. Nagu peegeldumisseadustest kergesti arvutada võime, pöörduvad peegli pöördumisel nurga α võrra peegeldunud kiired nurga 2α võrra, mis omakorda suurendab peegelgalvanomeetri tundlikkust.



Joon. 78. Peegelgalvanomeeter.

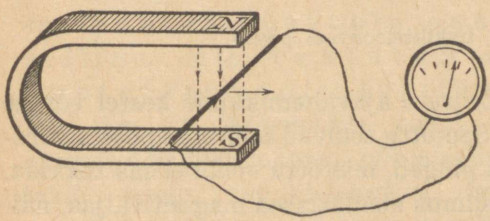
1. Galvanoskoobi takistus on 10 Ω. Täishälbe annab ta, kui voolutugevus on 2 mA. Kui suure šundiga tuleb varustada galvanoskoop, et ta annaks täishälbe 50-amprise voolu puhul?

2. Kui suur eeltakistus tuleb valida, et eelmises ülesandes tähendatud mõõduriista võiks tarvitada voltmeetrina mõõtepiirkonnaga kuni 150 V?

3. Kui suur eeltakistus tuleb valida voltmeetrile, mille takistus 500 Ω ja mõõtepiirkond 5 V, et ta muutuks voltmeetriks mõõtepiirkonnaga 150 V?

Elektromagnetiline induktsioon.

76. Elektromagnetilise induktsiooni põhinähtused. Ühendame sirge juhtme (79. joon.) tundliku galvanomeetriga ja liigutame siis seda juhet magnetipooluste vahel nii, et traat lõikaks magneti tungjooni. Seejuures paneme tähele, et galvanomeeter näitab elektrivoolu, mis kestab niikaua, kuni juhe liigub.

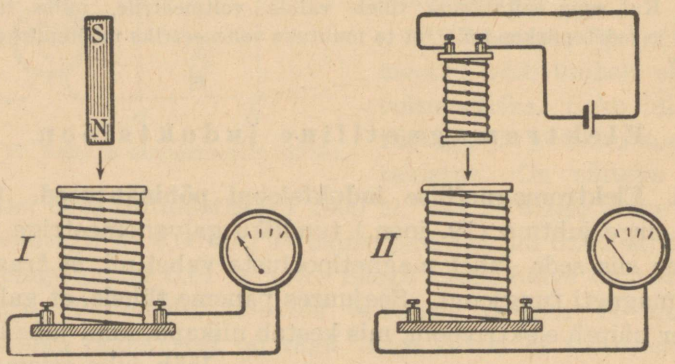


Joon. 79. Induktsioonvool.

Jääb juhe seisma, siis galvanomeeter voolu ei näita. Mida kiiremini traati liigutame, seda tugevamat voolu näitab galvanomeeter. Liigub traat vastassuunas, siis näitab galvanomeeter ka vastassuunalist voolu. Samuti näitab katse, et vool on seda tugevam, mida rohkem magneti tungjooni traat liikumisel lõikab. Kui traadiotsad pole ühendatud, siis tekib traadiotstes pinge. Kirjeldatud nähtust nimetatakse **elektromagnetiliseks induktsiooniks,** tekkinud voolu indutseeritud ehk **induktsioonvooluks** ja induktsioonvoolu põhjustavat pinget **indutseeritud pingeks.**

Liigutades aga juhet magnetiväljas juhtme enda või magneti tungjoonte sihis galvanomeeter voolu ei näita. Siit järgneb, et **juhtmes tekib induktsioonvool ainult siis, kui juhe lõikab magneti tungjooni.**

Samale tulemusele jõuame, kui vaatleme mõne suletud juhtme, näiteks ühekordse ristküliku või ringikujulise juhtme silmuse liikumist magnetiväljas. Ühendades juhtmesilmuse tundliku galvanomeetriga paneme tähele, et juhul, kui silmus liigub risti magneti tungjoontega ühtlases magnetiväljas, galvanomeeter voolu ei näita. Sel juhul võime vaadelda silmust koosnevana kahest ühesugusest osast, mis liikudes ühtlases

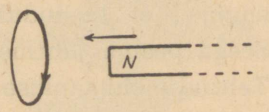


Joon. 80. Induktsioonvool poolis.

magnetiväljas lõikavad võrdsete ajavahemikkude kestel võrdse arvu magneti tungjooni. Seetõttu tekivad mõlemas pooles võrdsed, kuid vastassuunalised pinged, mistõttu voolu ei saa tekkida. Liigub aga sama juhtme silmus ebaühtlases magnetiväljas, näiteks niisuguses, kus magneti tungjoonte arv liikumise suunas suureneb, näitab galvanomeeter silmuse liikumise ajal voolu, sest siis lõikab kumbki silmuse pool isesuguse hulga magneti tungjooni. Seega silmuses tekib induktsioonvool, kui silmust läbivate magneti tungjoonte arv muutub. Lähem uurimine näitab, et indutseeritud pinge on võrdeline ajaühiku kestel läbilõigatud tungjoonte arvuga.

77. Induktsioonvool poolis. Ühekordse voolusilmuse liikumisel magnetiväljas tekkinud induktsioonvool on üldiselt nõrk. Induktsioonvoolu suurendamiseks tarvitame pooli, mis koosneb suurest hulgast õõnsale rullile kihtidena üksteise peale keritud isoleeritud vasktraadi keerdudest. Ühendame pooli traadiotsad galvanomeetriga ja asetame nüüd poolisse magnetpulga (80. joon.). Poolis tekib magnetpulga liikumisel induktsioonvool, sest pooli traadikeerud lõikavad magnetpulga pooluse vihutaoliselt hajuvaid magneti tungjooni. Poolis tekkinud induktsioonipinge on seejuures märksa suurem kui ühekordse voolusilmuse puhul sama magnetivälja lõikamisel. Tõepoolest, sel juhul tekib indutseeritud pinge pooli igas keerus ja poolis tekkinud kogupinge on võrdne kõikides keerdudes indutseeritud pingete summaga. Võttes aga magnetpulga poolist välja, näitab galvanomeeter vastassuunalist voolu. Kui asetame poolisse või võtame poolist välja magnetpulga teise pooluse, siis tekivad poolis magnetpulga liikumise ajal induktsioonvoolud, millede suunad on vastupidised esimesel juhul tekkinud induktsioonvoolu suundadega.

Lenzi reegel. Induktsioonvoolu suunda võib määrata mitme reegli abil, milledest lihtsaim on **Lenzi reegel.** Selle järgi on induktsioonvoolu suund selline, mis takistab induktsioonvoolu tekitavat liikumist. Lähendame poolile või silmusele näiteks magneti põhjapooluse, tekib poolis induktsioonvool, mille suund on niisugune, et magneti põhjapooluse poole pööratud pooliotsas on põhjapoolust tõukav poolus, seega samuti põhjapoolus. Induktsioonvoolu suund on antud juhul seega vastupidine kellaosuti liikumise suunaga. Ümberpöördult, kui eemaldame silmusest magneti põhjapooluse, on induktsioonvoolu suund samasuunaline kellaosuti liikumise suunaga. Magnetipoolusele lähemas pooliotsas on siis lõunapoolus, mis takistab magnetipooluse eemaldamist.



Joon. 81. Lenzi reegel.

Magnetpulga asemel võime tarvitada ka teist pooli, millest juhime läbi elektrivoolu. Katse näitab, et kui viimase pooli lähendame või eemaldame esimesest poolist, tekib selles induktsioonvool, mille suunda võib määrata Lenzi reegli järgi. Nimetame indutseerivat voolu *primaarseks vooluks* ja vastavat pooli *primaarseks pooliks*, indutseeritud voolu *sekundaarseks vooluks* ja vastavat pooli ka *sekundaarseks pooliks*. Induktsioonvool tekib sekundaarses poolis ka siis, kui seda pöörame primaarse pooli sees. Katse näitab ka, et seejuures pole tähtis, kumb pool paigal seisab ja kumb liigub. Tähtis on ainult nende suhteline liikumine, nagu seda võib näha ka magnetpulga ja pooli puhul. Asetame nüüd ühe pooli teisesse, näiteks sekundaarse pooli primaarsesse pooli, siis näitab katse, et sekundaarses poolis tekib induktsioonvool, kui ühendada või katkestada primaarne vool. Samuti tekib sekundaarses poolis induktsioonvool, kui suurendame või nõrgendame primaarset voolu. Kõik need katsed näitavad, et *poolis tekib alati induktsioonvool, kui teda läbivate magneti tungjoonte arv muutub*. Induktsioonvoolu tekitab seega poolis oleva magnetivälja tugevuse muutus.

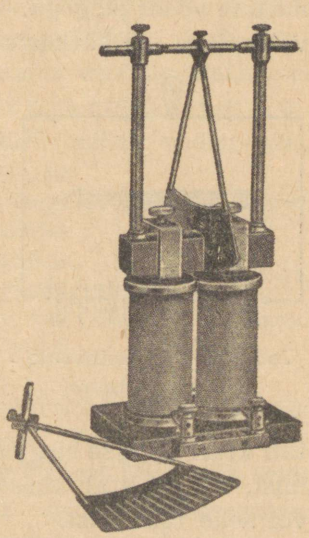
Juhtme liigutamisel magnetiväljas teeme tööd, sest — nagu nägime Lenzi reegli järgi — induktsioonvoolu suund on niisugune, et ta induktsioonvoolu tekitavat liikumist takistab. Seega peame juhtme liigutamisel ületama selle takistustungi. Tehtud mehhaanilise töö kulul tekib elektrienergia induktsioonvoolu kujul.

78. Pöörisvoolud. Induktsioonvool ei teki ainult juhtmes, vaid ka massiivseis metallkehades. Võtame massiivse vaskketta ja liigutame seda tugeva elektromagneti pooluste vahel; vaskketta liikumisel tekivad temas induktsioonvoolud. Lenzi reegli järgi induktsioonvoolude suund on säärane, et need takistavad induktsioonvoole tekitavat liikumist, seetõttu tunnemegi, et vaskketta liikumine magnetipooluste vahel on tugevasti takistatud. Massiivseis metallkehades tekkinud induktsioonvoolu

nende liikumisel magnetiväljas nimetatakse pööris- ehk Foucault' vooludeks.

Eriti hästi võib näha pöörisvoolude takistavat mõju metallimasside liikumisel magnetiväljas Waltenhofeni pendli juures. Kahe tugeva elektromagneti pooluste vahel ripub massiivsest vaskplaadist koosnev pendlikeha, mis võib liikuda ainult pooluste-vahelist ruumi läbivas tasapinnas (82. joon.). Kui paneme pendli võnkuma, kusjuures me elektromagnetist voolu läbi ei lase, vaibub pendli võnkumine aeglaselt. Kui aga pendli võnkumise ajal elektromagnetist vool läbi lasta, jääb pendel kohe seisma, niipea kui ta elektromagneti pooluste vahele jõuab. Käega pendlit liigutades tundub, nagu liiguks ta püdelas vedelikus, näiteks siirupis. Kui aga vaskplaati lõigata pilud, nagu 82. joonisel kujutatud, pole säärase pendli liikumine magnetiväljas takistatud, sest siis pöörisvoolusid tekkida ei saa.

Pöörisvoolude toimel tekib kehades soojust, mida võib näidata lihtsa katse varal. Kui paksuseinaline vasksilinder täita veega ja siis tugeva elektromagneti pooluste vahel pöörlema panna, hakkab vesi silindris vähe aja pärast keema.



Joon. 82. Waltenhofeni pendel.

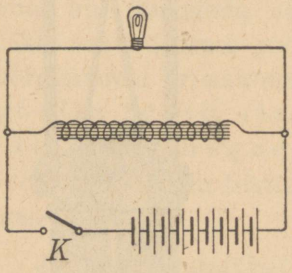
Pöörisvoolude summutavat toimet võnkuvaisse kehadesse kasutatakse praktikas elektrimõõduriistade, elektrilugejate jt. juures. Summutavaks osaks on neis liikuva süsteemiga kindlalt seotud, tavaliselt alumiiniumist plaat, mis liigub tugeva magneti pooluste vahel. Pöörisvoolud tekivad ka dünamo, elektrimootori ja transformaatori raudsüdamikkudes. Nende vältimiseks valmistatakse raudsüdamikud mitte massiivsest rauast, vaid raudtraatidest ja õhukestest raudplekkidest.

Induktsioonvoolu avastas Faraday aastal 1831. Faraday lähtus seejuures oletusest, et kui elektrivool võib tekitada magnetismi (elektromagnet oli juba varemini tuntud), siis peab esinema ka vastupidine nähtus: magneti abil võib tekitada elektrivoolu.

1. Asetame kaks sirget juhet teineteisega kõrvuti (paralleelselt). Ühest neist juhime voolu läbi.

Millise suunaga induktsioonvool tekib teises juhtmes, kui esimest juhet läbiv vool 1) ühendada või 2) katkestada?

79. Eneseinduktsioon. Solenoidi läbiv elektrivool tekitab solenoidis magneti tungjooni, kusjuures solenoidi magneti tungjoonte arv on seda suurem, mida suurem on voolutugevus. Eelmisest teame ka, et iga kord tekib solenoidis induktsioonvool, kui seda läbivate magneti tungjoonte arv muutub. Siit järgneb, et solenoidi läbiva voolu ühendamisel või voolutugevuse suurendamisel tekib solenoidis indutseeritud pinge. Lenzi reegli järgi on see indutseeritud pinge vastassuunaline primaarse voolu pingega. Kui aga solenoidi läbiva voolu tugevust vähendada või katkestada, siis seetõttu, et nüüd magneti tungjoonte arv väheneb, tekib solenoidis indutseeritud pinge, mis on samasuunaline primaarse voolu pingega. Nähtust, et primaarne vool tekitab juhtmes endas induktsioonvoolu, nimetatakse **eneseinduktsiooniks** ja tekkinud indutseeritud pinget **eneseinduktsiooni pingeks.**



Joon. 83. Induktiivsuse demonstreerimine.

Nagu siit nähtub, võime juhtme eneseinduktsiooni võrrelda keha inertsusega. Nagu keha inerts takistab keha ühtlase sirgjoonelise liikumise või paigaloleku muutumist, nii takistab eneseinduktsioon voolu tugevuse muutumist või selle tekkimist.

Pooli või mõne teise juhtme eneseinduktsiooni suurust nimetatakse pooli **induktiivsuseks** ehk lihtsalt **eneseinduktsiooniks.**

Induktiivsuse tehniliseks ühikuks on 1 h e n r i (H). Juhtme induktiivsus on 1 henri, kui voolu muutudes 1 A võrra 1 sek. tekib eneseinduktsiooni pinge 1 V. Et henri on väga suur ühik, siis sageli tarvitatakse induktiivsuse ühikuna temast 1000 korda väiksemat m i l l i h e n r i t: 1 millihenri (mH) = 0,001 henrit.

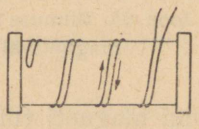
Pooli induktiivsus suureneb pooli keerdude arvuga, samuti

suureneb ta, kui asetada pooli raudsüdamik, sest sellega suureneb muutuva magnetivälja tugevus. Väikesimat induktiivsust omab sirge vool.

Eneseinduktsiooni tõttu tekkinud elektrivoolu nimetatakse ekstravooluks.

Lülime vooluahelasse suure induktiivsusega pooli, s. o. suure keerdude arvuga ja raudsüdamikuga pooli. Voolu ühendamisel Lenzi reegli järgi ekstravoolu pinge, seega ka voolu suund on vastupidine primaarse vooluga, mistõttu voolu tugevus kasvab aeglaselt. Voolu katkestamisel aga mõlemad pinged liituvad, mille tulemuseks on nn. katkestamissäde. Katkestamissädet võib igal pool tähele panna, kus vooluahelasse on lülitud suur induktiivsus, näiteks elektromagnetis, elektrikõlistajas, elektrimootoris jm. Katkestamissäde rikub kontakte (tekib volta kaar), mispärast suurte voolude katkestamine toimub eriliste kangkatkestajatega, kus kaugus kontaktide vahel suureneb kiiresti erilise vedru abil.

Voolu katkestamisel tekkinud ekstravoolu võib demonstreerida, kui lülida näiteks elektromagnetiga rööbiti elektrihõõglamp (83. joon.), mis tarvitab kõrgemat pinget, kui see on antud vooluallikal, näiteks 220 V hõõglamp 110-voldise pinge puhul. Kiirel voolu katkestamisel hakkab hõõglamp hetkeks heledalt põlema. Suure induktiivsuse puhul võib hõõglamp isegi läbi põleda.



Joon. 84. Bifilaarne mähis.

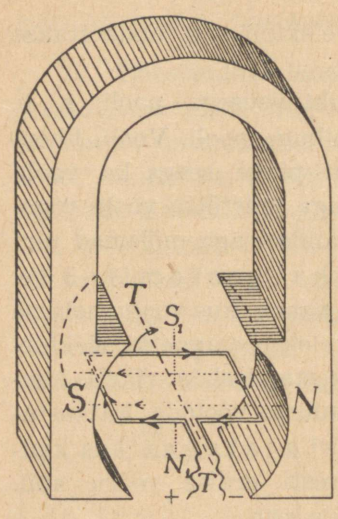
Raadiotehnikas kasutatakse muutliku induktiivsusega poole, mida nimetatakse variomeetreiks. Variomeeter koosneb kahest järjestikku lülitud poolist, milledest ühte võib teise sisse pöörata. Variomeetri induktiivsus on siis maksimaalne, kui voolud poolides on samasuunalised, minimaalne, kui need on vastassuunalised.

Induktiivsusevabadele poolidele keritakse traat spiraali bifilaarselt, s. o. nii, et kahes kõrvutiolevas keerus voolu suund on vastupidine. Induktiivsusevabu poole tarvitatakse mõõtereostaatide ehitamisel.

Generaatorid ja mootorid.

80. Alalisvoolu dünamo. Tehnikas tarvitatakse kahte liiki elektrivoolu: alalis- ja vahelduvvoolu. Alalisvool on niisugune

elektrivool, mille suund ei muutu, kuna vahelduvvoolu suund muutub perioodiliselt. Sellele vastavalt kasutatakse vooluallikatena ehk **generaatoritena** kas alalisvoolu või vahelduvvoolu masinaid. Nende mõlemate tegevus põhineb induktsioonvoolul.

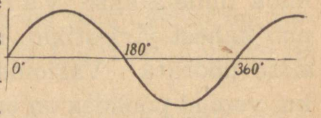


Joon. 85. Silmuse pöörlemine magnetiväljas.

Alalisvoolu generaatori ehk, nagu seda tavaliselt nimetatakse, **alalisvoolu dünamo** tegevuse selgitamiseks korraldame järgmise katse.

Paigutame kahe tugeva isenimelise magnetipooluse vahele isoleeritud traadist rööpküliku-kujulise silmuse, mis võib pöörelda silmuse tasapinnas oleva telje ümber. Pöörates seda traatsilmust teda ümbritsevas magnetiväljas, tekib temas indutseeritud pinge, sest mõlemad traadipooled lõikavad magneti tungjooni, kusjuures silmusest läbiminevate magneti tungjoonte hulk alatasa muutub.

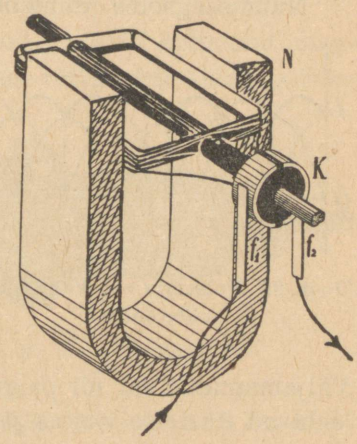
Iga kord, kui silmuse tasapind on risti magneti tungjoontega, muutub indutseeritud pinge suund, mis järgneb Lenzi reeglist. Niisiis, kui ühendada silmuse traadiotsad välisjuhtmega, tekib selles vahelduvvool, s. o. vool, mille suund muutub perioodiliselt. Silmuse pöörlemisel tekkinud muutust ühe täispöörde ehk perioodi kestel kujutab graafiliselt 86. joon., kus rõhtteljel on näidatud pöördenurga suurus või aeg t, püstteljel pinge. Samasuguse kõvera saame ka voolutugevuse tarvis.



Joon. 86. Vahelduvvoolu diagramm.

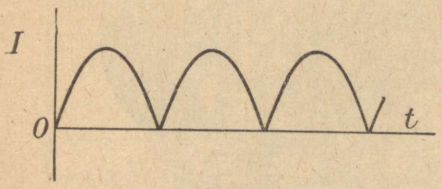
Et saada alalisvoolu, seks varustatakse eespool-kirjeldatud silmus järgmise seadisega. Silmuse pöörlemisteljeks on võll, mis varustatud kahe teineteisest isoleeritud metallsegmendiga

ehk lamelliga. Lamellid on ühendatud silmuse traadiotstega. Neid metall-lamelle puudutavad söest harjad, millede kaudu juhitakse vool välisahelasse. Lamellid on paigutatud pöörlemisvõllile nii, et iga kord, kui muutub voolu suund pöörlevas silmuses ja nimelt siis, kui silmuse tasapind on risti magneti tungjoontega, libiseb hari ühelt lamellilt teisele, mistõttu välisahelas voolu suund ei muutu, kuigi see muutub silmuses. Seda seadist nimetatakse kollektoriks.



Joon. 87. Alalisvoolu kollektor.

Sel viisil saame nn. pulseeriva voolu, s. o. voolu, mille suund küll ei muutu, kuid mille tugevus muutub 0 ja maksimaalse väärtuse vahel. Pulseerivat voolu ühe pöörleva silmuse puhul kujutab graafiliselt 88. joon. Ühtlasema pinge ja voolutugevuse saame, kui tarvitame kahte või rohkem silmust. Pulseerivat voolu, mille annab kaks järjestikku lülitud silmust, kujutab graafiliselt 89. joon.



Joon. 88. Pulseeriv vool.

Alalisvoolu dünamo peaosad on seega järgmised: traatmähis, mis pannakse pöörlema magnetiväljas ja milles tekibki induktsioonvool. Seda liikuvat osa nimetatakse **ankruks.**

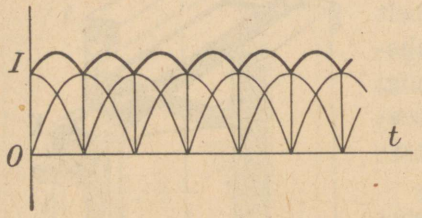
Magnetid, mis annavad tugeva magnetivälja ja milles ankur pöörleb.

Kollektor ja **harjad,** millede kaudu juhitakse vool liikuvalt ankrult välisahelasse.

Praktiliselt ehitatakse ankur mitmest mähisest, kusjuures iga mähis koosneb hulgast traatsilmustest või keerdudest. Igale mähisele vastab üks paar lamelle kollektoril. Suure arvu mähiste puhul on vool peaaegu muutumatu. Et koondada või-

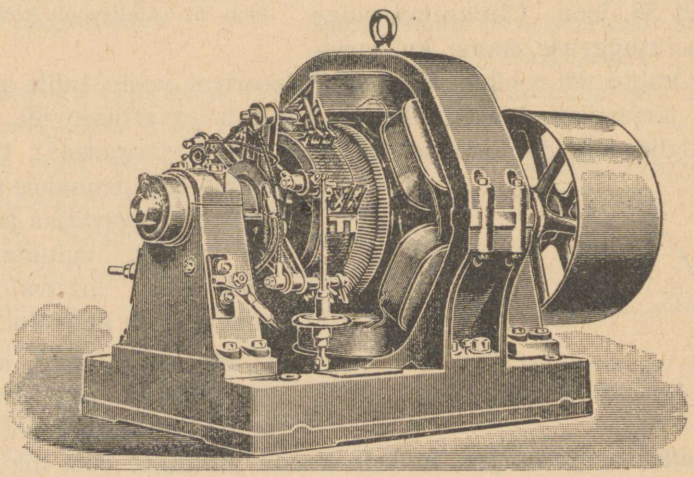
malikult palju tungjooni mähistesse, on mähised varustatud raudsüdamikkudega, mis pöörisvoolude vältimiseks on valmistatud raudplekist. Kuigi need raudplekid üksteist puudutavad, takistab pöörisvoolude tekkimist nende pinnal leiduv oksüüd.

Nüüdisaegsetes dünamomasinates tarvitatakse *trummankruid*, mida kujutab joon. 91. Üksikud mähised on selles järjestikku lülitud.



Joon. 89. Pulseeriv vool kahe silmuse pöörlemisel.

Dünamo magnetitena ehk, nagu neid harilikult nimetatakse, *väljamagnetitena* tarvitatakse peamiselt elektromagneteid, harva, väga väikeste masinate ehitamisel ka terasmagneteid. Väljamagnetid on nii paigutatud, et vastasnimelised poolused leiduvad üksteise vastas ja nende vahel pöörleb ankur. Suur-

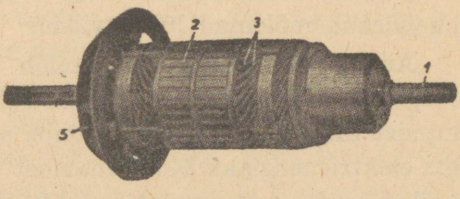


Joon. 90. Alalisvoolu dünamo.

tel dünamotel on rohkem kui üks paar väljamagneteid. Säärastelt masinate kollektoritelt võetakse vool niisama suure arvu harjade kaudu.

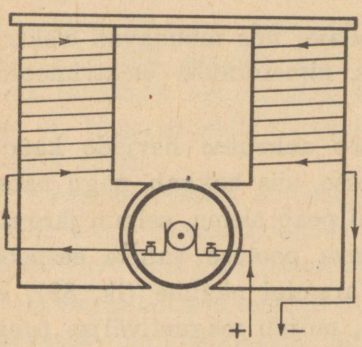
81. Siemensi printsiip. Väljamagneteid läbivat elektrivoolu nimetatakse *ergutusvooluks*. W. Siemensi järgi võetakse väljamagnetite magnetiseerimiseks tarvilik vool samalt masinalt. Seda printsiipi tuntakse elektrotehnikas *Siemensi* ehk *dünamoelektrilise printsiibi* nime all.

Et väljamagnetite raudsüdamikud on alati eelmisest magnetiseerimisest pisut magnetilised, selle tõttu tekib ankru pöörlemisel viimases nõrk induktsioonvool, mis annabki tõuke dünamo normaalseks töötamiseks.

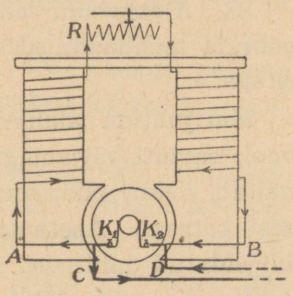


Joon. 91. Trummankur.

82. Pea- ja haruvoolumasinad. Selle järgi, kuidas väljamagnetid vooluahelasse lülitakse, eristatakse peavoolu- ja haruvoolu-masinaid. *Peavoolu-masinates* läbib väljamagneteid kogu vool (92. joon.). Koorma-



Joon. 92. Peavoolu-masin.



Joon. 93. Haruvoolu-masin.

tuse vähenemisel väheneb ka magnetite vool ning ühes sellega magnetivälja tugevus. Seetõttu langeb ka pinge. Peavoolumasinaid tarvitatakse harva. Peamiselt kasutatakse *haruvoolu-masinaid*. Siin juhitakse väike osa peavoolust

välja magnetitesse, millede mähised on tehtud suurest hulgast peenikestest vasktraadi-keerdudest. Haruvoolu-masinais on väljamagnetite vool rööbitine välisahela vooluga. Sellesse harru on lülitud veel reostaat, mis võimaldab ka muutliku voolu tarviduse puhul hoida ergutusvoolu konstantsena, seega ka magnetiväljа tugevust. See omalt poolt võimaldab hoida konstantsena ka pinget. Vooluenergia kulu on seejuures väga väike, sest väljamagnetite mähiste takistus on suur.

Kolmas lülitusviis on segalülitus. Selles lülituses on ühendatud mõlemad lülitusviisid.

Ankru ümberajamiseks tuleb kulutada tööd, sest Lenzi reegli järgi induktsioonvoolu suund on säärane, et ta seda liikumist takistab. Seega dünamos muundub mehhaaniline energia elektrienergiaks. Kui dünamost voolu ei võeta, on teda kerge ümber ajada, sest puudub induktsioonvoolu takistav mõju. Mida rohkem dünamot koormame, s. o. mida suurema voolu temalt võtame, seda rohkem peame tema ümberajamisel tööd tegema, sest seda suurem on induktsioonvoolu takistav mõju. Dünamod muudavad 70—95% nende ringiajamiseks kulutatud mehhaanilisest energiast elektrienergiaks.

83. Alalisvoolu mootor. Masinaid, mis muudavad elektrienergia mehhaaniliseks energiaks, nimetatakse elektrimootoriteks.

Kui juhtida alalisvoolu dünamo ankrusse harjade kaudu vool, samuti väljamagneti mähisesse, siis hakkab, nagu katse näitab, ankur pöörlema. Et see nii peab olema, selgub järgmisest katsest. Asetame kahe tugeva pooluse vahele eespool-kirjeldatud juhtmest silmuse. Varemini nägime (lk. 89), et juhtmesse, mida läbib elektrivool, mõjub magnetiväljas tung, mis on risti magneti tungjoontega ja vooluga (Flemmingi reegel). Selle tungi mõjul hakkab silmus pöörlema. See pöörlemine on pidev, sest vastaval momendil muutub voolu suund silmuses, nii et pöörlemissuund jääb endiseks. Voolusuuna muutumine ankrus toimub sel teel, et parajal momendil libisevad harjad ühelt lamellipaarilt teisele.

Elektrimootori töötamisel lõikavad mootori ankrumähiste traadid magneti tungjooni, mille tõttu ankrus tekib indutseeritud pinge. Seega mootor töötab samaaegselt dünamomasinaga. Indutseeritud pinge on vastassuunaline mootorisse juhitud voolu pingega ja seda suurem, mida kiiremini ankur pöörleb. See nähtus omab suurt tähtsust. Mida vähem on mootor koormatud, seda kiiremini ta ankur pöörleb, seda kõrgem on vastassuunaline indutseeritud pinge.

Siit järgneb: mida rohkem on mootor koormatud, seda tugevamat voolu ta tarvitab. Tühjalt jooksev mootor praktiliselt voolu ei tarvita.

Iga alalisvoolu dünamomasin võib töötada mootorina, seega on mootori peaosad samad, mis dünamolgi.

Nagu dünamomasinaid, nii jagatakse ka elektrimootoreid vastavalt sellele, kuidas väljamagnetid on lülitud vooluahelasse: peavoolu-, haruvoolu- ja segavoolu-mootoriteks.

84. **Käivitaja.** Eespool nägime, et elektrimootorit läbiv elektrivool on kõige suurem, kui mootor seisab, sest siis on indutseeritud pinge null. Et ankru takistus on väga väike, võib voolu juhtimisel mootorisse voolu tugevus väga suureks tõusta, mis ankru mähised võib läbi põletada. Seepärast algul ei anta mootorile täit pinget, vaid lülitakse vooluahelasse reostaat, mida tavaliselt nimetatakse **käivitajaks.** Kui mootori pöörete arv on tõusnud küllalt suureks, siis lülitakse käivitaja aegamööda välja.

Elektrimootoreid ehitatakse väga mitmesuguses suuruses, 0,1 ja isegi vähem hobusejõust kuni mitme tuhande hobusejõuni. Tavaliselt märgitakse elektrimootori võimsus kilovattides.

Elektrimootorid leiavad nüüdisajal laialdast tarvitamist igapäevases majapidamises, eriti aga tehnikas. Nii pannakse elektrimootori abil käima elektertramm, vabrikutes ja tehastes mitmesugused masinad jne. Majapidamises tarvitatakse elektrimootoreid kaevupumba, õhuventilaatori, õmblusmasina käimapanemiseks jne.

Elektrimootorid omavad suuri paremusi võrreldes teiste mehhaaniliste jõumasinatega. Neisse energia juhtimine on lihtne

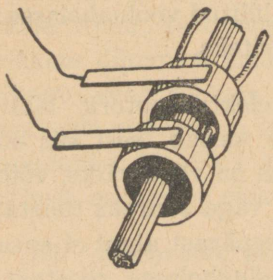
(ainult juhtmed), seega pole tarvis suuri ja raskeid transmissiooni-võlle, -rihmu jne. Samuti tarvitavad nad vähe ruumi ega ole elukardetavad.

Pealegi on võimalik elektrimootorite abil iga masinat üksikult seisma või käima panna, vaatamata sellele, kas teised samas tööstuses leiduvad masinad käivad või mitte. See võimaldab suurt kokkuhoidu energia kulus.

1. Elektrimootori võimsus on 3 kW. Mitu HJ see on?

2. Masinate ümberajamisel teeb elektrimootor tööd võimsusega 2,2 HJ. Seejuures tarvitab ta 220 V pinge juures 8,5 A voolu. Leia elektrimootori kasutegur!

85. Vahelduvvoolu generaator. Nagu eespool nägime, tekib traatsilmuse pöörlemisel magnetiväljas traatjuhtme otstes vahelduv pinge. Et liikuvalt silmuselt võtta elektrivoolu, seks ühendatakse silmuse traadiotsad pöörlemisvõllil oleva kahe metallrõngaga, mida puudutavad pidevalt harjad. Harjade kaudu juhitakse vool välisahelasse. Säärast kollektorit nimetatakse rõngaskollektoriks ja seda kujutab joon. 94. Silmuse pöörlemisel tekib seega ka välisahelas vahelduvvool. Kirjeldatud põhimõttel ongi ehitatud vahelduvvoolu andvad masinad, s. o. vahelduvvoolu g e n e r a a t o r i d.

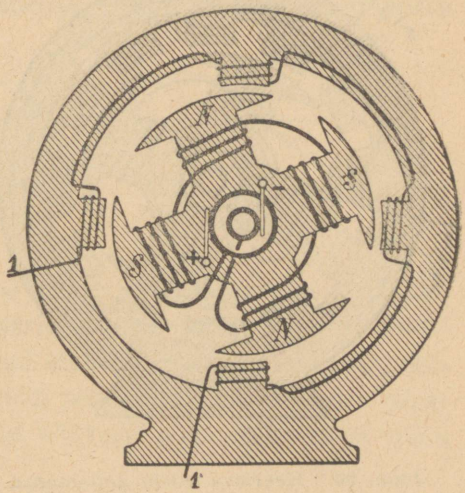


Joon. 94. Rõngaskollektor

Generaatoris tekitatakse vahelduvvoolu praktiliselt mitte ühes traatsilmuses, vaid raudsüdamikuga varustatud nn. induktsioonipoolides, mis liiguvad tugevate elektromagnetite pooluste lähedalt mööda. Et tehnikas ehitatakse vahelduvvoolu generaatorid tavaliselt kõrge pinge jaoks, siis pöörlevad neis väljamagnetid, induktsioonipoolid aga seisavad paigal. Seega välditakse kõrge pinge masina liikuvates poolides. Pöörlevat osa nimetatakse **rootoriks,** paigalseisvat osa **staatoriks.** Rootori moodustavad mitu väljamagnetit, samuti koosneb ka staator mitmest järjestikku lülitud induktsioonipoolist. Ka vahelduvvoolu generaatori väljamagnetite ergutamiseks on tarvilik ala-

lisvool. See saadakse väiksemast alalisvoolu dünamost. Tavaliselt on seks rootoriga samal teljel pöörlev alalisvoolu dünamo.

Läheneb kaks naaberpoolust induktsioonipoolidele, siis tekivad neis vastassuunalised voolud. Et neid voole liita, on ka staatori kaks naaberpooli keritud vastassuunaliselt. Vool on maksimaalne, kui elektromagnetite poolused on staatori induktsioonipoolide ees.



Joon. 95. Vahelduvvoolu generaator.

Elektrivoolu generaatorid leiavad laialdast kasutamist elektrivoolu andjatena elektrijaamades jm. Praegusajal ehitatakse generaatoreid kuni mitmekümne tuhande kilovatise võimsusega.

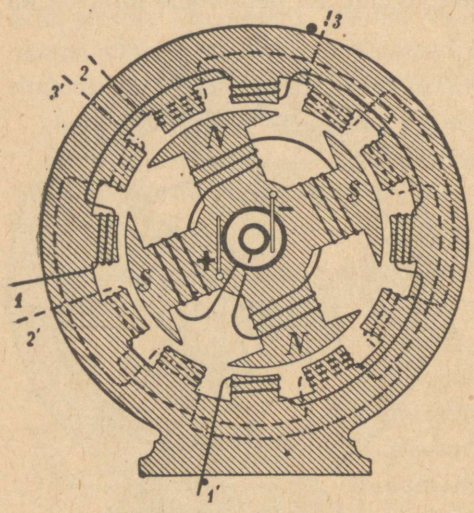
Elektrijaamades pannakse generaatorid käima auru, vee jne. jõul. Traatide kaudu juhitakse elektrivool sealt tarvitajaile.

Eesti tähtsamaid elektrijõujaamu on Ulila elektrijaam, mis varustab elektrivooluga Tartu linna ja Lõuna-Eestit, Ellamaa elektrijaam, mis varustab elektrienergiaga Tallinna, Tallinna linna elektrijaam jt.

Vahelduvvool.

86. Vahelduvvoolu faas. Kolmefaasine vool. Ajavahemikku, mille möödumisel hakkab korduma vahelduvvoolu muutus tugevuse ja suuna poolest, nimetatakse vahelduvvoolu perioodiks. Üksiku mähise täispöörde kestus ühtib

mähises indutseeritud vahelduvvoolu perioodiga, sest uue pöördega hakkab voolu tugevuse ja pinge muutus korduma. Seega 1 periood vastab pöördenurgale 360°. Seepärast avaldatakse vahelduvvoolu tehnikas f a a s i, s. o. voolu tugevuse või pinge arenemisastet antud hetkel, nurgakraadides. Nii näiteks faasi vahe 120° vastab $\frac{1}{3}$ perioodile.



Joon. 96. Keerleva voolu generaator.

Vahelduvvool on valgustamiseks ja elektriliste soojendusriistade jaoks niisama kõlblik kui alalisvoolgi. Seevastu tekib suuri raskusi vahelduvvoolu mootorite ehitamisel. Vahelduvvoolu generaatori põhimõttel ehitatud mootor töötab ainult siis, kui ta pöörete arv on võrdne generaatori pöörete arvuga. Seega selle käimapanek on raske.

Sellest raskusest on üle saadud seega, et on tarvitusele võetud mitmefaasine, peamiselt kolmefaasine vool.

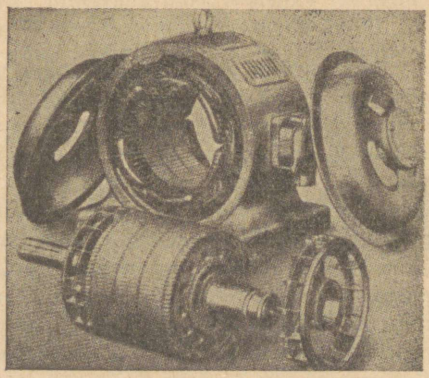
96. joon. kujutab k o l m e f a a s i s e ehk k e e r l e v a v o o l u generaatori skeemi. Selle staatoris on kolm üksteisest eraldatud mähist või mähise süsteemi, mis on nii paigutatud, et rootori pöörlemisel tekivad neis induktsioonvoolud, kuid mitte üheaegselt, vaid f a a s i v a h e g a 120° ehk $\frac{2}{3}\pi$. Joonisel on iga faasi mähisejuhe eriliselt joonestatud (pidev, katkeline, punktiiriga joon), mistõttu neid on kerge üksteisest eraldada. Rootori pöörlemisel liigub elektromagneti poolus kolme induktsioonipooli ees, tekitades neis induktsioonvoole faasi vahega 120°.

K e e r d v ä l i. Kui ühendada kolmefaasisest generaatorist tulevad voolujuhtmed samasuguse ehitusega masina kolmest mähisest ühe otstega, kuna teised otsad ühendada omavahel, siis tekitavad esimesest generaatorist tulevad voolud teise masina staatoris keerleva magnetivälja. Siit ongi saanud 3-faasine vool keerleva voolu nimetuse. Kui asetada keerlevasse



Joon. 97. Keerleva voolu diagramm.

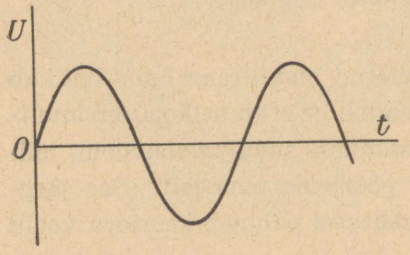
magnetivälja silmuse-kujuline suletud metallraam, siis hakkab raam seal pöörlema. See pöörlemine seletub sellega, et muutlik magnetiväli tekitab suletud silmuses induktsioonvoolu, millesse mõjub keerlev magnetiväli pöörlema panevalt. See järgneb ka Lenzi seadusest. Sellel nähtusel põhineb keerleva voolu nn. a s ü n k r o o n m o o t o r i tegevus. Selle mootori ankur koosneb silindrile tõmmatud jämedatest vasktraatidest, millede otsad on ühendatud vaskrõngastega. Suureks paremuseks on siin asjaolu, et ankrusse pole tarvis väljastpoolt voolu juhtida, niisiis puuduvad tal kollektor ja harjad; seega on ta ehituselt väga lihtne. Seda ankrut nimetatakse ka l ü h i ü h e n d u s e a n k r u k s. Keerleva voolu mootori pöörete arv on seejuures väiksem kui magnetivälja pöörete arv. Nagu alalisvoolu mootori puhul, tarvitatakse ka siin algul — voolu ühendamisel —



Joon. 98. Keerleva voolu mootor.

erilist reostaati — käivitajat, mis lülitakse vooluahelast välja, kui mootori pöörete arv on tõusnud normaalsele tasemele. Iga faas vajab seejuures omaette reostaati.

Kolmefaasise keerleva voolu generaatori ankur koosneb, nagu eespool kirjeldatud, kolmest mähisest ehk poolist, seega omab ta kolm paari klemme 1, 1′, 2, 2′, 3 ja 3′, millede kaudu toimub voolu võtmine generaatorist. Et voolujuhtmete arvu vähendada, ühendatakse isekeskis klemmid 1′, 2′ ja 3′; peale selle ühendatakse nad maaga, mille tõttu tähendatud klemmid alaliselt omavad pinget 0. Säärast lülitusviisi nimetatakse tähtlülituseks. Voolu edasisaatmine toimub sel juhul ainult kolme juhtme (faasijuhtme) kaudu ja neljanda nn. nulljuhtme kaudu. Voolu tarvitavad riistad lülitakse ühe faasijuhtme ja nulljuhtme vahel. On faasijuhtme ja nulljuhtme vahel vahelduv pinge 220 V, siis kahe faasijuhtme vahel on pinge kõrgem, nimelt 380 V.



Joon. 99. Vahelduvvoolu diagramm.

87. Vahelduvvoolu tugevus ja pinge. Tehnilise vahelduvvoolu puhul voolab elekter 1 sekundi kestel 50 korda ühes ja 50 korda vastassuunas. Voolu sagedus ehk frekvents on seejuures 50 perioodi ehk hertzi (Hz). Vahelduvvoolu põhjustab sama sagedusega vahelduv pinge.

Vahelduvvoolu voolutugevuse käiku kujutab graafiliselt 99. joon., kus püstteljel on näidatud voolutugevus, rõhtteljel aeg. Nagu joonisest näha, langeb 50-perioodise vahelduvvoolu pinge ja voolutugevus 1 sek. kestel 100 korda nullini, samuti 100 korda omavad nad 1 sek. kestel maksimaalväärtust. Pöördpooli mõõteriista osuti liikumise suund oleneb voolu suunast. Juhtides läbi pöördpooli mõõteriista vahelduvvoolu, peaks pöördpooli liikuv osa ühes osutiga kiiresti liikuma kord ühele, kord teisele poole. Seda ei jõua liikuv süsteem oma inertsi tõttu teha ning seetõttu jääb ta paigale. Seega pöördpooli mõõteriist ei näita vahelduvvoolu. Teisiti on lugu kuumtraat- ehk termilise mõõteriistaga. Selles riistas põhjustab osuti liikumist kuumtraadi pikenemine, mis järgneb traadi soojenemisel. Voolusoojus aga ei olene voolu suunast. Seega võib kuumtraat-mõõteriistaga mõõta nii alalis- kui ka vahelduvvoolu pinget ja voolu tugevust.

Et vahelduvvoolu tugevus perioodiliselt muutub nulli ja maksimaalväärtuse vahel, on arusaadav, et kuumtraat-mõõteriist vahelduvvoolu läbimisel ei näita vahelduvvoolu tugevuse maksimaalväärtust, vaid vähem. Et voolude võrdlemistel võrreldakse peamiselt nende võimsusi, siis võrreldakse ka vahelduvvoolu alalisvooluga, millel niisama suur võimsus.

Säärast alalisvoolu tugevust, mis 1 sekundis sama takistusega juhtmes niisama palju soojust tekitab kui vahelduvvool, nimetatakse vahelduvvoolu efektiivseks voolutugevuseks. Samas mõttes räägitakse ka vahelduvvoolu efektiivsest pingest.

Tavalise tehnilise vahelduvvoolu puhul efektiivne voolutugevus I_e ja efektiivne pinge U_e arvutatakse voolutugevuse ja pinge maksimaalväärtustest I_o ja U_o järgmiselt:

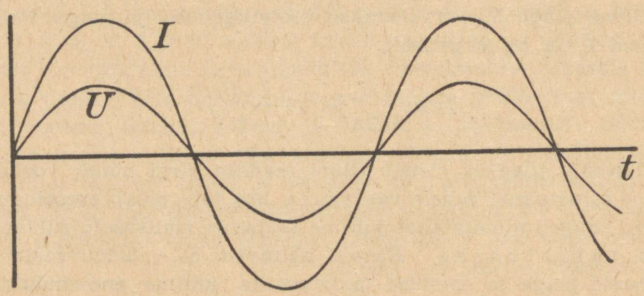
$$I_e = \frac{I_o}{\sqrt{2}} \text{ ja } U_e = \frac{U_o}{\sqrt{2}}.$$

Alalisvoolu tugevus oleneb Ohmi seaduse järgi ainult voolu pingest ja juhtme takistusest, sellele vaatamata, kas juhe omab eneseinduktsiooni või mitte. Sageli nimetatakse juhtme takistust alalisvoolu suhtes oomiliseks takistuseks. Katsed näitavad, et vahelduvvoolu tugevus oleneb peale pinge ja oomilise takistuse ka juhtme eneseinduktsioonist. Selle nähtuse lähemaks tundmaõppimiseks korraldame järgmise katse. Lülime vahelduvvoolu ahelasse järjestikku hõõglambi ja elektromagneti pooli, millest raudsüdamik välja võetud. Kui ühendame voolu, siis põleb hõõglamp enam-vähem normaalselt (heledasti). Nüüd suurendame pooli eneseinduktsiooni seega, et pistame pooli raudsüdamikku, kohe nõrgeneb voolutugevus, mida näeme sellest, et hõõglambi heledus väheneb tunduvalt ja lamp võib isegi ära kustuda. See katse näitab, et juhtme takistus vahelduvvoolu suhtes on seda suurem, mida suurem on juhtme eneseinduktsioon. Seda nähtust seletame järgmiselt: et vahelduvvoolu tugevus poolis muutub perioodiliselt, tekib poolis eneseinduktsiooni pinge, mis Lenzi reegli järgi on alati vastassuunaline eneseinduktsiooni tekitava, s. o. primaarse voolu muutustega. Et eneseinduktsiooni pinge on seda suurem, mida kiiremini muutub primaarne vool, siis järgneb sellest, et pooli vahelduvvoolu takistus oleneb ka vahelduvvoolu sagedusest: mida suurem on sagedus, seda suurem on ka takistus. Väga suure induktiivsusega pool praktiliselt vahelduvvoolu läbi ei lase. Säärast vahelduvvoolu suhtes lõpmatu suure takistusega pooli nimetatakse kägi- e. paispooliks. Paispoole tarvitatakse tehnikas vahelduvvoolu takistustena, eriti aga suursagedusega voolude ärahoidmiseks.

Alalisvool kondensaatorist läbi ei lähe: alalisvoolu ahelasse lülitud kondensaator mõjub voolu katkestavalt. Lülime aga vahelduvvoolu ahelasse kondensaatori ja sellega järjestikku hõõglambi, siis näeme, et hõõglamp „põleb", kuigi ehk nõrgemini, kui ilma kondensaatorita. Sellest võime järeldada, et kondensaator laseb vahelduvvoolu läbi. Vastavad katsed näitavad ka, et kondensaatori takistus vahelduvvoolu suhtes on seda väiksem, mida suurem on kondensaatori mahtuvus ja vahelduvvoolu frekvents.

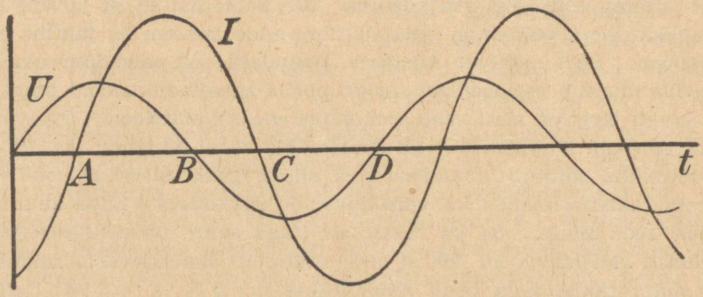
Voolu võimsus on võrdne voolutugevuse ja pinge korrutisega. Vahelduvvoolu puhul aga kehtib see ainult siis, kui pinge ja voolutugevuse

maksimumid ja miinimumid on üheaegsed. Sel juhul on pinge ja voolutugevus ühes ja samas faasis. Säärane juhtum esineb, kui vooluahelas on ainult oomiline takistus. On vooluahelasse lülitud induktiivsus, siis ahelas tekkinud vastassuunalise eneseinduktsiooni pinge tõttu jääb voolu-



Joon. 100. *I* ja *U* on samas faasis.

tugevus pingest maha, s. o. hilineb. Säärast olukorda kujutab 101. joon. Sel juhul on vahelduvvoolu tegevvõimsus väiksem kui korrutis *UI*, sest, nagu joonisest näha, on vahemikus *A*-st *B*-ni mõlemad positiivsed, seega on posi-

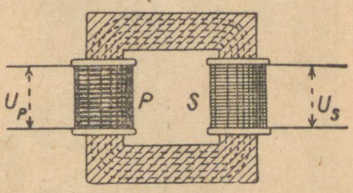


Joon. 101. *I* ja *U* pole samas faasis.

tiivne ka nende korrutis, vahemikus *B*—*C* on pinge negatiivne, voolutugevus positiivne, nende korrutis seega negatiivne, vahemikus *C*—*D* on mõlemad negatiivsed, nende korrutis positiivne. Niisiis 1 sek. kestel tehtud voolu töö (võimsus) on nüüd väiksem kui eelmisel juhul.

88. **Transformaator** on seadis, mis võimaldab muuta vahelduvvoolu pinget peaaegu ilma energiakaotuseta. Transformaator koosneb suletud raudsüdamikust, millele keritud kaks mähist, primaarne ja sekundaarne. Need mähised või-

vad olla keritud teineteise kõrvale või peale. Kui juhtida läbi primaarse mähise vahelduvvool (primaarne vool), siis vastavalt voolutugevuse muutustele tekib mähises, seega ka raudsüdamikus muutlik magnetiväli. Et samale südamikule on keritud ka sekundaarne mähis, muutub ka selles magnetiväli, seega tekib seal induktsioonvool. Nii indutseerub sekundaarses mähises sekundaarne vahelduvvool, kui primaarsest mähisest läbi juhtida primaarne vahelduvvool. On transformaatori sekundaarse mähise keerdude arv suurem kui primaarse mähise keerdude arv, siis sekundaarse voolu pinge on ka kõrgem ja ümberpöördult. Seega võimaldab transformaator muuta vahelduvvoolu pinget, kusjuures sekundaarse voolu pinge suureneb või väheneb nii mitu korda, kui suur on primaarse ja sekundaarse mähise keerdude arvu suhe $\varkappa$. Seda suhet nimetatakse transformaatori ülekande-arvuks. Näiteks raadiotehnikas tarvitatakse transformaatoreid ülekande-suhtega 1:4, s. o. sekundaarse mähise keerdude arv on neli korda suurem primaarse mähise keerdude arvust.



Joon. 102. Transformaator.

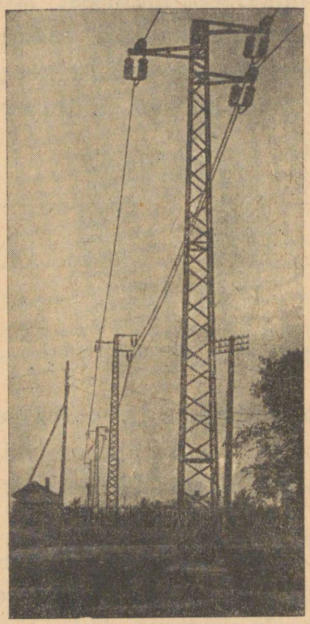
Olgu primaarse voolu pinge U_p ja voolutugevus I_p, sekundaarse voolu pinge U_s ja voolutugevus I_s, siis on primaarse voolu võimsus U_pI_p ja sekundaarse voolu võimsus U_sI_s. Kui vooluenergia kadu transformaatoris ei esine, siis energia jäävuse lause põhjal on mõlemad võimsused võrdsed: $U_pI_p = U_sI_s$. Siit saame:

$$U_p : U_s = I_s : I_p.$$

Seega pinge tõstmisega väheneb niisama palju kordi ka voolu tugevus. Tegelikult esineb transformaatoris energiakadu ning seetõttu paremal juhul U_sI_s erineb U_pI_p-st 2—5% võrra.

89. Transformaatori rakendamine elektrienergia edasiandmisel. Transformaatorid leiavad laialdast kasutamist elektri edasiandmisel suurtele kaugustele.

Elektrijaamad ehitatakse sinna, kus generaatori käitamiseks vajalik energia on turba, kivisöe jne. näol odav. Eriti aga võimaldab säärane elektrijaama asukoht koskede jõu ärakasutamist. Elektrijaamades tekitatakse generaatorite abil elektrivool pingega 1000—5000 V. See elektrivool transformeeritakse elektrijaamas transformaatorite abil kõrgepingevooluks pingega kuni 100 000 V ja sageli enam. Elektrijaamast juhitakse elektrienergia tarvitamiskohtadele traatide kaudu. Kõrgepingevooluks transformeeritakse elektrivool seepärast, et kõrgepinge puhul võib peenemaid traate tarvitada, mis on majanduslikult kasulikum. Elektrienergia edasisaatmisel traatide kaudu esineb paratamatu energiakadu juhtmete soojenemise tõttu. Joule'i seaduse järgi voolu toimel tekkinud soojushulk on võrdeline voolutugevuse ruuduga ja juhtmete takistusega. See energiakadu juhtmetes tekkinud soojuse kujul on kõrgepinge puhul väiksem, sest sama vooluvõimsuse $N = UI$ puhul on ka voolutugevus vastavalt väiksem. See kõrgepingevool juhitakse eriliste kõrgepinge-isolaatorite abil isoleeritud juhtmete kaudu tarvitamiskohtadele, kus see vastava transformaatoriga transformeeritakse madalapingeliseks, tavaliselt 220 või 110 V vooluks. Kõrgepingejuhtmete puudutamine on surmav. Ka kaudne, näiteks puuteiba, nööri jne. kaudu kõrgepinge puudutamine on elukardetav. Et vahelduvvoolu pinget on transformaatori abil hõlpus muuta, siis eelistatakse tehnikas vahelduvvoolu alalisvoolule.

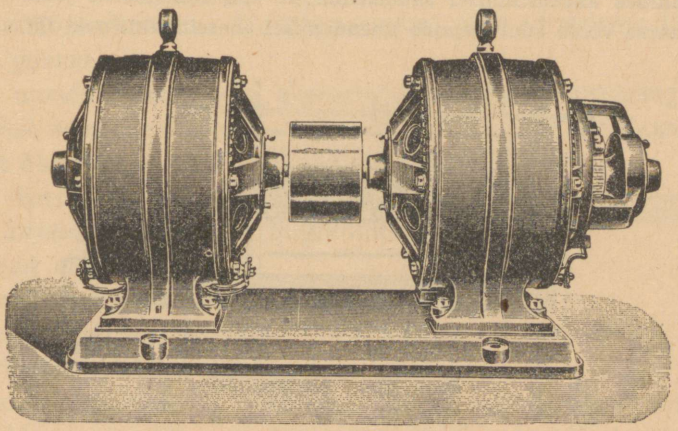


Joon. 103. Kõrgepingejuhtmed.

90. Umformer ja alaldajad. Et tehnikas sageli on tarvilik alalisvool, kasutatakse selle saamiseks vahelduvvoolust u m f o r m e r i t. See koosneb tavaliselt ühele alusele kinnitatud

ja alalisvoolu dünamoga sidestatud vahelduvvoolu mootorist, mis esimest ringi ajab. Peale umformeri võib vahelduvvoolu muuta alalisvooluks nn. a l a l d a j a abil. Alaldaja muudab vahelduvvoolu pulseerivaks alalisvooluks seega, et ta laseb läbi voolu ainult ühes suunas, teises suunas mitte. Alaldaja töötab seega kui ventiil, mis ühel poolperioodil laseb voolu läbi, teisel mitte. Nn. k u i v a l a l d a j a n a tarvitatakse vaskplaati, mis kaetud vaskoksüduuliga (Cu_2O). Katse näitab, et säärane plaat laseb voolu läbi ainult suunas vask—oksüduul. Vastavalt pingele lülitakse neid mitu tükki järjestikku.

Parima alaldajana töötab elektrontoru (vt. § 120).



Joon. 104. Umformer.

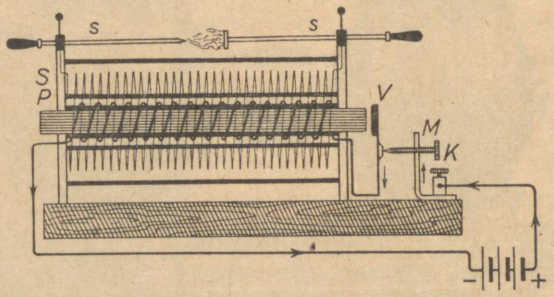
1. Elektrijaamas transformeeritakse vahelduvvool 3000 voldist 150 000 voldini. Transformaatori võimsus on 3200 kW. Kui suur on voolutugevus primaarses ja sekundaarses ahelas?

2. Transformaatori abil muudeti vahelduvvoolu pinge 220 voldilt 8 voldini. Milline on transformaatori ülekande-arv?

3. Mispärast ei valmistata transformaatori ja sädeinduktori südamikke massiivsest pehmest rauast?

91. Sädeinduktor on seadis, mis muudab madalapingelise alalisvoolu kõrgepingevooluks. Sädeinduktor koosneb raudsüdamikust, millele keritud mõnest üksikust jämedast vasktraadist koosnev primaarne mähis ja selle peale suurest hulgast keerdudest koosnev sekundaarne mähis. Pri-

maarset mähist läbiva voolu ühendamise ja katkestamisega tekitatakse raudsüdamikus muutlik magnetiväli ja see põhjustab induktsioonvoolu tekkimise sekundaarses mähises. Seega üheks sädeinduktori tähtsamaks osaks on katkestaja. Ruhmkorfi ehitatud elektromagnetilise katkestajaga sädeinduktori skeemi ja lülitust kujutab 105. joon., kus *P* on primaarne, *S* — sekundaarne mähis. Primaarse voolu perioodiline katkestamine ja ühendamine saavutatakse seega, et vool, läbides primaarse mähise, muudab raudsüdamiku magnetiliseks ja see tõmbab raudtükikesega varustatud vasara *V* külge, mistõttu katkeb ühendus vasara *V* ja kontaktkruvi *M* vahel ning vool katkeb. Nüüd surub vedru vasara uuesti kontaktkruvi vastu, mille läbi vool ühendatakse ja nähtus kordub. Seega toimub siin voolu ühendamine ja katkestamine automaatselt nagu elekterkõlistaja puhul. Primaarse voolu ühendamisel tekib sekundaarses mähises vastassuunaline ja primaarses katkestamisel samasuunaline elektromotoorne jõud. Et aga primaarse voolu suurenemine ühendamisel eneseinduktsiooni tõttu toimub



Joon. 105. Sädeinduktor.

aeglaselt, katkestamine aga palju kiiremini, siis on katkestamisel tekkinud pinge sekundaarses mähises ka palju kõrgem. Kui sekundaarse mähise otsad ühendada sädemikuga, mille pikkus küllalt suur, siis võib selles tekkida säde ainult primaarse voolu katkestamisel, mispuhul pinge on kõrgem. Nii võib saada sädeinduktori abil kõrgepingelise katkendilise alalisvoolu. Sekundaarse voolu pinge on seda kõrgem, mida suurem on sekundaarse mähise keerdude arv võrreldes primaarse mähise keerdude arvuga, nagu see transformaatoris esineb. Seepärast ongi primaarse mähise keerdude arv väike, kuna sekundaarse mähise keerdude arv on kuni mitukümmend tuhat ja rohkemgi, kuid traat on vastavalt ka peenem. Primaarse voolu katkestamisel tekib vasara ja kontaktkruvi vahel ahela eneseinduktsiooni tõttu säde. Et säde aeglustab voolu katkestamist, siis selleks, et voolu katkestamine toimuks kiiresti, lülitakse vasaraga ja kontaktkruviga rööbiti kondensaator, millega välditakse sädeme tekkimine.

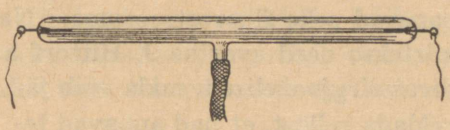
Sädeinduktoreid tarvitatakse kõrge pinge saamiseks. Varemini kasutati neid ka röntgeniaparaatide juures, kuid praegusajal tarvitatakse seks otstarbeks kõrgepinge transformaatoreid.

Elektrivool hõrendatud gaasides.

92. Õhk kui isolaator. Normaalrõhu ja mitte kõrge temperatuuri juures on õhk samuti kui iga teinegi gaas hea isolaator. Sellega seletub nähtus, et õhus olev elektriliselt laetud ja maast isoleeritud keha hoiab kauemat aega alal oma laengu. Ainult väga kõrge pinge puhul, näiteks elektrimasina konduktorite vahel, tekib elektrivool läbi õhu s ä d e m e n a.

93. Hõrendustoru. Hoopis paremini juhivad elektrit hõrendatud gaasid.

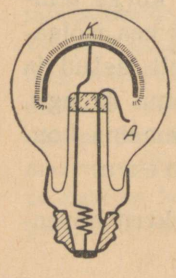
Et uurida elektrivoolu hõrendatud gaasides mitmesugustel rõhkudel, seks tarvitatakse umbes 50—80 cm pikkust klaastoru, millest õhk välja pumbatakse toru keskel oleva haru kaudu (106. joon.). Mõlemad elektroodid selles torus asetsevad toru otstes. Ühendades säärase hõrendustoru elektroodid sädeinduktori (sädeme pikkus u. 5 cm) sekundaarse mähise klemmidega, ei märka me torus mingit elektrivoolu, kui torust pole õhku välja pumbatud. Hõrendame nüüd torus olevat õhku pumba abil. Rõhu juures umbes 40 mm Hg tekib torus elektroodide vahel hele valguspael. Õhu hõrenedes valguspael laieneb ja täidab kogu toru. See katse näitab, et hõrendatud õhk juhib elektrit, kui anda elektroodile vastav pinge. Selle pinge puhul atmosfäärirõhuline õhk elektrit ei juhi. Rõhu vähenedes muutuvad torus valgusnähtused, samuti nende värvus. Viimane oleneb ka torus leiduvast gaasist. Üldiselt nimetatakse säärast elektri läbiminekut hõrendatud gaasidest **huumlahenduseks** ja torus esinevaid valgusnähtusi **huumvalguseks.** Rõhu juures umbes 0,01 mm Hg kaovad valgusnähtused torus täielikult, seevastu fluorestseerub (helendub) rohekalt katoodi vas-



Joon. 106. Hõrendustoru.

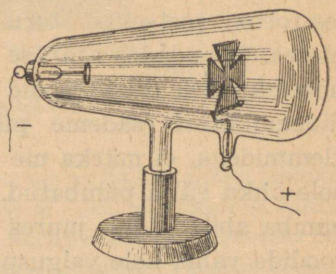
tas olev klaassein. Õhurõhku hõrendustorus veelgi vähendades lõpeb viimaks elektri läbiminek sellest, millest võime järeldada, et *tühi ruum elektrit ei juhi*.

Huumvalgust kasutatakse huumlampides, mida tarvitatakse tehnikas signaal-, eriti aga reklaamlampidena. Praegusajal ehitatakse huumlampe normaalpinge jaoks 220 ja 110 V. Neooniga täidetud huumlamp annab punaka valguse, naatriumiauruga täidetud kollase. Reklaamtehnikas kasutatakse sageli kirjatähe-kujulisi huumlampe.



Joon. 107. Huumlamp.

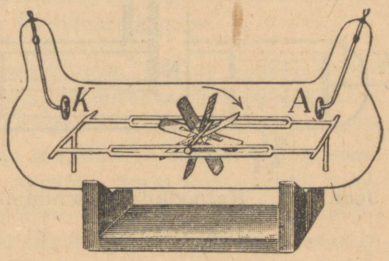
94. Katoodkiired. Kui hõrendustorus õhurõhku järjest vähendada, siis teatud piirini jõudes torru jäänud õhk voolu mõjul enam ei helendu, vaid seevastu helendub katoodi vastas olev toru klaassein. See näitab, et katood kiirgab silmale nähtamatuid kiiri, mis toru seinale langedes panevad selle fluorestseeruma. Neid kiiri nimetatakse **katoodkiirteks**; need avastas J. Hittorf a. 1869. Katoodkiired levivad torus sirgjooneliselt, mida võib järeldada sellest, et nad annavad terava varju. Asetame näiteks katoodi ette katoodkiirte teele metallist risti, siis näeme risti teravat varju toru klaasseinal, kuhu katoodkiired langevad. Katoodilt lähtuvad need kiired risti katoodi pinnale, sellele vaatamata, kuhu on paigutatud anood. Nii näiteks, tarvitades rohkem kui kahe elektroodiga toru, jääb voolu läbimisel katoodi vastas olev fluorestseeruv laik ikka samale kohale püsima, sellele vaatamata, milline elektrood teha anoodiks. Andes katoodile nõguspeegli kuju, koonduvad katoodkiired ühte punkti, nõguspeegli keskpunkti. Kui sinna paigutada tükike plaatinaplekki, siis hakkab see katoodkiirte toimel hõõguma. Seega *katoodkiired võivad tekitada soojust*.



Joon. 108. Katoodkiirte vari.

Asetades katoodtorusse katoodkiirte teele kerge, telje ümber pöörleva labida-kujuliste tiibadega varustatud rattakese, hakkab see katoodkiirte mõjul pöörlema. Säärast toru kujutab 109. joon.

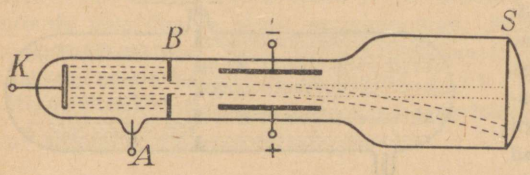
Nagu nägime, tekitavad katoodkiired klaasseinal, kuhu nad langevad, fluorestsentsi. Eriti tugevasti fluorestseeruvad katoodkiirte toimel mitmesugused mineraalid. Seda katoodkiirte omadust kasutatakse nende käigutee nähtavaks tegemiseks. Katoodi ette seatakse kitsas pilu, mis laseb läbi peenikese kiirtekimbu. Pilu taha on paigutatud katoodkiirte suhtes pisut kaldu fluorestseeruva ainega kaetud ekraan. Voolu läbimisel torust on näha ekraanil helenduv sirge joon, mis kujutab katoodkiirte käiku.



Joon. 109. Katoodkiirte mehhaaniline toime.

Langevad katoodkiired torru asetatud kolmandale elektroodile, mis ühendatud elektroskoobiga, siis omandab see katoodkiirtelt negatiivse laengu.

Samuti näitavad katsed, et katoodkiired painduvad elektriväljas. Kui juhtida katoodkiired läbi kahe plaadi vahelise ruumi, andes seejuures plaatidele pinge, painduvad kiired positiivselt laetud plaadi poole, mis näitab ka, et katoodkiired omavad negatiivset elektrilaengut.



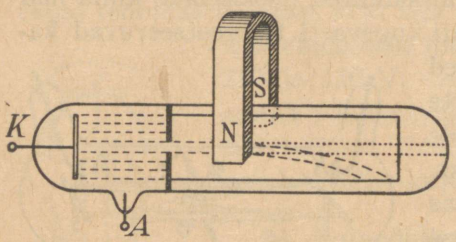
Joon. 110. Katoodkiirte paindumine elektriväljas.

Katoodkiired painduvad ka magnetiväljas, kusjuures see paindumine toimub nii nagu voolujuhtme puhul, mida läbib katoodkiirte suunaga vastupidine elektrivool.

Kõik need katsed näitavad, et katoodkiired on moodustatud kiiresti liikuvaist negatiivselt laetud osakestest.

Nende paindumisest magneti- ja elektriväljas võib määrata ka nende laengu suuruse ja massi.

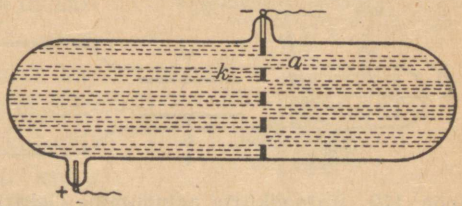
Vastavad mõõtmised näitavad, et katoodkiirte osakeste mass on $^1/_{1850}$ vesinikuaatomi massist, mis on kõige väiksem meile tuntud mass. Need osakesed omavad negatiivset elektrilaengut, mis on võrdne elektri elementaarlaenguga ja nimelt $4{,}80 \cdot 10^{-10}$ abs. laenguühikuga. Neid vabu negatiivse elektri algosakesi nimetatakse **elektronideks**, mis nimetust tarvitasime juba varemini. Niisiis katoodkiired moodustavad vaba negatiivse elektri voolu.



Joon. 111. Katoodkiirte paindumine magnetiväljas.

Katoodkiirte kiirus on üldiselt suur ja oleneb katoodi ja anoodi vahelisest pingest. Keskmiselt on nende kiirus 20 000—100 000 km/sek, seega $^1/_{10}$ kuni $^1/_3$ valguse kiirusest [1].

95. Kanalkiired. Peale katoodkiirte võib tekitada hõrendustorus ka positiivse laenguga kiiri. Tarvitades augukestega või kanalitega varustatud katoodi, avastas E. Goldstein 1876. a., et katoodi taga tekivad silmale nähtamatud kiired, mis võrreldes katoodkiirtega liiguvad vastassuunaliselt ja mis nagu katoodkiiredki tekitavad toru klaasseinal fluorestsents-valguse. Neid kiiri hakati kutsuma **kanalkiirteks**, sest nende tekitamiseks tuleb katood varustada kanalitega. Kanalkiirte toru kujutab 112. joon.: Katood on selles sõelataoliselt kanalitega läbi puuritud. Andes katoodile ja anoodile küllalt kõrge pinge, märkame torus kanalkiiri, mis levivad seal vastassuunaliselt katoodkiirtega. Kanalkiirte toimel helendub torus olev hõre õhk nõrgalt, samuti helendub ka klaassein, kuhu nad lan-



Joon. 112. Kanalkiired.

[1] Elektroni mass on seega $9{,}108 \cdot 10^{-28}$ g.

gevad. Kanalkiired liiguvad sirgjooneliselt, painduvad aga elektri- ja magnetiväljas, kuid see paindumine on väiksem ja vastassuunaline võrreldes katoodkiirtega. Sellest paindumisest järeldatakse, et kanalkiired on moodustatud liikuvaist, positiivselt laetud osakestest. Lähemad uurimised on näidanud, et kanalkiired moodustuvad liikuvaist, positiivselt laetud torus leiduvaist gaasiosakestest ehk nn. *gaasiioonidest*, kusjuures nende gaasiioonide laeng on niisama suur kui elektrolüüdis esinevail ioonidel, s. o. 1, 2 või rohkem elementaarlaengut. Siit järeldatakse, et positiivne elektrilaeng esineb reeglipäraselt ühenduses ainega.

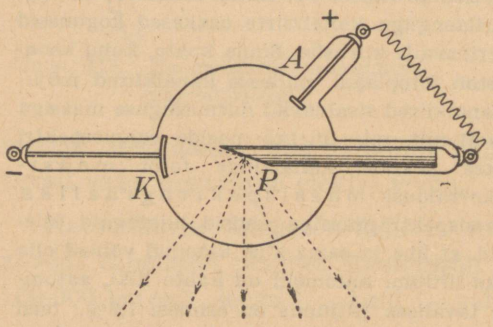
96. Isotoobid. Kanalkiirte kõrvalekaldumise suurus oleneb peale osakeste massi ja laengu ka nende kiirusest. Kasutades parajat elektri- ja magnetivälja kombinatsiooni, saavutas füüsik Fr. Aston olukorra, et kõik ühe ja sama massiga ja elektrilaenguga kanalkiirte osakesed kogunesid ühte punkti, vaatamata nende erinevaile kiirusile. Sinna kohta, kuhu koondusid kanalkiired, paigutas Aston fotoplaadi, millesse kanalkiired mõjuvad nagu valguskiiredki. Kui kanalkiired sisaldavad mitmesuguse massiga osakesi, siis saadakse fotoplaadil pilt, mis tuletab meelde valgusspektri ülesvõtet. Seetõttu nimetatakse säärast kanalkiirte fotot *massispektriks* ja Astoni katsekorraldust *massispektrograafiks*. Astoni ja teiste uurimised massispektrograafiga andsid üllatavaid tulemusi. Need mõõtmised näitasid, et ühe ja sama aine aatomid võivad olla erineva aatomkaaluga. Näiteks liitiumi aatomeid on kahte liiki, aatomkaaluga 6 ja aatomkaaluga 7, tavalises liitiumis on esimesi 7,9%, teisi 92,1%. Booris on 20,6% aatomeist aatomkaaluga 10 ja 79,4% aatomkaaluga 11. Ühtede ja samade keemiliste omadustega, kuid erinevate aatomkaaludega elemente nimetatakse *isotoopideks*. Mõnede ainete isotoopide arv on suur: kadmiumil ja elavhõbedal 9, tinal 11. Ka vesiniku aatomid pole ühe ja sama aatomkaaluga: 99,8% vesinikuaatomeist on aatomkaaluga u. 1, kuid 0,02% vesinikuaatomeist on aatomkaaluga 2. Viimaste ühend hapnikuga on tuntud *raskevee* nime all.

Need uurimised näitavad ka, et aine keemilised omadused ei olene aine aatomkaalust.

97. Röntgenikiired. Uurides suure hõrendusega katoodtorus esinevaid nähtusi, avastas saksa füüsik K. W. Röntgen aastal 1895, et katoodi vastas olev klaassein, kuhu langevad katoodkiired, kiirgab silmale nähtamatuid kiiri, mis levivad sirgjooneliselt ja millede olemasolu võib sel teel nähtavaks teha, et nende kiirte toimel fluorestseeruvad mitmed ained. Avastatud kiiri nimetas Röntgen ise **x-kiirteks**, kuid praegusajal tuntakse neid rohkem **röntgenikiirte** nime all. Peale fluorestsentsi muudavad röntgenikiired õhu elektrit juhtivaks ja mõjuvad fotoplaadisse

tuhmistavalt. Kuid kõige silmatorkavamaks röntgenikiirte omaduseks on nähtus, et nad enam-vähem kõikidest, ka läbipaistmatutest kehadest läbi tungivad, sellele vaatamata, kas need kehad on nähtava valguse suhtes läbipaistvad või läbipaistmatud. Nii on näiteks puu, papp, alumiiniumplekk röntgenikiirte suhtes peaaegu läbipaistvad.

Röntgenikiirte saamiseks tarvitatakse erilise ehitusega, suure hõrendusega katoodtorusid. Ühte säärast lihtsat **röntgenitoru** kujutab 113. joonis. Selles on katoodiks nõgusapinnaline alumiiniumpeegel, selle ees umbes toru keskkohas on plaatinast või volframplekist valmistatud nn. antikatood, kuhu langevad katoodilt väljunud katoodkiired. Et katoodi pind on nõgus, siis on katoodkiirte kimp koonduv.



Joon. 113. Röntgenitoru.

Katoodkiirte järsul pidurdamisel antikatoodil muutub suurem osa katoodkiirte energiast soojuseks, teise osa arvel tekivadki röntgenikiired. Röntgenikiirte allikaks on seega antikatood ja just see koht, kuhu langevad katoodkiired. Mõnedes röntgenitorudes on ka eraldi anood torusse toodud, mis ühendatakse antikatoodiga.

Röntgenikiirte tekitamiseks on tarvilik kõrge pinge, mõnikümmend tuhat ja enam volti. Varemini tarvitati seks vooluallikatena sädeinduktoreid, uuemal ajal kasutatakse selleks kõrgepinge transformaatoreid.

Kirjeldatud röntgenitorus tekivad katoodkiired sel teel, et torus olevad positiivselt laetud õhuioonid, kokku põrgates katoodiga, paiskavad neist elektrone välja. Seega on tarvilik õhuioonide olemasolu. Sääraseid röntgenitorusid nimetatakse seepärast ioontorudeks.

Praegusajal tarvitatakse tehnikas rohkem nn. **hõõgkatoodiga** röntgenitorusid. Need on õhutühjad röntgenitorud, kus katoodiks on volframtraat või tooriumoksüüdiga kaetud volframtraat, mis pannakse elektrivoolu abil hõõguma. Kõrge temperatuurini kuumutatud hõõguvast metalltraadist (hõõgniidist) väljuvad elektronid, kusjuures elektronide väljumine ehk emissioon on seda suurem, mida kõrgem on hõõgniidi temperatuur. Seega on võimalik hõõgniiti läbiva voolu tugevuse muutmise teel muuta ka katoodkiirte tugevust.



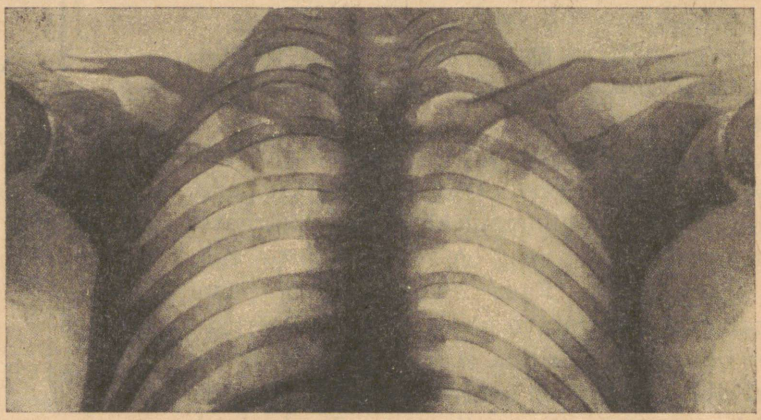
Joon. 114. Hõõgkatoodiga röntgenitoru.

Elektronide väljumine kuumutatud metallidest on füüsikas tuntud E d i s o n i e f e k t i nime all.

Röntgenikiired läbivad mitmesuguseid kehi mitmesugusel määral. Õhuke puulaud, papp, riie, nahk ja alumiiniumplekk ei neela märgatavalt röntgenikiiri: need on röntgenikiirte suhtes läbipaistvad. Paks kiht puud või pappi annab juba märgatava absorptsiooni. Seevastu juba õhuke kiht seatina ei lase enam röntgenikiiri läbi. Üldiselt on kerged metallid, nagu alumiinium, naatrium, samuti orgaanilised ained, röntgenikiirte suhtes rohkem läbipaistvad, seevastu rasked metallid — raud, nikkel, vask, eriti aga seatina ja baarium — röntgenikiirtele läbitamatud. Kuidas üks või teine keha röntgenikiiri läbi laseb, seda näitab järgmine katse: hoiame röntgenitoru ees antikatoodi kohal papist ekraani, mille üks pind, ja nimelt torust eemal olev, on kaetud fluorestseeruva ainega (näit. plaatinabaariumtsüanüüriga). Röntgenikiirte toimel fluorestseerub see ekraan. Hoides röntgenitoru ja fluorestseeruva ekraani vahel mitmesuguseid kehi, võime kindlaks teha, kui suurel määral need kehad röntgenikiiri läbi lasevad. Hoides seal näiteks sirklikasti, näeme, et puukast ei anna ekraanil peaaegu mingit varju, seevastu aga tulevad selgesti nähtavale kastis olevate metallesemete varjud, sest viimased ei lase röntgenikiiri läbi.

Hoides toru ja fluorestseeruva ekraani vahel käe, tulevad ekraanil nähtavale käeluude ja lihaste varjud. Et seejuures luud röntgenikiiri vähem läbi lasevad, siis luude varjud eralduvad lihaste varjudest.

Et röntgenikiirte toimel tuhmub fotoplaat, siis võib fluorestseeruva ekraani asemel tarvitada ka fotoplaati, millel pärast vastavat ilmutamist ja kinnistamist jäädvustub v a r j u p i l t. Nii võime ka röntgenikiirte abil fotograafida varjupilti.



Joon. 115. Röntgenikiirte vari.

Kirjeldatud omaduste tõttu kasutavad arstid röntgenikiiri, et kindlaks teha luumurdeid või kehasse sattunud võõrkeha (kuuli) asukohta.

Kõik röntgenikiired ei läbi kehi ühteviisi.

Röntgenikiiri, millede läbitungivus on suur, nimetatakse k õ v a d e k s röntgenikiirteks, kuna kiiri, millede läbitungivus on väike, nimetatakse p e h m e t e k s kiirteks. Katsed näitavad, et röntgenikiired on seda kõvemad, mida kõrgem pinge anda röntgenitorule. Hariliku röntgenitoru abil tekitatud röntgenikiired pole aga ühtlased, vaid sisaldavad mitmesuguse läbitungivusega röntgenikiiri.

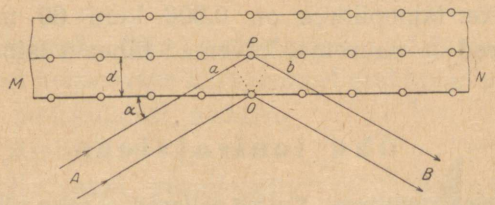
Ka tehnikas kasutatakse röntgenikiiri läbipaistmatute kehade läbivaatamiseks, et kindlaks teha neis esinevaid pragusid, samuti õhumulle valatud metallosades. Eriti laialt tarvita-

takse röntgenikiiri sääraste masinaosade läbivaatamiseks, milledelt nõutakse suurt tugevust ja vastupidavust, nagu aurukatelde, lennukite jt. masinate tähtsamad osad.

Inimese kehasse mõjuvad röntgenikiired kahjustavalt, hävitades kudesid ja tekitades raskesti parandatavaid haavu. See kahjulik mõju on seda suurem, mida kauemini kiired mõjuvad ja mida intensiivsem on kiirgus.

Röntgenikiirtega töötajad kaitsevad endid selle mõju vastu, kandes seatina sisaldavaid rõivaid, kusjuures vaatlemine toimub läbi seatinaklaasi. Ruumi seinad, laed ja põrandad, kus pidevalt töötatakse röntgenikiirtega, kaetakse seatinaplekiga.

Röntgenikiirte kahjulikku mõju inimese keha kudedesse kasutab arstiteadus võitluses pahaloomuliste kasvajate vastu, näiteks vähktõve hävitamiseks (röntgenteraapia).



Joon. 116. Röntgenikiirte peegeldumine.

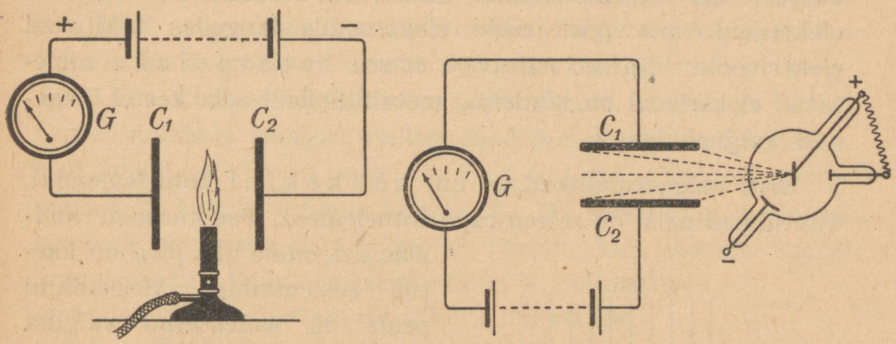
Röntgenikiired levivad sirgjooneliselt ega kaldu, paindu elektri- ning magnetiväljas kõrvale. Sellest järeldas juba Röntgen ise, et need kiired pole moodustatud liikuvaist elektrilaengut kandvaist osakesist, nagu katoodkiired. Röntgen oletas, et tema poolt avastatud kiired on nagu valguskiiredki lainetuse iseloomuga, kuid veel lühema lainepikkusega kui valguskiired. Seda oletust ei suutnud Röntgen katseliselt tõestada. Igale lainetusele on iseloomulik interferents, kuid kaua aega ei suudetud röntgenikiirte interferentsi näidata. Alles aastal 1912 avastas M. Laue meetodi, kuidas võib kindlaks teha röntgenikiirte lainetuse iseloomu ja määrata sel teel nende lainepikkuse.

Laue soovitas seks tarvitusele võtta kristallid, milledes aatomid on oletatavasti paigutatud kindlate kihtidena kindlal kaugusel üksteisest. Laue meetod on liiga keerukas, et seda siin lähemalt seletada. Lihtsam ja arusaadavam on W. H. ja W. L. Bragg'i poolt tarvitusele võetud meetod. Selle nn. Bragg'i meetodi järgi lastakse röntgenikiired langeda hästilihvitud kristallipinnale, kus nad peegelduvad. Röntgenikiired peegelduvad mitte ainult kristalli välispinnal, vaid ka sügavamates kihtides. Kõik need kihid on moodustatud kindla korra järgi paigutatud aatomeist või ioonidest. Vaatleme kahte paralleelset kiirt, milledest üks peegeldub kristalli välispinnal, teine selle all oleval naaberkihil. Pärast peegeldumist liituvad nad, kusjuures nad annavad märgatava tugevuse ainult siis, kui nende käiguvahe on võrdne 1, 2, 3, ... lainepikkusega. Seega peegelduvad röntgenikiired mitte iga nurga, nn. läikenurga α puhul. Määrates α, võime arvutada lainepikkuse. Vastavad mõõtmised on näidanud, et röntgenikiirte lainepikkus on 0,006 kuni 60 mμ, kusjuures pehmed kiired on suurema, kõvemad lühema lainepikkusega.

Õhu ionisatsioon.

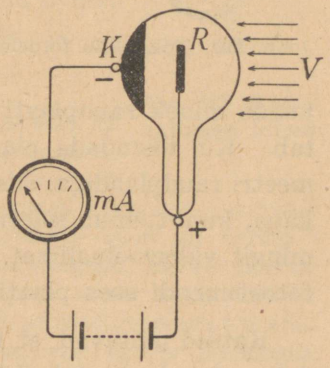
98. **Õhu elektrijuhtivus.** Katsed näitavad, et õhku võib muuta elektrit juhtivaks, ilma et seejuures tarvis oleks kõrget pinget. Asetame kaks metallplaati teineteise lähedale, ühe neist plaatidest ühendame maaga, kuna teise isoleerime. Isoleeritud plaadile anname elektrilaengu, selle pinget näitab siis temaga ühenduses olev elektromeeter. Viime nüüd kahe plaadi vahele põleva küünla: kohe kaob laeng isoleeritud plaadist, mis näitab, et õhk kahe plaadi vahel muutus küünlaleegi toimel elektrit juhtivaks. Seda voolu võib näidata, kui plaate ühendada tundliku galvanomeetri kaudu (117. joon.). Samuti muutub õhk elektrit juhtivaks, kui plaatide-vahelist õhku läbivad röntgenikiired. See õhu omadus elektrit juhtida on ainult ajutine: niipea kui küünlaleek plaatide vahelt kõrvaldada või kui plaatide vahelist õhku ei läbi röntgenikiired, kaob ka õhu elektrijuhtivus. Seda ajutist õhu elektrijuhtivust seletatakse seega, et leegi kõrge temperatuuri toimel tekivad õhus elektriliselt laetud õhuosakesed, mis plaatide-vahelise pinge mõjul liiguvad ja seega teevad õhu elektrit juhtivaks. Neid elektriliselt laetud õhuosakesi nimetatakse gaasiioonideks ja nähtust ennast õhu või gaasi *ionisatsiooniks*.

Seega on õhku läbiv elektrivool moodustatud elektrilaenguid kandvaist aineosakestest, mispoolest see nähtus sarnaneb elektrolüütide elektrijuhtivusega. Katse näitab, et õhk kaotab elektrijuhtivuse, kui kõrvaldada õhu ionisatsiooni tekitav põhjus. Sellest järeldatakse, et gaasiioonide eluiga on lühike ja et isenimeliselt laetud gaasiioonid üksteist neutraliseerivad.



Joon. 117. Õhu ionisatsioon.

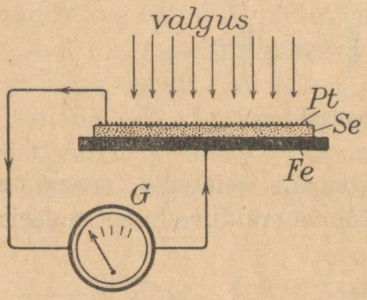
99. Fotoelement. Õhu ionisatsiooni seletame seega, et röntgenikiirtest koosnevate kiirte toimel eralduvad neutraalseist aatomeist ja molekulidest elektronid, mistõttu järelejäänud osa muutub positiivselt laetud gaasiioonideks. Katsed näitavad, et ka tahked kehad, milledele langevad röntgeni- või radioaktiivsete kehade kiired, emiteerivad elektrone. Ka nähtavad valguskiired on võimelised eraldama mõnedest tahketest kehadest elektrone. Säärastest ainetest on tuntuimad leelismetallid kaalium, naatrium, tseesium jt. Sellel nähtusel põhineb **fotoelement.** Fotoelement koosneb õhutühjast klaaspirnist. Osa klaaspirni sisemist pinda on kaetud näiteks kaaliumiga, see metallikiht moodustab katoodi *K*, kuna teine elektrood, anood *R*, asetseb klaaspirni keskel. Viimane on tavaliselt võre-



Joon. 118. Fotoelement.

taoline. Kui nüüd metallikiht ühendada galvanomeetri kaudu vooluallika negatiivse poolusega, teine elektrood aga vooluallika positiivse poolusega, siis galvanomeeter voolu ei näita, kui fotoelement on pimedas. Langeb aga fotoelemendi metallikihile valgus, siis viimase toimel hakkavad metallikihist väljuma elektronid, mis positiivsele elektroodile langedes tekitavad elektrivoolu. Katsed näitavad, et see fotovooluks nimetatud elektrivool on võrdeline metallikihile 1 sek. kestel langenud valgushulgaga.

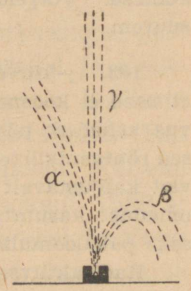
Eriti valgustundlikud on nn. tõkkekihi fotoelemendid. Tuntuimad neist on seleen-raua fotoelement. See koosneb raudplaadist, mille üks pind on kaetud seleenikihiga. Seleenikihi peale on sadestatud valgust läbilaskev, äärmiselt õhuke kiht plaatinat. Viimane on üheks elektroodiks, kuna teiseks elektroodiks on raudplaat. Kui valgustada läbi plaatinakihi seleeni, siis vabanevad valguse toimel seleenist elektronid, mis liiguvad plaatinakihti, kuna nende minek raudplaati on tõkestatud, nagu seda katse näitab. Kui ühendada plaatinakiht traadi kaudu läbi galvanomeetri raudplaadiga, siis tekib selles elektrivool, mis kestab niikaua, kuni toimub seleeni valgustamine. Seega siin pole tarvis mingit välisvooluallikat. Voolu tehniline suund on seejuures fotoelemendi sees plaatinakihist raudplaati.



Joon. 119. Tõkkekihi fotoelement.

Katsed näitavad, et ka selles fotoelemendis on fotovool võrdeline 1 sek. kestel fotoelemendile langenud valgushulgaga, seega valgustustugevusega. Fotoelemendid, eriti aga tõkkekihi fotoelemendid leiavad laialdast kasutamist valgusreleedena helifilmis ja kõigepealt fotomeetritena. Kui fotovoolu mõõtev galvanomeeter on kaliibritud mitte ampreis ega selle osades, vaid luksides, siis nimetatakse sellist riista luksmeetriks.

100. Radioaktiivsed kehad. Aastal 1896, seega varsti pärast röntgenikiirte avastamist, pani prantsuse füüsik H. Becquerel tähele, et uraani sisaldavad ühendid kiirgavad silmale nähtamatuid kiiri, mis nagu röntgenikiiredki mõjuvad fotoplaadisse tuhmistavalt, ioniseerivad õhku ja tungivad mitmetest kehadest läbi. Hiljemini õnnestus abielupaaril Pierre ja Marie Curie'l eraldada maagist, millest saadakse uraani, uusi tundmatuid aineid, p o l o o n i u m i ja r a a d i u m i, mis neid nähtamatuid kiiri palju rohkem kiirgavad. Nii näiteks on raadiumil see omadus umbes miljon korda suurem kui niisama suurel hulgal uraanil. Seda uraani, raadiumi jt. kehade omadust kiirata nähtamatuid kiiri, hakati kutsuma **radioaktiivsuseks** ja kehi endid **radioaktiivseiks.** Raadiumi leidub uraani sisaldavas pigiläikes vähe: selle 1 tonnist saadakse vaevalt 1 mg raadiumi.



Joon. 120. Radioaktiivsed kiired.

Juhtides radioaktiivsete kehade kiired läbi elektri- või magnetivälja, lahutuvad nad 3 liiki kiirteks, mida tuntakse nüüd α-, β- ja γ-kiirte nime all.

101. α-kiired. Nagu katoodkiirte puhul, võib ka α-kiirte lähemaks määramiseks kasutada nende paindumist elektri- ja magnetiväljas. Vastavad uurimised on näidanud, et α-kiired on moodustatud kiiresti liikuvaist positiivselt laetud aineosakestest, nn. α-osakestest. α-osakese mass on võrdne 4 vesinikuaatomi massiga ja laeng 2 elementaarlaenguga. Sellest järeldatakse, et α-osake on kahe elementaarlaenguga laetud heeliumiaatom. Seda väidet tõestasid ka katsed, mis näitasid, et raadiumipreparaat eraldab gaasi, mis lähemal uurimisel spektraaltorus osutus heeliumiks. α-kiirte kiirus on 5—20% valguse kiirusest, kuid nende läbitungivus kehadest pole suur. Seejuures α-kiired ioniseerivad õhku tervel oma teel.

Suure kineetilise energia tõttu on üksik α-osake võimeline tekitama efekti, mis on nähtav paljale silmale. Langeb α-osake näiteks tsinksulfiidiga kaetud ekraanile, siis tekitab ta sellel kohal helenduse, mida võib pimedas näha isegi palja silmaga. Säärast α-kiirte omadust nimetatakse s t s i n t i l a t s i o o n i k s.

α-kiirte stsintilatsiooni kasutatakse pimedas nähtavate kellade juures: neil kelladel on numbrid numbrilaual joonistatud tsinksulfiidiga või mõne teise fluorestseeruva ainega, millesse segatud pisut radioaktiivset ainet (tooriumi). Tooriumi α-kiirte toimel helendub tsinksulfiit seal kohal, kuhu langeb α-osake. Selle tulemuseks on tsinksulfiidi seguga kaetud numbrite nähtavaks muutumine. Luubi all vaadeldes koosneb see helendus üksikutest mikroskoopilistest plahvatustest.

α-osakeste stsintilatsiooni kasutatakse nende loendamiseks. Vastavad mõõtmised näitavad, et 1 g raadiumi kiirgab 1 sekundi kestel $15{,}7 \cdot 10^{10}$ α-osakest.

102. β-kiired. β-kiirte paindumise suunast ja suurusest magneti- ja elektriväljas tuleb järeldada, et need kiired on moodustatud liikuvaist elektronidest, kannavad seega negatiivset laengut ja on samased katoodkiirtega, ületavad aga viimaseid kiiruselt: β-kiirte kiirus on 30—99% valguse kiirusest. β-kiired ioniseerivad õhku, kuigi väiksemal määral kui α-kiired. Võrreldes α-kiirtega on aga β-kiirte läbitungivus kehadest suurem.

103. γ-kiired ei paindu elektri- ja magnetiväljas, millest järeldatakse, et need ei koosne elektriliselt laetud osakestest. γ-kiirte suur läbitungivus kehadest põhjustab oletuse, et siin on tegemist kiirtega, mis sarnased röntgenikiirtega, kuid on veelgi lühema lainepikkusega. γ-kiired mõjuvad kahjustavalt elava organismi rakkudesse. Seda viimast γ-kiirte omadust kasutatakse, nagu röntgenikiirtegi puhul, arstiteaduses võitluseks pahaloomuliste kasvajate vastu.

Radioaktiivsete ainete kiirgust ei mõjusta ükski füüsikaline protsess, näiteks kõrge temperatuur. Samuti ei olene see kiirgus sellest, kas radioaktiivne aine moodustab ühe või teise keemilise ühendi. Tähendab, ka keemilised protsessid ei mõjusta seda kiirgust.

Üheks radioaktiivse aine eriliseks omaduseks on nähtus, et ta pidevalt tekitab soojust. Nii näiteks 1 g raadiumi tekitab 1 tunni kestel 118 cal soojust. See nähtus on seda imelikum, et raadiumi kiirgus seejuures märgatavalt ei muutu.

104. Emanatsioon. Raadiumi ümbritsev õhk on tugevasti ioniseeritud.

Kui radioaktiivne preparaat ära viia ja õhust kõrvaldada ioonid, siis mõne aja pärast tekivad ioonid uuesti.

Siit järeldatakse, et raadium eraldab gaasitaolist ainet, mis samuti on radioaktiivne. Seda gaasi nimetatakse **emanatsiooniks**, ta aatomkaal on 222. Hiljemini õnnestus emanatsiooni eraldada teistest gaasidest ja teda isegi veeldada.

Emanatsioon on inertne gaas nagu heeliumgi ega moodusta mingeid keemilisi ühendeid.

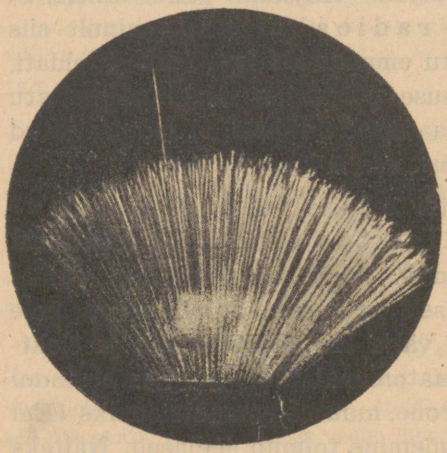
105. Lagunemise teooria. Abielupaar Curie'd avastasid aastal 1899, et kehad, mis radioaktiivse preparaadiga olid ühes ruumis, muutusid radioaktiivseiks. Hiljemini pandi tähele, et see nn. indutseeritud radioaktiivsus ainult siis tekkis, kui keha puutus kokku emanatsiooniga. Siit järeldati, et indutseeritud radioaktiivsuse põhjustas mingi nähtamatu aine, mis sadestus kehale. Vaatlused näitasid, et indutseeritud radioaktiivsus mõne aja pärast kadus.

Kõigile neile nähtustele tõi selguse nn. radioaktiivsete kehade lagunemise teooria, mille püstitasid füüsikud Rutherford ja Soddy. Selle teooria järgi radioaktiivse aine aatom, mis üldiselt on suure aatomkaaluga, pole püsiv, vaid laguneb, paisates välja heeliumiaatomeid ja elektrone. Nii näiteks raadium (aatomkaal 226), kiirates heeliumi (He aatomkaal on 4) ja elektrone, muutub emanatsiooniks (Em aatomkaal on 222). See lagunemine toimub aeglaselt. Näiteks lagunevad pooled raadiumiaatomid 1580 aasta jooksul. 1580 a. on raadiumi poolestusiga. Emanatsioon on veelgi vähem püsiv, ta poolestusiga on 3,85 päeva. Nii kestab lagunemine edasi. α-osakese kiirgamisel väheneb aatomkaal 4 võrra, kuna β-osakese kiirgamisel ta aatomkaal ei muutu. Lõpuks tekib aine aatomkaaluga 206, mis osutub mitte-radioaktiivseks aineks. See aine on seatina. Seatina on seega selle lagunemise lõppsaadus.

On kindlaks tehtud, et mitte raadium pole aine, millega see lagunemine algab, vaid selleks on uraan (Ur aatomkaal on 238). Uraan on seega teiste radioaktiivsete ainete esiema. Peale uraani perekonna tuntakse veel kahte radioaktiivset perekonda (aktiiniumi ja tooriumi perekond).

106. Wilsoni udukamber. Üheks parimaks abinõuks uurida α-, β- jt. osakeste kiiri on 1902. a. C. T. R. Wilsoni leiutatud udukamber. Wilsoni udukambri abil on võimalik nähtavaks teha α-, β- jt. kiirte teid, samuti fotograafida neid. Wilsoni udukamber põhineb nähtusel, et üleküllastatud veeaur kondenseerub veeks ainult nn. kondensatsioonituumade

ümber, milledeks on õhuioonid. Wilsoni udukamber koosneb anumast, milles on radioaktiivse aine preparaat, näiteks raadium. Kui nüüd samas ruumis veeaur üleküllastada, siis α-kiired, läbides üleküllastatud veeauru, tekitavad oma teel ioone, mis moodustavad kondensatsioonituumad. Seetõttu tulevad α-kiirte teed nähtavale helehallide uduteedena. Eriti selgelt on need uduteed nähtavad mustal foonil, kui neid kõrvalt valgustada.



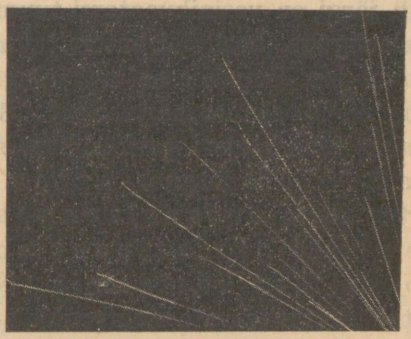
Joon. 121. α-osakeste udutee.

107. Aatomi ehitus. Aatomid on tavaliselt elektriliselt neutraalsed. Et aatomid sisaldavad elektrone, seda nägime fotoefekti tundmaõppimisel, samuti ka Edisoni efekti puhul ja mujal. Sellest peame järeldama, et aatomid sisaldavad ka positiivset laengut, mida neutraliseerivad temas leiduvad elektronid. Milline on elektrilaengute paigutus aatomis, seda võib järeldada α- jt. kiirte hajumisest läbiminekul kehadest.

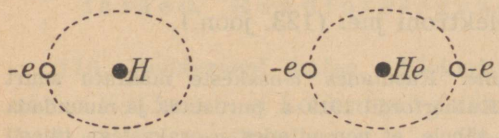
α-osakeste tee ja hajumine läbiminekul kehadest tehakse seejuures nähtavaks Wilsoni udukambris või stsintilatsiooni teel. Rutherford jt. määrasid α-kiirte hajumise läbiminekul kehadest seega, et nad asetasid α-kiirte teele õhukese metallilehe, kusjuures stsintilatsiooni teel määrati kindlaks hajumata läbi metallilehe tulnud α-osakesed, samuti ka selles hajunud α-osakesed. Vastavad uurimised näitasid, et suur osa läbi metallilehe tulnud α-osakesi hajub väikesi nurgi, mis ei ületa 2—4°. See hajumisnurga suurus oleneb ka metallilehe ainesest. Väga väike osa metallilehele langenud α-osakestest heidetakse aga tagasi, s. o. nende paindumine on üle 90°. Samasugused nähtused esinevad ka α-osakeste läbiminekul õhust. 122. joon. kujutab α-osakese teed õhus. Joonisel on näha, et α-osakese tee järsku murdub, mis esineb harva, üldiselt on α-osakeste tee õhus sirgjooneline.

Nähtus, et α-osakeste tee õhus on üldiselt sirgjooneline, olgugi et ta seejuures pidi kokku puutuma kümnete tuhandete

aatomitega, näitab, et α-osake võib läbida aatomit. Teisest küljest α-osakese hajumisnähtusest ja nende tagasipõrkamisest järgneb, et aatomis peab olema niisugune osa, mis α-osakestele on läbitamatu. Sääraseks osaks ei või olla elektron, sest elektroni mass on selleks liiga väike. Jääb üle ainult oletus, et selleks on aatomi mass, mis peab omama positiivset laengut, et neutraliseerida aatomis olevaid elektrone. Et α-osakese hajumine üle 90^0 toimub väga harva, siis sellest peame ka järeldama, et aatomi mass on koondatud võrdlemisi väikesesse aatomi ruumalasse. Arvestades kõiki katselisi uurimisi, püstitas E. Rutherford järgmise oletuse aatomi ehituse kohta. Rutherfordi järgi koosneb aatom tuumast ja seda ümbritsevast kattest (kestast). Aatomi tuum omab positiivset laengut ja sinna on koondatud kogu aatomi mass. Ta läbimõõt võrreldes aatomi läbimõõduga on väga väike. Tuuma positiivset laengut neutraliseerivad tuuma kattena ümbritsevad negatiivselt laetud elektronid, seejuures tuuma positiivne laeng sisaldab nii mitu elementaarlaengut, kui mitu elektroni ümbritseb tuuma. Rutherfordi aatomimudel on täies kokkukõlas eespool-kirjeldatud katseliste tulemustega. Tõepoolest, oletades, et kogu aatomi positiivne laeng on koondatud aatomituuma, mille läbimõõt võrreldes aatomi kogu-läbimõõduga on väga väike, on meil arusaadav, miks α-osakeste tagasipõrka-



Joon. 122. α-osakeste paindumine.



Joon. 123. H ja He aatomid.

mine kehade läbimisel toimub väga harva. Muu osa aatomist on aga α-osakestele läbitav, sest elektronid ei takista α-osakeste liikumist märgatavalt. Et α-kiirte hajumine mitmesugustes kehades on isesuurune, siis võib sellest järeldada, et mitmesuguste ainete aatomituuma laengud on eri suurused. Rutherfordi järgi on vesinikuaatomi tuuma laeng võrdne ühe elementaarlaenguga, heeliumi aatomituuma laeng kaks elementaarlaengut jne. Suurima aatomkaaluga elemendi — uraani tuumalaeng on 92 elementaarlaengut. Seejuures vesiniku järjestusnumber Mendelejevi perioodilises süsteemis on 1, heeliumil 2, uraanil 92. Siit järgneb: aatomituuma laeng on nii mitu elementaarlaengut, kui suur on selle elemendi järjestusnumber Mendelejevi perioodilises süsteemis. Niisama suur on ka aatomit kestana ümbritsevate elektronide arv. Seega aatomi keemilised omadused määrab ära aatomituuma laeng, mis võrdub aatomikesta elektronide arvuga, mitte aga aatomkaal. Selle nähtusega seletub isotoopide olemasolu. Isotoopideks nimetasime mitmesuguse aatomkaaluga ühe ja sama keemilise aine aatomeid. Isotoopidel on üks ja sama tuumalaeng, kuid erinev aatomkaal.

Rutherfordi teooriat täiendas hiljemini taani füüsik N. Bohr. Selle teooria järgi tiirlevad elektronid tuuma ümber nagu planeedid päikese ümber. Vesinikutuuma ümber tiirleb 1 elektron, heeliumituuma ümber 2 elektroni jne. (123. joon.).

108. Aatomite purustamine. Kasutades α-osakeste määratu suurt kineetilist energiat, õnnestus Rutherfordil 1919. a. purustada ja muundada keemilisi elemente. Ta pani tähele, et pommitades α-osakestega täiesti kuiva ja puhast lämmastikku, lähtusid sellest suure kiirusega osakesed, mis osutusid ioniseeritud vesinikuaatomeiks. Sellest järeldas Rutherford, et α-osake, kokku põrgates lämmastikuosakesega, purunes ja sellest eraldus vesinikuioon, H-osake. Hilisemad uurimised näitasid, et siin α-osake liitus lämmastikuaatomi ülejäänud osaga, mille tagajärjel tekkis sellest hapnikuaatom. Seega oleks õigem nimetada seda nähtust aatomi muundumiseks. Peale lämmastiku on õnnestunud muundada tervet rida keemilisi elemente, nagu naatriumi, alumiiniumi jne. Need katsed näitavad, et aatomituuma üheks osaks on vesinikuioon, mida nimetatakse ka prootoniks.

109. Neutron, positron. Peale prootoni ja elektroni on viimasel ajal avastatud veel kaks elementaarosakest. Pommitades α-osakestega berülliumi, avastas füüsik J. Chadwick, et α-osakeste toimel kiirgab berüllium määratu suure läbitungimisvõimega kiiri. Neid kiiri lähemalt uurides leiti, et nad koosnevad osakestest, millede mass on võrdne vesinikuaatomi massiga, kuid laengu suurus on null. Neid osakesi nimetati *neutroniteks*. Neutron on seega vesinikuaatomi tuum, kuid ilma laenguta. Neutroni järjestusnumber on seega null. Neutroni suur läbitungimisvõime oleneb temal laengu puudumisest, seetõttu aatomit läbides ei muutu ta liikumistee aatomis leiduvate elektrilaengute toimel. Ainult väga harva, ja nimelt siis, kui ta aatomituumaga kokku põrkab, kaldub ta oma sirgjoonelisest teest kõrvale.

Aastal 1932 avastas füüsik C. Anderson udukambri abil elementaarosakese, mis lähemal uurimisel osutus elektroni massiga, kuid positiivse elementaarlaenguga osakeseks. Seda elementaarosakest nimetas ta *positiivseks elektroniks* ehk *positroniks*. Positroni laengu suuruse ja massi määras ta selle liikumistee paindumisest magnetiväljas. On põhjust oletada, et positron pole püsiv.

Seega on seniajani kindlaks tehtud järgmised elektri ja aine algosakesed: *prooton*, *elektron*, *neutron* ja *positron*. Kas kõik need neli on jagamatud algosakesed või on neutron prootoni ja elektroni kombinatsioon, või prooton neutroni ja positroni ühendus, see küsimus on veel lahtine.

Elektrivõnkumised ja elektromagnetilised lained. Raadiotelegraaf ja -telefon.

110. Fedderseni katse. Elektrivõnkumine. Aastal 1858 näitas Feddersen, et Leideni purgi tühjenemine toimub võnkuva vooluna ehk ostsillatoorselt, s. o. kondensaator ei tühjene ühe sädemena, vaid elektrilaeng tühjenemisel võngub ühelt plaadilt teisele.

Feddersen tarvitas selle nähtuse avastamisel pöörlevat peeglit, mille abil ta pildistas kondensaatori tühjenemissädet nii, nagu võib pildistada liikuvat eset ülikiiresti liikuvale fotolindile.

Ühte sel teel saadud tühjenemissädeme ülesvõtet kujutab 124. joonis. Nagu sellest näha, koosneb kondensaa-

tori tühjenemissäde hulgast üksteisele järgnevaist vahelduva suunaga sädemeist.

Kondensaatori tühjenemist perioodilise elektri võnkumisena võime võrrelda vedeliku kõrguste vahe tasandumisega U-torus. 125. joonis kujutab vedeliku olekut U-torus võnkumise alguses: paremas harus on vedeliku tase kõrgem, seega seal olev vedelik omab teatud hulga potentsiaalset energiat. $\frac{1}{4}$ perioodi pärast on vedeliku tase mõlemas anumas ühekõrgune, kuid selles olekus voolamine veel ei lõpe, sest vedelik omab nüüd kineetilist energiat: inertsi tõttu voolab vedelik edasi ja $\frac{1}{2}$ perioodi pärast on vedelik tõusnud vasemas harus kõrgemale kui paremas. Ühtlasi on vedeliku energia muutunud uuesti potentsiaalseks



Joon. 124. Fedderseni katse.

energiaks. Nüüd kordub nähtus uuesti. 1 perioodi pärast on pilt nagu algul, ainult et vedeliku kõrguste vahe on pisut väiksem. Nii toimub siin vedeliku võnkumine, kuni ta lõpuks hõõrdumistakistuse tõttu vaibub.

Samasugune nähtus toimub kondensaatori tühjenemisel.

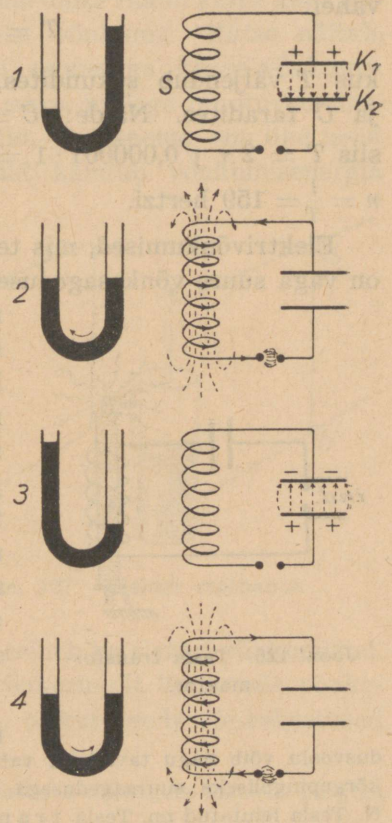
125. joonisel on kujutatud ka kondensaatori tühjenemine läbi eneseinduktsiooni. Viimane on kujutatud sümboolselt spiraalina. Võnkumise alguses kondensaatori ülemine plaat on laetud positiivselt, alumine negatiivselt, nende vahel on elektriväli. Voolu ei ole.

Läbi sädemiku andub edasi elektrisäde. Kondensaator hakkab tühjenema, $\frac{1}{4}$ perioodi pärast on voolutugevus maksimaalne, kusjuures plaatide-vaheline pinge on null. Seevastu on eneseinduktsioonipoolis tekkinud magnetiväli. Vool kestab edasi, sest magnetivälja kadumisega tekib samasuunaline ekstravool.

Seetõttu laeb kondensaator enda uuesti, kusjuures nüüd alumine plaat omandab positiivse, ülemine negatiivse laengu. Elektrivälja suund nende vahel on nüüd vastupidine. Magnetiväli nõrgeneb, $\frac{1}{2}$ perioodi pärast muutub see nulliks.

Nähtus kordub. Elektriväli plaatide vahel kaob, selle asemel tekib eelmisega vastassuunaline magnetiväli, sest nüüd on ka voolu suund vastupidine.

1 perioodi pärast on algseis uuesti saavutatud. Nagu siit nähtub, iseloomustab seda nähtust vaheldumisi tekkivad elektri- ja magnetiväljad. Seega kondensaatorile antud energia muutub vaheldumisi elektri- või magnetivälja energiaks. Analoogiliselt muutub U-torus olevale veele antud energia vaheldumisi potentsiaalseks ja kineetiliseks energiaks: vesi võngub. Niisugune ostsillatoorne elektrivool tekib ka siis, kui kondensaatori tühjendamine toimub läbi keerdudeta traadi (tühjendaja), sest ka siis tekib juhtme ümber magnetiväli.



Joon. 125. Võnkumise faasid.

Vooluahelat, mis koosneb mahtuvusest (kondensaatorist) ja eneseinduktsioonist (poolist), nimetatakse **võnkeringiks** ehk **võnkeahelaks**.

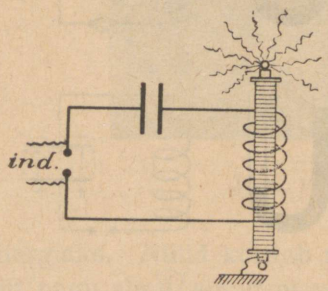
111. Thomsoni valem. Fedderseni katse abil võime määrata, kuidas oleneb elektri võnkesagedus, seega ka periood võnkeahelasse lülitud mahtuvusest ja eneseinduktsioonist.

Vastavad mõõtmised näitavad, et kui mahtuvust või induktiivsust suurendada näiteks 4 korda, siis periood suureneb 2 korda. Teoreetilisel teel tuletas W. Thomson valemi, mis annab seose võnkeperioodi T, mahtuvuse C ja induktiivsuse L vahel:

$$T = 2\pi \sqrt{LC},$$

kus T väljendub sekundites, kui L on väljendatud henrides ja C faradites. Näide: $C = 1$ mikrofarad ja $L = 1$ henri, siis $T = 2\pi \sqrt{0{,}000001 \cdot 1} = 0{,}0063$ sek. Seega võnkesagedus $n = \frac{1}{T} = 159$ hertzi.

Elektrivõnkumised, mis tekivad Leideni purgi tühjenemisel, on väga suure võnkesagedusega: mõnest sajast tuhandest kuni mitme miljoni hertzini; vastavalt sellele on võnkeperiood väga lühike. Sääraseid väga lühikese perioodiga võnkumisi nimetatakse raadiotehnikas *suur-* ehk *kõrgesagedusega* võnkumisteks, vastandina *väike-* ehk *madalsagedusega* võnkumistele, mille võnkesagedus on võrdne kuuldava hääle võnkesagedusega.



Joon. 126. Tesla transformaator.

112. Tesla transformaator. Leideni purgi tühjenemisel tekkinud suursagedusvoolu võib nagu tavalistki vahelduvvoolu transformaatori abil muuta kõrgepingeliseks suursagedusega vooluks. Seks tarvitatakse ungarlase N. Tesla leiutatud nn. Tesla *transformaatorit*, mille skeem on antud 126. joonisel. Selle transformaatori sekundaarseks mähiseks on suure keerdude arvuga pool. Ühendades selle pooli ühe traadiotsa maaga, hakkab elektrit teise otsa kaudu kõrgepinge tõttu õhku voolama; tekivad tugevad elektrisädemed. Tesla suursagedusega vool ei avalda inimese kehale füsioloogilist toimet, mistõttu võib teda vabalt kehast läbi lasta.

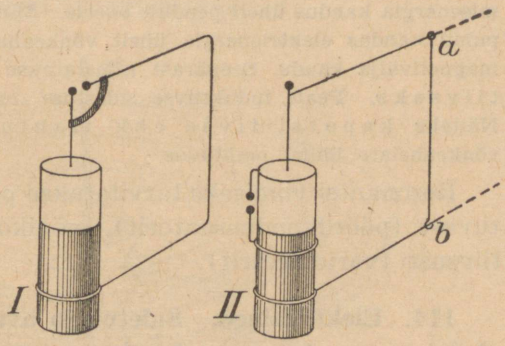
Katsed ja arvutused näitavad, et suursagedusega vool levib ainult mööda juhtmete pinda.

Lähendades Tesla transformaatori sekundaarsele poolile elektroodita hõrendustoru, hakkab see juba kaugelt helendama: suursagedusega kõrgepingeline vool indutseerib torus elektrivoolu.

Suursagedusega voolu tarvitatakse sageli arstide korraldusel soojuse tekitamiseks inimese kehas.

Miks ei või harilikku elektrivoolu tarvitada soojuse tekitamiseks kehas?

113. Elektri resonants. Riputame ühise raami külge kaks isepikkust pendlit. Paneme ühe neist võnkuma. Katse näitab, et teine pendel üldiselt ei hakka esimesega kaasa võnkuma. Teeme mõlemad pendlid ühepikkuseks, millega muutuvad ühesugusteks ka nende võnkeperioodid, ja paneme siis ühe neist võnkuma. Katse näitab, et nüüd kandub võnkumisenergia ühelt pendlilt teisele. Seda nähtust nimetatakse **resonantsiks** ja pendlite kohta öeldakse: nad on resonantsis.



Joon. 127. Elektri resonants.

Samuti näitab katse, et võnkumisenergia kandub ka ühelt helihargilt teisele, kui nende võnkekestused on võrdsed, s. o. kui nad on resonantsis.

Samasugune resonantsinähtus esineb ka elektri võnkumistel. Ka elektrienergia kandub ühelt võnkeringilt üle teisele võnkeringile, kui nad on resonantsis, s. o. kui nende võnkekestused on võrdsed.

Elektri resonantsi võib demonstreerida 2 ühesuguse Leideni purgiga (127. joon.).

Leideni purk I ja lookapainutatud traat moodustavad ühe võnkeahela, teiseks võnkeahelaks on samasugune Leideni purk II traatjuhtmega, kuid selle juhtme pikkust, seega ka eneseinduktsiooni võib muuta traadi liikuva osa *ab* edasi-tagasi nihutamisega. Purgid asetatakse teineteise kõrvale nii, et nende välisjuhtmed oleksid paralleelsed. Mõlemad võnkeringid on varustatud sädemikuga. Kui nüüd ühte Leideni purki laadida sädeinduktoriga, siis tekib sädemiku kuulide vahel säde, kusjuures Leideni purgi tühjenemine toimub ostsillatoorselt.

Teise purgi välisjuhtme liikuvat osa edasi-tagasi nihutades leiame sellise asendi, mille puhul ka teises purgis tekivad väikesed sädemed, mis

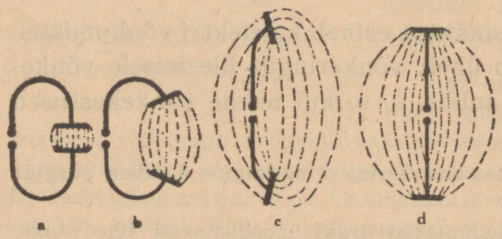
näitab, et ka teises võnkeahelas toimub elektri võnkumine. Seega kandus võnkumisenergia ühelt võnkeahelalt teisele. Kaasavõnkumise puhul on mõlemad võnkeringid teineteisega resonantsis. Nihutame liikuva juhtmeosa kohalt ära — kohe kaob ka säde, võnkeahelad pole enam resonantsis.

Võnkumisenergia ülekandumist ühelt võnkeahelalt teisele seletame seega, et esimese võnkeahela võnkuv vool tekitab teises võnkeahelas võnkumise induktsiooni teel, kusjuures see võnkumine on märgatav ainult resonantsi puhul.

Et võnkumisenergia ühelt võnkesüsteemilt teisele üle kanduks, seks peab nende vahel mingi side olema ehk, nagu öeldakse, nad peavad olema *sidestatud*. Kahe pendli puhul oli seks ühine alus, mille kaudu võnkumisenergia kandus ühelt pendlilt teisele. Siinkirjeldatud elektri resonantsi puhul kandus elektrienergia ühelt võnkeahelalt teisele induktsiooni teel magnetivälja kaudu. Seepärast nimetatakse seda sidestusviisi *induktiivseks*. Peale induktiivse sidestuse tuntakse veel teisi sidestusi. Näiteks *kapatsitiivse ehk mahtuvuse* sidestuse moodustab võnkeahelate ühine mahtuvus.

Resonantsi viimiseks tarvitatakse peamiselt muutlikku mahtuvust (pöördkondensaatorit), mõnikord ka muutlikku induktiivsust (variomeetrit).

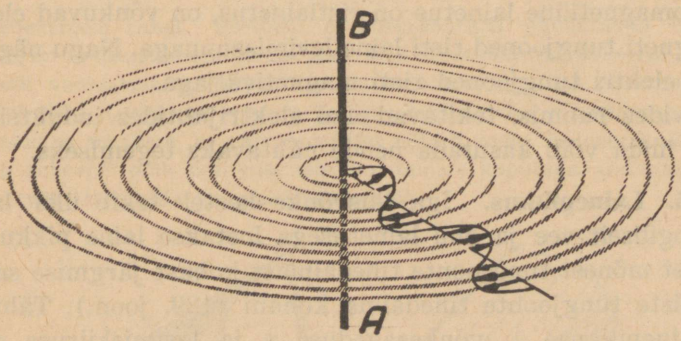
114. Elektrilained. Suletud ja avatud võnkeahel. Võnkeahelat, mis koosneb kondensaatorist ja juhtmest, nimetatakse suletud võnkeahelaks, sest elektri tungjooned leiduvad peamiselt ainult kondensaatori plaatide vahel. Elektri ja magneti tungjooni kiirgab välja ainult avatud võnkeahel, mille saame, kui kondensaatori plaadid paigutame traadi otstesse. Sel juhul on elektri tungjooned keskmises osas ligikaudu paralleelsed. Magneti tungjooned on seejuures, nagu juba varemini nägime, risti voolujuhtmega, seega risti ka elektri tungjoontega. 128. joonisel on kujutatud suletud võnkeringi üleminek avatud võnkeringiks.



Joon. 128. Suletud võnkeahela üleminek avatud võnkeahelaks.

Lihtsama avatud võnkeahela moodustavad kaks sirget traati, mis teineteisest eraldatud sädemikuga. Mõlemad pooled on ühendatud sädeinduktoriga, mille abil laetakse võnkeahel. Kondensaatori plaadid on siin asendatud kahe traadiotsaga, mis omavad väga väikest mahtuvust, samuti ka väga väikest induktiivsust. Säärast avatud võnkeahelat nimetatakse Hertzi **vibraatoriks** ehk **ostsillaatoriks.** Niisuguse vibraatori võnkesagedus on väga suur.

Laeme vibraatori sädeinduktori abil, kuni pinge tõuseb traatide vahel nii kõrgele, et tekib säde. See säde toimub siin, nagu eelmisest teame, elektrivõnkumisena.



Joon. 129. Elektromagnetilised lained.

Sädeme kaudu moodustavad vibraatori pooled kokku sirge juhtme, millel elektrilaeng võngub ühest otsast teise. Hetkel, mil vibraatori ülemine ots on laetud positiivselt, alumine negatiivselt, lähevad elektri tungjooned ülalt alla. Pinge on vibraatori ülemises otsas maksimaalne, alumises minimaalne, keskel null. Nüüd hakkab elekter ülalt alla liikuma suureneva vooluna, tekitades keskel sädeme. Ühtlasi hakkavad elektri tungjooned ära kaduma. Seevastu tekivad elektrivoolu ümber ringikujulised magneti tungjooned. Voolu tugevus on maksimaalne vibraatori keskkohal, otstes null. Magneti tungjooned on seejuures vibraatori sihiga risti, seega risti ka elektri tungjoontega. Magnetivälja tugevus on maksimaalne $\frac{1}{4}$ perioodi pärast, siis,

kui voolutugevus on samuti maksimaalne ja vibraator ilma laenguta. Sellest hetkest alates hakkavad magneti tungjooned kaduma, kuid eneseinduktsiooni tõttu vool kestab edasi ja ½ perioodi pärast on vibraatori otsad võrreldes endisega vastupidiselt laetud, samuti on ka vastupidine elektri tungjoonte suund. Nüüd hakkab elekter voolama eelmisega vastassuunaliselt, tekitades ka eelmisega vastassuunalise magnetivälja. Seega elektri võnkumisel avatud vibraatori ümber tekivad perioodiliselt elektri ja magneti tungjooned ja need levivad valguse kiirusega ruumis. Säärast energia levimist nimetatakse **elektromagnetiliseks lainetuseks.** Elektromagnetiline ehk **elektrilaine** on ruumis leviv võnkuv elektri- ja magnetiväli. Et elektromagnetiline lainetus on ristlainetus, on võnkuvad elektri ja magneti tungjooned risti laine levimissuunaga. Nagu nägime, on ka elektri tungjooned risti magnetiväljaga.

Levides ruumis, tekitavad nad elektrijuhtides induktsioonvoolu, mida võib kasutada nende nähtavaks tegemiseks.

115. Lainepikkus. Iga täisvõnke kestel tekib üks laine. Analoogiliselt vee ja õhu lainetusega loetakse laine pikkuseks kaugust mõnest tungjoonte tihedaimast kohast järgmise samasuunaliste tungjoonte tihedaima kohani (129. joon.). Tähistades lainepikkuse λ, võnkesageduse n ja levimiskiiruse c-ga, võime kirjutada järgmised võrrandid: $c = n\lambda$ ja $n = \frac{1}{T}$, kus T on periood. Elektromagnetilisi laineid kasutatakse teadete, kõne ja muusika traadita edasisaatmiseks läbi ruumi, mis edasisaatmist nimetatakse r a a d i o k s. Lainepikkus, mida seks otstarbeks tarvitatakse, ulatub mõnest meetrist mõneteistkümne tuhande meetrini.

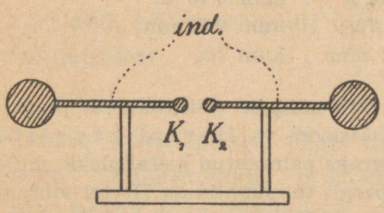
Iga raadiosaatejaam töötab kindlal lainepikkusel, mis üldiselt antakse teada raadioteadetes.

1. Lainepikkus on 425 m. Kui suur on sellele vastav võnkesagedus?

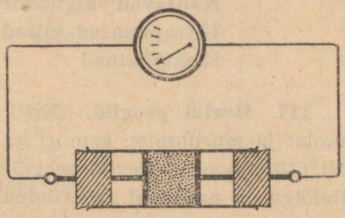
2. Thomsoni valemi järgi $T = 2\pi\sqrt{CL}$. Leia seos, kuidas oleneb lainepikkus λ võnkeahela mahtuvusest C ja induktiivsusest L.

116. Hertzi katsed. Elektrilained avastas saksa füüsik H. Hertz 1888. a., mistõttu elektrilaineid, eriti neid, millede lainepikkus vastab Hertzi poolt kasutatud lainepikkusele, nimetatakse H e r t z i l a i n e t e k s. Ta

tarvitas seejuures elektrilainete tekitamiseks vibraatorit, mis kujutatud 130. joonisel. Nende vastuvõtmiseks kasutas ta traatrõngast sädemikuga. Paremini võib elektrilaineid nähtavaks teha k o h e e r e r i abil (131. joon.). See koosneb nikli- või rauapuruga täidetud klaastorust, mis asetseb kahe

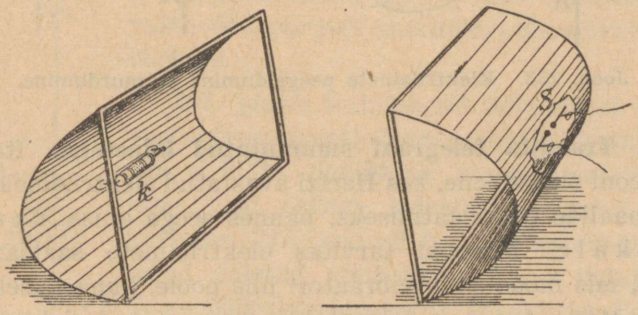


Joon. 130. Hertzi vibraator.



Joon. 131. Koheerer.

metallelektroodi vahel. Seetõttu, et puruosakesed puudutavad üksteist nõrgalt, on ta takistus võrdlemisi suur. Kui lülida säärane koheerer elektrielemendi vooluahelasse järjestikku galvanomeetriga, siis galvanomeeter voolu ei näita. Langevad koheererile aga elektrilained, siis väheneb koheereri takistus seevõrra, et galvanomeeter näitab voolu. Lainete kustumisel kaotab koheerer oma juhtivuse siis, kui temale koputada. Galvanomeetri asemel võib tarvitada ka elekterkõlistajat.



Joon. 132. Hertzi peeglid.

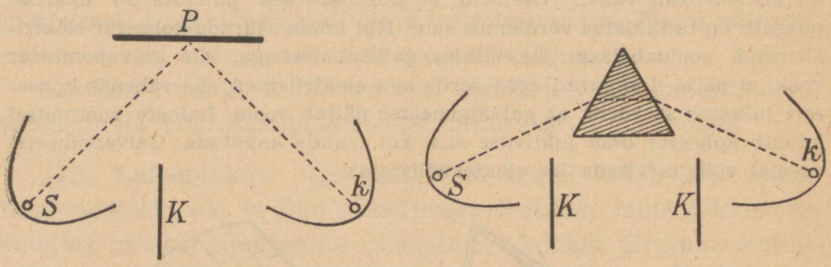
Sel teel võib katseliselt näidata, et elektromagnetilised lained p e e g e l d u v a d metallipinnal ja m u r d u v a d isolaatorites ning p o l a r i s e e r u v a d.

Vastavad uurimised näitavad, et ka valguslained on elektromagnetilised lained, Hertzi avastatud elektrilainetest erinevad valguslained ainult lainepikkuse poolest. Valguse lainepikkus on väga väike, elektrilainete lainepikkus aga suur.

Allpool-esitatud tabelis on toodud mõnede kiirte (lainete) liikide lainepiirkonnad.

Röntgenikiired	0,005 mμ	kuni 60 mμ.
Ultravioletsed kiired	20,2 mμ	kuni 0,4 μ.
Nähtavad valguskiired	0,4 μ	kuni 0,75 μ.
Ultrapunased kiired	0,75 μ	kuni 0,3 mm.
Elektrilained	2 mm	kuni ∞.

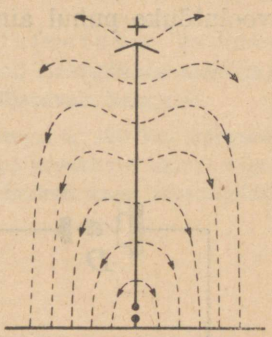
117. Hertzi peeglid. Eriti hästi võib näidata elektrilainete peegeldumist ja murdumist, samuti ka polarisatsiooni nn. Hertzi peeglite abil (132. joon.). Hertzi peegel on kõveraks painutatud metallplekk, mille läbilõige on parabool. Saateaparaadi peegli tulipunktis on Hertzi vibraator, mida laetakse sädeinduktoriga, vastuvõtuaparaadi peegli tulipunktis on koheerer. 133. joonisel on kujutatud skemaatiliselt elektrilainete peegeldumist ja murdumist, kasutades seejuures Hertzi peegleid.



Joon. 133. Elektrilainete peegeldumine ja murdumine.

118. Traadita telegraaf summutatud lainetega. Itaallane G. Marconi oli esimene, kes Hertzi avastatud elektrilaineid kasutas signaalide edasisaatmiseks, pannes seega aluse raadiotehnikale. Marconi tarvitas elektrilainete saatjana nn. **antenni,** mis moodustab vibraatori ühe poole, kuna teiseks pooleks on Maa. Antennis tekitatakse summutatud elektrivõnkumisi sädeinduktori abil. Antenn kui avatud võnkeahel omab head kiirgamisvõimet, kuid tugevaid võnkumisi on temas raske tekitada. Seepärast sidestati hiljemini antenn suletud võnkeahelaga, milles on võimalik tekitada tugevaid elektrivõnkumisi. Viies mõlemad võnkeahelad näiteks pöördkondensaatori abil resonantsi, on võimalik tekitada tugevaid elektrilaineid. Elektri tungjooni antenni ümber kujutab 134. joonis, kuna saatejaam on kujutatud 135. joonisel.

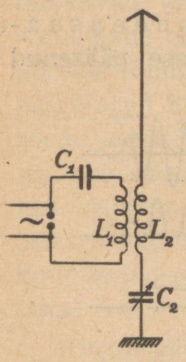
Elektri vastuvõtjana tarvitatakse samasugust antenni, mis elektrilainete vastuvõtmisel viiakse resonantsi vastuvõetavate lainetega. Vastuvõtu-antennis tekkinud võnkumised tehti algul nähtavaks koheereri abil, hiljemini võeti tarvitusele kristalldetektor.



Joon. 134. Elektri tungjooned antenni ümber.

Võnkuv vool, nagu seda raadiotehnikas tarvitatakse, on väga suure sagedusega vahelduvvool, mistõttu telefonimembraan seda võnkumist edasi ei anna. Et seda võnkumist telefoni kuuldetorus kuuldavaks teha, seks tarvitatakse nn. *detektorit*.

Kristalldetektori moodustavad metalltraadi ja kristalli (püriit, karborund, tinaläige jne.) puutekoht, mis laseb läbi ainult ühesuunalist elektrivoolu. Seetõttu muudab kristalldetektor muutliku amplituudiga võnkuva voolu, mis indutseeritakse vastuvõtuaparaadi antennis, pulseerivaks alalisvooluks.

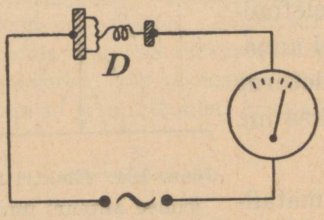


Joon. 135. Saatejaam.

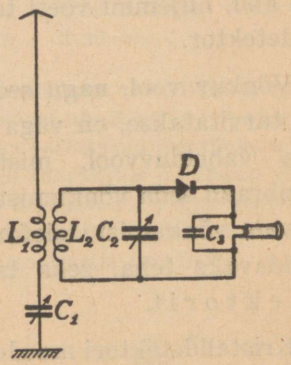
137. joonis kujutab sel põhimõttel töötavat vastuvõtuaparaati. Nagu saatejaamaski, nii ka siin ei lülita detektorit otseselt antenni ahelasse, vaid sellega sidestatud suletud võnkeahelasse. 137. joonisel L_2C_2 on antenniga sidestatud suletud võnkeahel (L_2 — induktiivsus, C_2 — pöördkondensaator, D — kristalldetektor ja C_3 nn. plokk-kondensaator, millega on rööbiti telefon).

Sädeinduktor tekitab summutatud võnkumisi, kusjuures see võnkumine koosneb üksikuist võnkumiste rühmadest. Igale sädemele vastab üksik võnkumiste rühm (138. joon.). Samasugused summutatud võnkumiste rühmad tekivad vastuvõtu-antennis ja sellega sidestatud suletud võnkeahelas. Et kristalldetektor laseb läbi ainult ühe-

suunalist voolu, siis seetõttu selles ahelas tekib rühma arvuga võrdne arv pulseerivaid voolutõukeid. Telefonimembraan ei järgne igale suursagedusega võnkumisele, vaid paindub iga voolutõuke puhul ainult üks kord. Seega tuleb telefonis kuul-



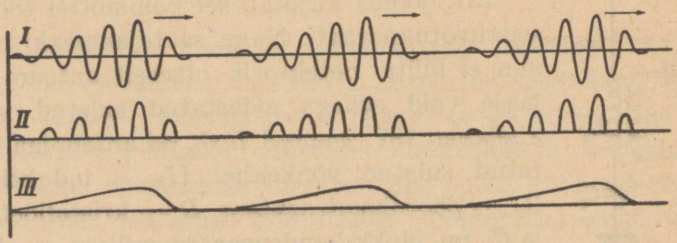
Joon. 136. Kristalldetektor.



Joon. 137. Vastuvõtujaam.

davale toon, mille võnkesagedus on võrdne voolutõugete arvuga. Sel teel võib signaale edasi saata Morse'i tähestiku kujul.

Telefoniga rööbiti on lülitud nn. p l o k k - k o n d e n s a a t o r, mille ülesanne on läbi lasta detektoriahelasse pääsenud



Joon. 138. Võnkumiste rühmad.

elektrivõnkumised. Teiseks muudab ta telefoni juhitud pulseeriva voolutõuke pidevaks voolutõukeks.

119. Pinna- ja ruumilained. Et antenn on vibraator, mille teine pool on asendatud maaga, siis elektrivõnkumised antennis tekitavad ruumis elektromagnetilisi laineid, millede elektri tungjooned on risti maaga. Sääraseid laineid nimetatakse p i n n a l a i n e t e k s. Katsed näitavad, et

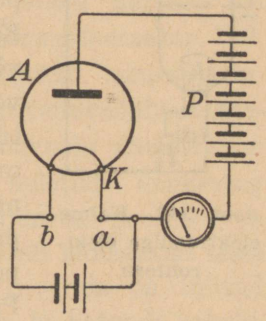
pinnalained levivad mööda maapinda, jälgides ka selle kõverust. Niiviisi võivad elektrilained ümber Maa levides uuesti tagasi tulla saatejaama. Pinnalainetena levivad peamiselt pikad raadiotehnikas tarvitatavad elektrilained.

Osa energiat kiirgab antenn õhku ruumilainetena. Vaatlused näitavad, et raadiotehnikas tarvitatavad lühilained (lainepikkus mõni m), mis levivad peamiselt ruumilainetena, levivad üllatavalt kaugele.

See nähtus seletub ruumilainete peegeldumisega u. 100 km kõrgusel oleva nn. Heaviside'i kihil. See kiht on päikesekiirte toimel tugevasti ioniseeritud, mistõttu ta peegeldab elektrilaineid nagu metallipind.

Elektrontoru.

120. Kahe elektroodiga elektrontoru. Pöördelise tähtsuse raadio ja traadita telegraafi tehnikasse tõi **elektrontoru** leiutamine (von Lieben, de Forest, Langmuir). Elektrontoru põhineb nähtusel, et metallidest, eriti aga tooriumoksüüdiga kaetud metallidest, mis kuumutatud hõõgumiseni, hakkavad väljuma elektronid. Vaatleme algul kahe elektroodiga elektrontoru. See koosneb õhutühjast klaaspirnist, kuhu on paigutatud 2 teineteisest isoleeritud elektroodi, katood *K* ja anood *A* (139. joon.). Katoodi moodustab tooriumoksüüdiga kaetud volframtraat (hõõgkatood), mida elektrivoolu abil kuumutatakse. Katoodi kuumutamiseks tarvilikku voolu nimetatakse küttevooluks.



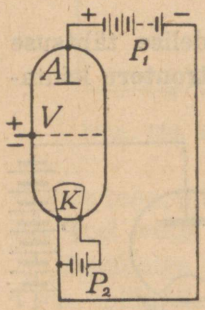
Joon. 139. Kahe elektroodiga elektrontoru.

Küttevoolu abil kuumutatud hõõgniidist hakkavad väljuma elektronid, mistõttu hõõgniidi ümber tekib nn. elektronipilveke, mis takistab edasist elektronide väljumist hõõgkatoodist. Ühendades anoodi nn. anoodpatarei positiivse poolusega ja katoodi (küttepatarei-pooluse) negatiivse poolusega, hakkavad elektronid anoodi ja katoodi vahelise pinge mõjul liikuma katoodilt anoodile, tekitades seega nende vahel elektronidevoolu, nn. anoodvoolu. Kui pooluseid vahetada, tõukab anood kütte-

niiti ümbritsevaid elektrone, mistõttu elektrontorus ei teki mingit anoodvoolu.

Seega elektrontoru töötab nagu täiuslik ventiil, lastes läbi ainult ühesuunalist voolu. Ühendades *A* ja *K* vahelduvvoolu allikaga, laseb elektrontoru ühe poolperioodi kestel voolu läbi, teise poolperioodi kestel mitte. Seega mõjub elektrontoru siin kui alaldaja.

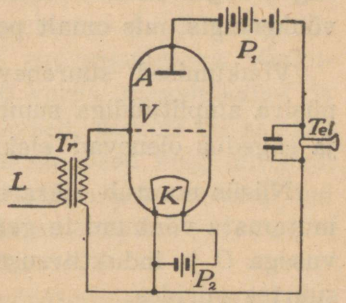
121. Kolme elektroodiga elektrontoru. Elektrontoru omandas alles siis suure tähtsuse, kui paigutati elektrontorru kolmas, võreks nimetatud elektrood. Võre asetseb anoodi ja katoodi vahel ning tavaliselt antakse talle spiraali kuju, mis ümbritseb katoodi. Mõlemat ümbritseb silindrikujuline anood. Ühendame anoodi anoodpatarei (u. 100 V) positiivse poolusega, katoodi selle negatiivse poolusega. Katoodist väljunud elektronid liiguvad läbi võre anoodile, moodustades seega anoodvoolu. Ainult väike osa elektrone jääb peatuma võrele, andes talle negatiivse laengu, mistõttu anoodvoolu tugevus nõrgeneb. Anname võrele väljastpoolt nõrga negatiivse pinge, ühendades ta nn. võrepatarei vastava poolusega, siis nõrgeneb anoodvool veelgi. Pisut suurema negatiivse võrepinge puhul muutub anoodvoolu tugevus koguni nulliks. Anname võrele aga positiivse laengu, siis suureneb anoodvoolu tugevus. Seega võrepinge väikesed võnkumised kutsuvad esile juba suuri anoodvoolu võnkumisi.



Joon. 140. Kolme elektroodiga elektrontoru.

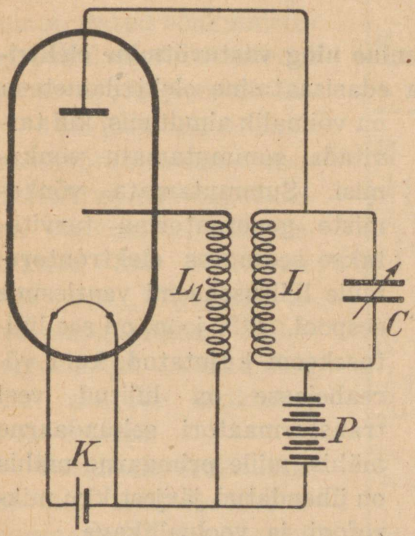
122. Elektrontoru kui võimendaja. Kolme elektroodiga elektrontoru omab suurt tähtsust võnkuva elektrivoolu võimendajana. Sääraste nõrkade vooludega on tegemist kõne edasisaatmisel telefoni kaudu, eriti aga raadiotehnikas. Võimendatav nõrk vahelduv või võnkuv elektrivool juhitakse läbi transformaatori (141. joon., *Tr*) primaarse mähise. Transformaatori sekundaarse mähise üks ots on ühendatud elektrontoru võrega,

teine katoodiga. Nõrk võnkuv vool, läbides primaarse mähise, tekitab pingevõnkumisi võrel, millega rütmis võngub ka anoodvoolu tugevus. Nii võib primaarse voolutugevuse võnkumiste amplituudi mitmekordselt suurendada. Võimendati näiteks telefonikõne juures tekkinud võnkuvat elektrivoolu, siis lülides anoodvoolu ahelasse telefoni, võime seda kõnet kuulda palju tugevamini. Lülides telefoni asemel teise transformaatori, võime neid vooluvõnkumisi veel kord võimendada.



Joon. 141. Võimendaja.

123. Elektrontoru kui suursagedusega voolu generaator. Parimaks summutamata suursagedusega voolu allikaks on elektrontoru-generaator. 142. joon. kujutab suursagedusega elektrontoru lülitusskeemi. Anoodvoolu ahelasse on lülitud suletud võnkering *LC*, kusjuures pool *L* on induktiivselt sidestatud teise pooliga L_1, mis on lülitud toru võre ja katoodi vahele. Anoodvoolu sisselülimisel tekib pooli *L* otstes, seega ka kondensaatori *C* plaatide vahel, nõrk pinge, mistõttu tekib võnkeringis *LC* nõrk elektrivõnkumine. Need võnkumised kustuksid kiiresti, kui pool L_1 puuduks. Nõrgad võnkumised võnkeahelas *LC* indutseerivad poolis L_1 samasugused võnkumised, mille tulemusena elektrontoru võre omandab vaheldumisi positiivse



Joon. 142. Generaator.

ja negatiivse pinge. Võre pingevõnkumiste tagajärjel hakkab võnkuma ka anoodvoolu tugevus võnkeringile *LC* omase võnkesagedusega. Seetõttu suureneb ka elektrivõnkumine *LC* võnkeringis, mis omalt poolt suurendab pingevõnkumist võrel.

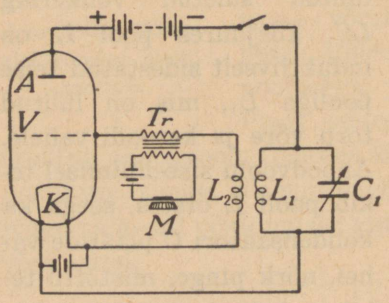
Võnkumised suurenevad, kuni lõpuks tekib võnkeringis püsiva amplituudiga summutamata võnkumine, mille tugevus ja sagedus olenevad elektrontoru ja võnkeringi omadustest.

Niisiis muutub säärase lülitusviisi juures elektrontoru summutamata võnkumiste generaatoriks. Valides vastava mahtuvusega *C* ja induktiivsuse *L*, võib võnkesagedust muuta väga suurtes piirides.

Elektrontoru abil tekitatakse niiviisi võnkumisi 1 kuni 1 000 000 ja rohkem hertzi.

Raadio.

124. Kõne ja muusika saatmine ning vastuvõtmine elektrilainete abil. Kõne ja muusika edasisaatmine elektrilainetena on võimalik ainult siis, kui tarvitada summutamata võnkumisi. Summutamata võnkumiste generaatorina tarvitatakse seejuures elektrontoru, mille lülitusskeemi vaatlesime eespool. 143. joon. on see lülitusskeem kujutatud, kuid võreahelasse on lülitud veel transformaatori sekundaarne mähis, mille primaarne mähis on ühendatud järjestikku mikrofoni ja vooluallikaga.



Joon. 143. Modulatsioon. *Tr* — transformaator, *M* — mikrofon.

Kui mikrofoni takistus ei muutu, s. o. kui temasse ei mõju häälelained, siis tekitab toru generaator suursagedusega võnkumisi, millede amplituud on muutumatu (144. joon., I). Seda suursagedusega võnkumist nimetatakse ka p õ h i v õ n k u m i-

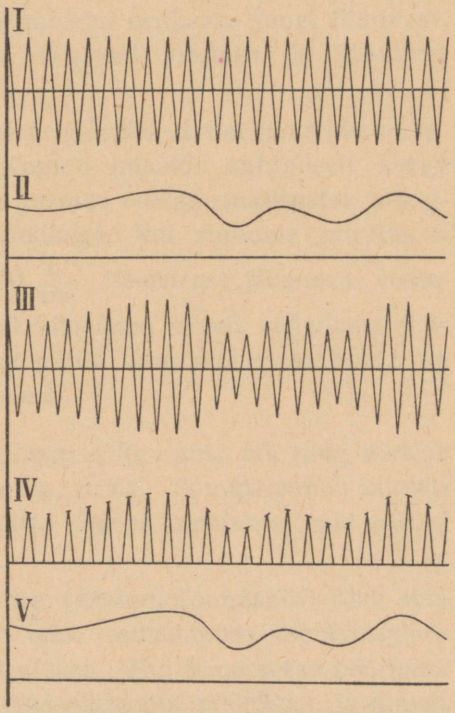
s e k s. Kui mikrofoni ees tekitada heli, näiteks võnkesagedusega 500, siis transformaatori *Tr* kaudu kandub see võrele pingevõnkumisena, mille tagajärjel võngub ka anoodvool. Mõlemad anoodvoolu võnkumised, suursagedusega ja väikesagedusega võnkumine, liituvad. Seetõttu suursagedusega võnkumiste amplituud on igas sekundis 500 korda maksimaalne ja nimelt siis, kui võre on laetud positiivselt, samuti on ta igas sekundis 500 korda ka minimaalne. Samasugused, kuigi mitte nii korrapärased põhilaine amplituudi kõikumised tekivad, kui laulda või kõnelda mikrofoni ees. Säärast nn. m o d u l e e r i t u d võnkumist kujutab 144. joon., III.

See moduleeritud suursagedusega võnkumine antakse üle antennile, kust see elektri- ehk raadiolainete kujul edasi antakse ruumi.

Nende lainete vastuvõtmine toimub nagu summutatud võnkumistegi puhul vastava antenni ja vastuvõtuaparaadi abil.

144. joon., III on näha vastuvõtuaparaadis moduleeritud suursagedusega võnkumine, mis detektori abil alaldatud. 144. joon., V kujutab telefonimembraani väikesagedusega võnkumist, mis säärane alaldatud vool tekitab.

Tavaliselt tarvitatakse nn. lamp-vastuvõtuaparaatides detektorina elektrontoru erilises lülituses, sest ka elektrontoru alaldab voolu, nagu eespool nägime.



Joon. 144. I — summutamata võnkumine; II — mikrofoni voolu kõikumine; III — moduleeritud võnkumine; IV — alaldatud vool; V — vool telefonis.

On vastuvõetavate lainete energia liiga nõrk, siis võib neid elektrontoru abil võimendada.

Detektoriks tarvitatav elektrontoru, samuti võimendaja-elektrontoru ühes vastavate pöördkondensaatoritega resonantsi viimiseks, koos induktsioonipoolidega jne. moodustab kokku raadiovastuvõtu-aparaadi.

VOOLAMISNÄHTUSED JA LENDAMINE.

125. Vedelike ja gaaside ühiseid omadusi. Vedelike ja gaaside tundmaõppimisel võisime nende erinevate omaduste kõrval (paisumine, erisoojus, pindpinevus) tähele panna ka terve rea ühiseid omadusi, nagu nende mõlemi osakeste suurt liikuvust, ühtlast rõhu edasiandumist (Pascali seadus) ja üleslüket (Archimedese seadus).

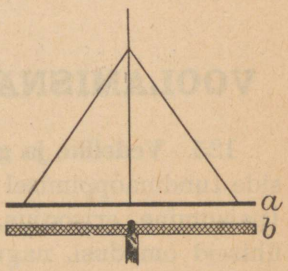
Veel enam ilmneb vedelike ja gaaside sarnasus nende voolamisega seotud nähtustes. Koguni gaaside suhteliselt kerge ruumala muutumine ei tekita gaaside voolamisnähtustes tunduvaid erinevusi võrreldes vedelikega, kui ruumala muutus ei ületa 1% ja voolamiskiirus 50 $\frac{m}{sek}$. Seepärast järgneval voolamisnähtuste tundmaõppimisel kõneleme sageli vedelikest üldmõttes, mõeldes seejuures ka gaase, sest mõlemate kohta on kehtivad samad korrapärasused.

126. Sisehõõrdumine. Kiiresti sõitev auto või rong tekitab enda ümber tugeva õhuliikumise, tuule. Samuti paneb kiiresti sõitev laev ümberoleva vee mitte üksnes lainetama, vaid teatud määral ka kaasa liikuma.

Riputame mõne tasase ketta (grammofoniplaadi) niidi otsa ja hoiame teda paralleelselt teise samasuguse tsentrifugaalmasinale kinnitatud ketta läheduses. Kui teine ketas pöörlema panna, hakkab ka esimene ketas pikkamisi pöörlema, ja nimelt samas suunas kui teinegi (145. joon.).

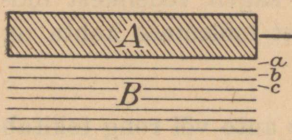
Eelmised tähelepanekud ja katsed näitavad, et vedelikus või gaasis liikuv keha paneb temaga kokkupuutuvad vedeliku

(gaasi) osakesed enesega samas suunas liikuma. Nähtuse seletuseks oletame, et keha *A* liigub mööda paigalseisva vedeliku *B* pinda noole suunas (146. joon.). Kehaga *A* kokkupuutuvad vedelikuosakesed (kiht *a*) tõmbuvad molekulaartungide mõjul keha *A* külge ja liiguvad temaga kaasa. Kehaga *A* kaasaliikuva vedelikukihi (*a*) molekulide kiirus on seetõttu noole suunas suurem kui temaga kokkupuutuva vedeliku järgmise kihi (*b*) molekulide kiirus selles suunas. Difusiooni kaudu tungib osa suurema kiirusega molekule kihist *a* kihti *b* ja annab temale edasi osa oma liikumisenergiast, seda kihti noole suunas liikuma pannes. Seetõttu hakkab ka kiht *b* liikuma keha *A* suunas. Samal viisil andub kihi *b* liikumine edasi kihile *c* jne.



Joon. 145. Ketas *a* hakkab ketta *b* pöörlemisel kaasa pöörlema.

Kuid mitte üksnes suurema kiirusega kihi (*a*) molekulid ei tungi väiksema kiirusega kihti (*b*), teda kiiremini liikuma pannes, vaid ka ümberpöördult: väiksema kiirusega vedelikukihi (*b*) molekulid tungivad suurema kiirusega vedelikukihti (*a*), tema kiirust vähendades, seda liikumist pidurdades. Nähtus on analoogiline hõõrdumisnähtustega tahkete kehade puhul, kus üks keha liigub mööda teise keha pinda. Seepärast nimetataksegi ühe vedelikukihi takistavat mõju temaga kokkupuutuva teise vedelikukihi liikumisele vedeliku **sisehõõrdumiseks** ehk **viskoossuseks**. Sama kehtib ka gaaside kohta. Sisehõõrdumine toimub vedeliku sees, kuna varemini tundmaõpitud hõõrdumine tahkete kehade puhul toimub nende välispinnal. Sisehõõrdumise kaudu hajub vedelikus (gaasis) liikuva keha energia ümberolevasse vedelikku (gaasi), teda liikuma pannes. Seetõttu omab sisehõõrdumine suurt tähtsust voolamisnähtuste seletamisel.



Joon. 146. Vedeliku sisehõõrdumine.

Katsed näitavad, et sisehõõrdumise suurus oleneb võrdeliselt üksteise suhtes liikuvate pindade suurusest ja nende kiiruste vahest ning pöördvõrdeliselt nende kaugusest, samuti ka vedeliku ainest ja temperatuurist. Antud vedeliku (gaasi) sisehõõrdumise suurust iseloomustab nn. *sisehõõrdumiskoefitsient* (η). Selle all mõeldakse tungi suurust düünides, mis 1 cm² suuruse vedeliku pinnakihi teise niisama suure ja 1 cm kaugusel oleva kihi suhtes liikuma paneb kiirusega 1 $\frac{cm}{sek}$. Toome siin mõnede ainete sisehõõrdumiskoefitsiendi suurused 18° juures:

Glütseriin	11	Hapnik	0,0002
Piiritus	0,017	Õhk	0,00018
Vesi	0,0106	Vesinik	0,000088

Nagu neist andmeist nähtub, erinevad ained sisehõõrdumise suuruselt õige tunduvalt. Tegelikult on kõik vedelikud enam-vähem viskoossed. Arvutamiste hõlbustamiseks eeldatakse sageli, et vedelikul puudub viskoossus ja ta pole kokkusurutav. Selliste omadustega vedelikku (gaasi) nimetatakse *ideaalseks*. Reaalselt meil täiesti ideaalseid vedelikke (gaase) ei esine.

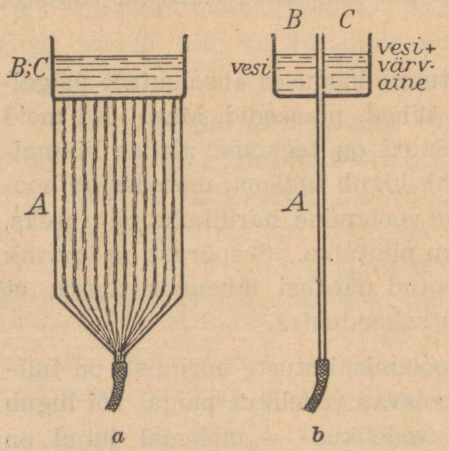
127. Voolamine. Me ei tunne looduses absoluutset paigalolekut. Kõik liigub: Päike, tähed, planeedid, Maa. Ka meid ümbritsevas looduses Maa pinnal on tegemist alalise liikumisega: vesi voolab jõgedes, õhk liigub tuulena, meredes on hoovused. Seega on vee ja õhu voolamine harilikuks nähtuseks, millega me igal sammul kokku puutume. Seepärast on tarvilik vee ning õhu voolamisega seotud nähtusi lähemalt tunda, et neid ära kasutada tehnilistes rakendustes.

Tuleb silmas pidada, et voolamisnähtuste uurimisel on tulemus sama: kas ese seisab voolavas vedelikus paigal või liigub voolukiirusega paigalseisvas vedelikus — mõlemal juhul on eseme ja vedeliku suhteline liikumine sama. Näiteks kas jalgrattur sõidab täiesti vaikse ilmaga kiirusega 5 $\frac{m}{sek}$, või jalgrattur seisab paigal ja tuul puhub kiirusega 5 $\frac{m}{sek}$, mõlemal juhul on jalgratturi ja õhu suhteline kiirus sama (5 $\frac{m}{sek}$), seega sama ka siin tekkinud tuule mõju. Selle põhjal võime kasutada voolu puudumisel eseme liikumist paigalseisvas vedelikus. Võrdluseks tuletage meelde, kuidas lapsed vaikse ilmaga tuuleveskeid käima panevad!

Vee ja õhu nähtuste uurimisel on vaja tekitada nende tugevat voolu kunstlikult, laboratoorselt. Selleks pannakse vesi (õhk) propelleriga erilistes kanalites tugevasti liikuma. Et propelleri pöörlemise tõttu vee (õhu) osakesed koos edasiliikumisega ka ringi liikuma hakkavad, siis juhitakse see vool paigalseisvate tasapinnaliste, risti asetatud plaatide vahelt läbi, mille tõttu õhuosakeste voolamisteed jälle sirgeks muutuvad.

128. Voolujooned. Vedelikuosakesed, liikudes voolus, tõmbavad endiga kaasa ka väiksemaid kergeid esemeid. Nii võime tähele panna, kuidas tuul lumehelbeid, langenud puulehti või tolmu endaga kaasa viib, millede abil me võime jälgida õhuosakeste liikumisteed tuules. Samuti mõni ujuv puutükk märgib veeosakeste liikumisteed veevoolus.

Laboratoorsetes katsetes kasutatakse veevoolu nähtavaks tegemiseks peent puu- või alumiiniumipuru ja värvaineid, õhuvoolu puhul tolmu, suitsu või lipukesi.



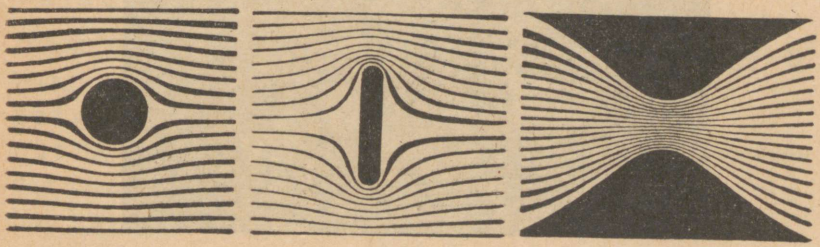
Joon. 147. Riist vedeliku voolujoonte demonstreerimiseks: *a* — eestvaade, *b* — külgvaade.

Seda teed, mida mööda vedelikuosake voolus liigub, nimetatakse v o o l u j o o n e k s. Voolujooned annavad meile pildi vedelikuosakeste liikumisest voolus, samuti nagu magneti tungjooned annavad pildi magnetitungide mõjust magnetiväljas.

Vedeliku voolujoonte vaatlemiseks voolamisel kasutatakse 147. joon. kujutatud riista. Umbes 1 mm kaugusele teineteisest asetatud klaasplaadid moodustavad õhukese klaasanuma *A*. Sellega on väikeste augukeste kaudu ühenduses anumad *B* ja *C*. Anumate *B* ja *C* augukesed pole asetatud kohakuti, vaid vaheldumisi. Sedaviisi saame anumatest *B* ja *C* voolavate jugade read üksteisest eraldada. Kui näiteks anumas *B* on keedetud vesi, anumasse *C* aga on veele lisandatud tinti või mõnda teist värvainet, näiteks *kalium permanganicum*'i lahust, siis näeme anumas *A* voolamas kõrvuti anumast *B* tulevate läbipaistvate veejugadega anumast *C* tulevaid värvilisi jugasid.

Sel viisil võime hõlpsasti jälgida voolujoonte käiku ühe või teise vedeliku või mõnesuguste eriliste tingimuste puhul.

Vaatleme nüüd mõnd voolujoonte pilti katsetest vedeliku voolamisega väikeste kiiruste puhul. Kui asetada vedeliku voolamise teele silindriline keha, siis saame voolujoontena 148. joon., *a* kujutatud pildi. Voolu teele risti asetatud tõke (liist) muudab voolujoonte käiku, nagu näha 148. joon., *b*. Teeme voolutee kitsaks (148. joon., *c*), nihkuvad voolujooned tihedalt üksteise lähedale ning ühes sellega suureneb vedelikuosakeste kiirus kitsas kohas, sest sellest peab igas sekundis niisama palju vedelikku läbi voolama kui laiastki kohast.



a *b* *c*

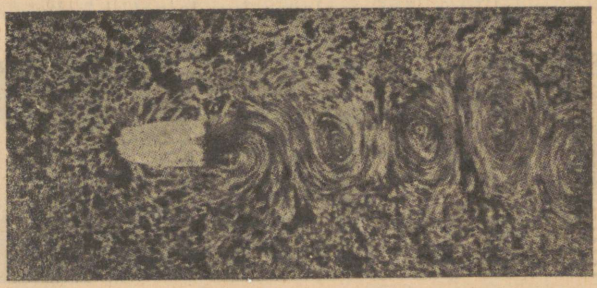
Joon. 148. Voolujooned: *a* — silindri ümber; *b* — risti asetatud tõkke ümber; *c* — kitsas kohas.

Eelmistest katsetest näeme, et vedelik voolab pidevate katkematute jugadena, voolujoontena, mis mõne esineva tõkke puhul sellest mööda lähevad, teda ümber haarates. Mida kitsam on voolu tee, seda tihedamini asetuvad voolujooned ja seda suurem on voolu kiirus. Selle põhjal võime voolujoonte pildi järgi otsustada voolu iseloomu üle ühes või teises kohas.

129. Laminaarne ja keeriseline voolamine. Eelmises §-s toodud voolujoonte pildid esinevad juhul, kui voolu kiirus on väike, sest siis ei avalda vedelikuosakeste sisehõõrdumine ja kokkusurutavus tunduvat mõju voolamisele. Sel juhul on meil praktiliselt tegemist nn. ideaalse vedeliku voolamisega. Nimetame seda laadi voolamist ladusaks ehk laminaarseks (kihiliseks).

Voolamiskiiruse suurenedes muutub aga voolamise iseloom. Vedelik ei voola enam ladusalt, pidevate jugadena, vaid tekivad nn. keerised, nagu näha 149. joon. Seepärast nimetatakse sellist liikumist keeriseliseks ehk turbulentseks.

Keeriste tekkimist põhjustab hõõrdumine tõkke ja vedelikuosakeste vahel ning viimaste sisehõõrdumine. Hõõrdumine vähendab liikuvate osakeste kiirust. Vedelikuosakesed, millede hõõrdumine on suurem, jäävad maha väiksema hõõrdumisega osakestest ning seetõttu tekib keeriseline ringliikumine.



Joon. 149. Keerised liikuva keha järel.

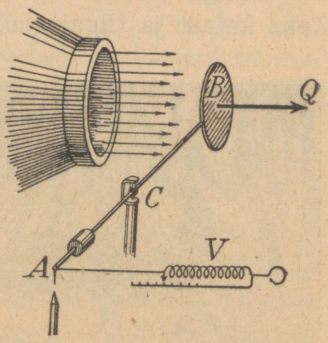
Keeriste tekkimisel on suur tähtsus liikumisel. Keeriste tekkimiseks kulub energiat, mis saadakse liikuvalt kehalt. Seetõttu keerised pidurdavad selle keha liikumist, mis neid tekitas, s. o. keerised hajutavad liikuva keha energiat.

130. Keskkonna takistus. Kui mõni keha liigub vedelikus — õhus või vees, siis vedelik takistab seda liikumist. Seejuures on ükskõik, kas keha liigub paigalseisvas vedelikus või keha seisab paigal liikuvas vedelikus, vedelikuvoolus. Oluline on siin keha ja vedeliku suhteline liikumine, nagu me seda nägime § 127 toodud näitest jalgratturi kohta. Liigub aga keha vooluga kaasa, nagu tuulest aetud vaba õhupall või veevooluga kaasa liikuv puutükk, siis puudub keskkonna takistus liikumisele.

Keskkonna takistuse suurust liikuvale kehale mõõdame tungiühikutes (düünides, g-des). Selleks võime kasutada iga

vastavalt kohandatud tungimõõtjat, näiteks kirja- või vedrukaalu (150. joon.).

Ketas, mille takistust õhuvoolus mõõdame, on kinnitatud võrdõlgse kangi külge. Sel juhul vedrukaal V näitab otseselt õhutakistuse suurust Q. Lihtsuse mõttes vaatleme allpool vaid neid juhtusid, kus keskkonna takistuse suund langeb ühte voolu suunaga.

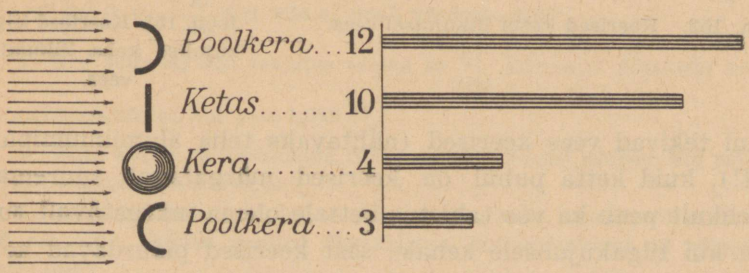


Joon. 150. Õhutakistuse mõõtmine.

Muutes õhuvoolu kiirust näeme, et ketta takistus Q suureneb kiiruse suurenemisega. Väikeste kiiruste puhul (õhus näiteks kuni 1 $\frac{m}{sek}$) on takistus võrdeline kiiruse esimese astmega. Suuremate kiiruste puhul, kus liikumisel tekivad juba keerised, on takistus võrdeline kiiruse ruuduga.

Mitmesuguses suuruses kettaid voolu asetades leiame: mida suurem on keha nn. frontlõige, s. o. keha kõige suurem voolusihiga risti tehtud lõige, seda suurem on ka takistus. Ta on võrdeline frontlõikega.

Kuidas oleneb keskkonna takistus keha kujust? Selleks asetame mitmekujulisi, kuid sama frontlõikega kehasid voolu ja mõõdame vastavad takistuse suurused. Toome siin (151. joon.) mõne keha võrdleva takistuse olenevalt kujust.



Joon. 151. Sama frontlõikega kehade võrdlev takistus olenevalt keha kujust.

Nagu joonisest 151 nähtub, on keha kuju väga oluliseks teguriks, millest oleneb keskkonna takistuse suurus. Kõige väiksema takistuse tekitab nn. tilgakujuline keha.

Millest on tingitud keskkonna takistuse olenevus kujust? Selle selgitamiseks liigutame (veame) vees sama kiirusega näiteks ketast ja tilgakujulist keha (152. ja 153. joon.). Mõlemal



Joon. 152. Keerised ketta liikumisel vees.



Joon. 153. Keerised tilgakujulise keha liikumisel vees.

juhul tekivad vees keerised (nähtavaks teha alumiiniumipuru abil!), kuid ketta puhul on keerised märgatavalt suuremad, järelikult peab ka vee takistus kettale olema märgatavalt suurem kui tilgakujulisele kehale, sest keerised pidurdavad keha liikumist vedelikus. Muidugi lisandub keeriste mõjule veel sisehõõrdumise tõttu vastu esifronti kuhjunud vedeliku rõhumine,

mis samuti on ketta puhul suurem kui tilgakujulisel kehal, kus vedelikuosakesed esifrondist hõlpsasti mööda libisevad. Kuna esifrondi takistus on tingitud vedelikuosakeste kuhjumisest, millest tekib esifrondil ülerõhk, mõjuvad keerised liikuva keha taga imevalt, tagasitõmbavalt, sest liikumise tõttu tekib keha taga alarõhk.

Ka tilgakujulise keha taga tekib keeriseid, kuid need on seevõrra väikesed, et ei avalda tunduvat mõju liikumisele. Seetõttu haaravad voolujooned vedelikus liikuva tilgakujulise keha tihedalt ümber, asetudes rööpselt tema pinnaga. Seepärast nimetataksegi tilgakujulist keha ka voolujooneliseks.

Lõpuks oleneb keskkonna takistus veel keskkonna tihedusest ja on sellega võrdeline. Läheb ju keskkonna takistuse ületamiseks kulutatud energia keeriste tekitamiseks, s. o. vedelikumassi liikumapanemiseks. Liikuva vedelikumassi hulk aga on võrdeline tihedusega.

Kõike eeltoodut kokku võttes võime öelda: keskkonna takistus on võrdeline kiiruse ruuduga, frontlõikega ja keskkonna tihedusega ning oleneb keha kujust. Kõige vähem takistab keskkond tilgakujulise keha liikumist.

Matemaatiliselt võime saadud tulemused väljendada järgmiselt:

$$Q = c_k \varrho S v^2,$$

kus c_k on igale kehale vastav koefitsient, olenedes keha kujust ja mõõtühikute valikust, ϱ — keskkonna tihedus, S — frontlõike pindala. Tahame näiteks, et kera puhul Q väljenduks kg-des, kui ϱ on väljendatud $\frac{kg}{m^3}$-tes, S — m^2-tes ja v — $\frac{m}{sek}$-tes, siis c_k peab võrduma 0,02.

1. Kui suur on õhu takistus temas $10 \frac{m}{sek}$ kiirusega liikuvale kerale läbimõõduga 20 cm, kui $\varrho = 1{,}293 \frac{kg}{m^3}$?

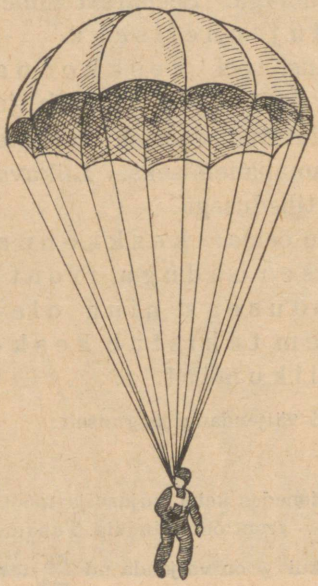
2. Mitu korda on keskkonna takistus elavhõbedas suurem kui petrooleumis, vees suurem kui õhus?

3. Lennuk tõusis maapinnast 4,4 km kõrgusele, kus õhurõhumine oli 43,5 cm Hg. Kuidas muutus õhutakistus, kui maapinnal oli rõhumine normaalne?

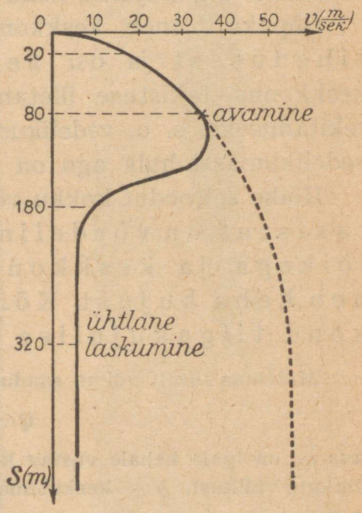
4. Milles seisneb sõudmine? Kas oleks võimalik lootsiku edasiliikumine sõudmisel, kui õhu takistus mõlale oleks niisama suur kui veeski?

5. Lootsikud ehitatakse harilikult terava nina ja laiema päraga, vahel aga tehakse mõlemad otsad teravad (merelootsikud). Kumma lootsikuliigi takistus vees liikumisel on väiksem?

131. Langevari. Keskkonna takistuse näitena vaatleme langevarju püsti allalangemist õhus. Langevari võtab pärast avamist (lahtilöömist) enam-vähem õõnsa poolkera kuju. Nagu nägime, on õhu takistus sel juhul kõige suurem. Algul saab langevari vaba langemise kiirenduse, kiirus järjest kasvab, kuid ühes sellega kasvab ka õhu takistus (võrdeliselt kiiruse ruuduga). Lõpuks, kui õhu takistus on muutunud võrdseks langevarju raskusega, on langevarjusse mõjuvate tungide resultant null ja



Joon. 154. Langevari.



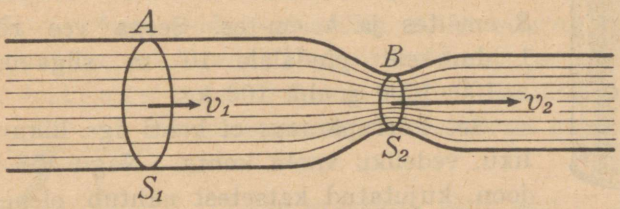
Joon. 155. Langevarjuri langemiskiiruse muutumise graafik.

langevari liigub edasi inertsi mõjul ühtlaselt, ilma kiirenduseta, jääva kiirusega umbes 5—6 $\frac{m}{sek}$. Sellise stabiliseerunud jääva kiiruse saavutab langevarjur pärast seda, kui ta on langenud allapoole ~250 m. Ilma langevarjuta langemisel oleks jääv kiirus sel juhul umbes 10 korda suurem, s. o. 60 $\frac{m}{sek}$. Esimesel juhul vastab langevarjuri lõppkiirus ilma langevarjuta 1,8 m kõrguselt allahüppamise lõppkiirusele, teisel juhul aga 180 m kõrguselt. Nagu teame, võib teatud ettevaatusega 1,8 m kõrguselt päris hädaohutult alla hüpata.

Harilikult ei avata langevarju otsekohe pärast väljahüppamist, vaid mõni sekund hiljem, kui on saavutatud juba suurem langemiskiirus (kuni 50 $\frac{m}{sek}$). Siis langevarju avades hakkab kiirus kiiresti vähenema, sest õhutakistus on suurem langevarju raskusest, ja jõuab varsti jääva lõppkiiruseni (5—6 $\frac{m}{sek}$), millega langevarjur maapinnale laskub. Näitlikult kujutab langevarjuri kiiruse muutumise käiku sel juhul 155. joon., kus rõhtteljel on märgitud langemise kiirused, püstteljel langemise tee.

Millised paremused on teisel langevarju avamise viisil võrreldes esimesega?

132. Statsionaarne vool. Olgu voolutoru (156. joon.) ristilõiked kohas A ja B vastavalt S_1 ja S_2 ning voolu kiirus v_1 ja v_2. Kui vool on stabiliseerunud, s. o. voolu igas



Joon. 156. Statsionaarne vool.

punktis püsib liikuvate vedelikuosakeste kiirus oma suunalt ja suuruselt kogu aeg jäävana, siis nimetame sellist voolu statsionaarseks. On arusaadav, et statsionaarse voolu puhul peab voolu igast ristilõikest sama aja, näiteks 1 sekundi, jooksul sama palju vedelikku läbi voolama, sest muidu peaks tekkima mõnes kohas vedeliku kuhjumine või jälle puudujääk, mida aga statsionaarse voolu puhul olla ei saa. Järelikult

$$S_1 v_1 = S_2 v_2,$$

sest ristilõike korrutis kiirusega mõõdab sellest ristilõikest ühe sekundi jooksul läbi voolanud vedeliku hulka, mis aga statsionaarse voolu puhul on võrdsed. Eelmisest valemist järgneb:

$$v_1 : v_2 = S_2 : S_1,$$

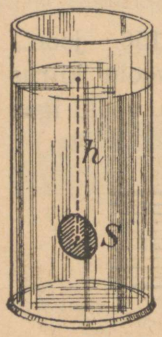
s. o. voolu kiirused on pöördvõrdelised vastavate ristilõigete pindaladega. See tulemus on

kokkukõlas voolujoonte puhul (§ 130) saadud tulemusega: mida kitsam on voolutee, seda tihedamini asetuvad voolujooned ja seda suurem on voolu kiirus.

Vool torus on statsionaarne. Toru lõikes, mille pindala 50 cm^2, on voolu kiirus 30 $\frac{cm}{sek}$. Leia voolu kiirus lõikes, mille pindala on 10 cm^2.

133. Voolu staatiline rõhk. Mehhaanikast teame, et paigalseisvas vedelikus mõõtub raske vedeliku rõhumine anuma seinale või vedeliku sees erikaalu (e), pindala (S) ja sügavuse (h) korrutisega, s. o.

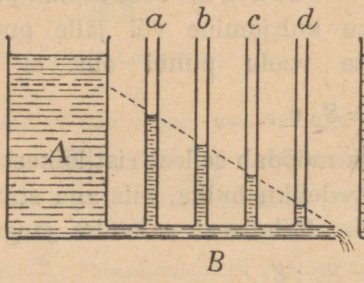
$$F = eSh.$$



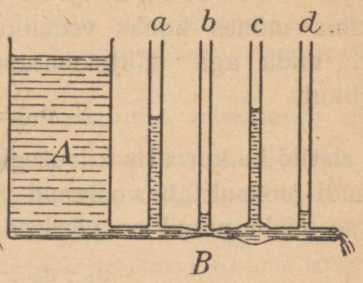
Joon. 157. Rõhumine vedelikus.

F mõõtub grammides, kui e on mõõdetud $\frac{g}{cm^3}$-tes, S cm^2-tes ja h cm-tes. Seega vee rõhumine 1 dm^2-sele pindalale 10 m sügavuses on $1 \cdot 100 \cdot 1000$ g ehk 100 kg.

See korrapärasus ei kehti aga liikuva vedeliku, vedeliku voolu kohta. Nagu 158. ja 159. joon. kujutatud katsetest nähtub, oleneb voolu rõhumine toru seinale toru pikkusest (hõõrdumisest vastu toru seina) ja voolu kiirusest torus (toru ristilõikest). Mida väiksem on toru ristilõige, seda suurem on voolu kiirus ja seda väiksem on rõhumine küljele (seinale), mida mõõdab vedelikusamba kõrgus (158. ja 159. joon., toru b). Laiemas torus (toru c) voolu kiirus väheneb, voolujooned harvenevad, ühes sellega aga tõuseb vedeliku

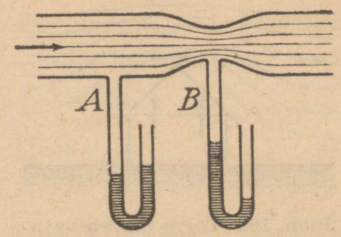


Joon. 158. Voolava vedeliku rõhumine seinale ühtlase jämedusega torus.



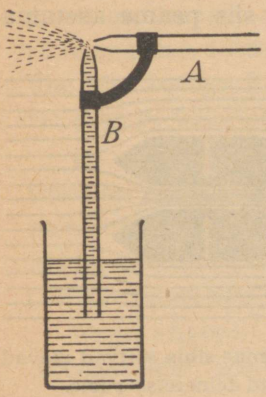
Joon. 159. Voolava vedeliku rõhumine seinale ebaühtlase jämedusega torus.

rõhumine küljele. Sama tulemuse annab ka katse õhuvooluga, nagu näha 160. joon. Rõhumise muutust näitavad siin kohtades *A* ja *B* voolutoruga ühendatud vesimanomeetrid. Esimesel juhul tekib väike ülerõhk, teisel juhul alarõhk võrreldes atmosfääri rõhuga.



Joon. 160. Õhuvoolu külgrõhumine väheneb kiirusega.

Voolava vedeliku rõhumist, mis toimub risti voolusuunaga, nimetatakse staatiliseks rõhuks. Et siin rõhumine toimub risti voolu suunaga, ei avalda sellesse otsest mõju liikuva vedeliku osakesed. Kokkuvõttes võime öelda: staatilise rõhu suurus oleneb voolu kiirusest (voolujoonte tihedusest) ja väheneb voolu kiiruse suurenemisega. Seetõttu avaldab vool suurema kiiruse korral nagu endasse imevat mõju.



Joon. 161. Pulverisaator.

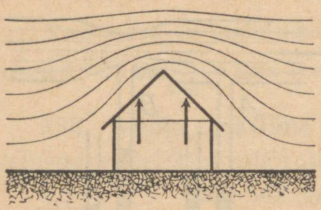
Voolu staatilise rõhu abil võime seletada terve rea voolamisega seotud nähtusi.

Pulverisaatoris (pihustajas) puhume läbi toru *A* tugeva õhuvoolu (161. joon.). See vool möödub toruga *A* risti asetatud toru *B* otsast. Torust *A* tuleva õhuvoolu küljel on rõhumine väiksem atmosfääri rõhumisest. Seetõttu tõuseb torus *B* vedelik ja õhuvool pihustab selle.

Samal nähtusel põhineb ka õhu imemine gaasivoolu Bunseni põleti torru tehtud august ning veduri küttekoldes tugeva tõmbe tekitamine auru juhtimisega korstnasse.

Torm ei lükka katuseid maja kõrvale maha, vaid tõstab nad üles (162. joon.). Üle katuse liikudes õhu voolujooned katuse kohal tihenevad ja staatiline rõhk muutub väiksemaks kui katuse all oleva õhu atmosfäärirõhk. Seetõttu õhu rõhumise resultant on suunatud alt üles ja katus tõuseb õhku.

Kahe pabeririba vahelt õhku läbi puhudes tõmbuvad paberiribad teineteise ligi. Pall püsib tasakaalus tugevas õhuvoolus (163. joon.), sest voolujoonte tihenemise kohal on staatiline rõhk väiksem ja õhk nagu imeb palli endasse.

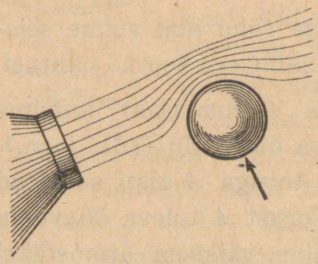


Joon. 162. Torm tõstab katused üles.

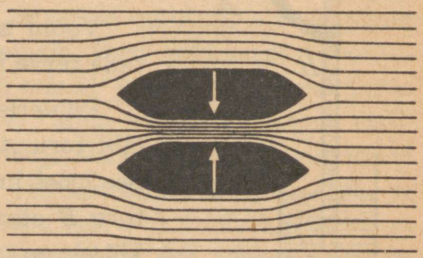
Samas sihis teineteise lähedal sõitvad laevad tõmbuvad teineteise poole (164. joon.).

Võta lehter ja aseta sellesse teine samasugune paberist kokkukeeratud lehter! Katsu nüüd lehtrist sinnaasetatud paberlehtrit välja puhuda! Kuidas seletada seejuures ilmnenud huvitavat nähtust?

134. Voolu dünaamiline rõhk. Staatilist rõhku mõõdame, asetades manomeetri toru otsa rööbiti voolujoontega. Tahame teada saada voolu kogurõhumise suurust, siis peame asetama



Joon. 163. Pall püsib tugevas õhuvoolus tasakaalus.



Joon. 164. Samas sihis sõitvad laevad tõmbuvad teineteise poole.

manomeetri avause risti voolujoontega. Selleks võime kasutada nn. Prandtl'i toru (165. joon.).

Silindrilises kehas on teineteise sees kaks toru: keskel toru K, mis lõpeb otsas P, ja selle ümber toru S, mis lõpeb otsas P_1. Kui asetame riista otsa A just otse vastu voolu, siis näiteks voolava õhu osakesed liiguvad riista ja ühes sellega sisemise toru K otsa vastu, kaotavad oma kiiruse ja ühes sellega ka hoo. Seetõttu tekib toru otsa juures (A) õhu kuhjumine ehk pais. Selle rõhumine andub edasi toru K kaudu manomeetrile otsas

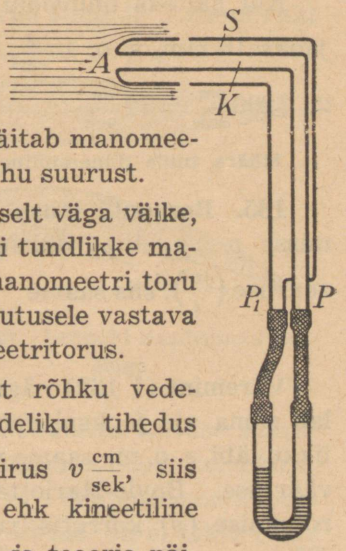
P; seda nimetatakse voolu **kogurõhuks**. Toru S avausest lähevad voolujooned rööpselt mööda, seetõttu saame selle kaudu mõõta staatilist rõhku (otsas P_1).

Katsed näitavad, et kogurõhk p on suurem kui staatiline rõhk p_1. Kogurõhu ja staatilise rõhu vahet nimetatakse voolu **dünaamiliseks rõhuks** (p_2), seega

$$p_2 = p - p_1, \text{ millest}$$
$$p = p_1 + p_2, \text{ s. o.}$$

voolu kogurõhk võrdub tema staatilise ja dünaamilise rõhu summaga.

Ühendades vesimanomeetri ühe otsa toruga P, jättes teise otsa vabaks, saame kogurõhu suuruse võrreldes atmosfäärirõhuga, mida loeme baromeetrilt. Kui aga ühendame otsa P_1 vesimanomeetriga, saame määrata staatilise rõhu suurust. Ühendades manomeetri ühe otsa toruga P, teise toruga P_1, näitab manomeeter p ja p_1 vahet, s. o. dünaamilise rõhu suurust.



Joon. 165. Prandtl'i toru.

Et voolu dünaamiline rõhk on üldiselt väga väike, tuleb selle mõõtmiseks tarvitada hästi tundlikke manomeetreid. Selleks asetatakse vesimanomeetri toru kaldu, sest siis saame samale rõhumuutusele vastava pikema veesamba nihkumise manomeetritorus.

Nagu nägime, tekitab dünaamilist rõhku vedelikuosakeste hoo kaotus. Kui vedeliku tihedus (1 cm³-i mass) on ϱ ja liikumiskiirus $v \frac{\text{cm}}{\text{sek}}$, siis 1 cm³-i liikuva vedelikumassi hoog ehk kineetiline energia võrdub $\varrho \frac{v^2}{2}$ ergiga. Katsed ja teooria näitavad, et dünaamiline rõhk (p_2) väljendub sama valemiga, s. o.

$$p_2 = \frac{\varrho v^2}{2},$$

millest järgneb, et **dünaamiline rõhk on võrdeline tihedusega ja kiiruse ruuduga.** Dünaamilise rõhu

(p_2) nimetuse saame, kui tiheduse nimetuse $\left(\frac{g}{cm^3}\right)$ ja kiiruse nimetuse $\left(\frac{cm}{sek}\right)$ ruudu teineteisega korrutame:

$$\frac{g}{cm^3} \cdot \left(\frac{cm}{sek}\right)^2 = \frac{g\,cm^2}{cm^3\,sek^2} = \frac{g\,cm}{cm^2\,sek^2} = \frac{gcm}{sek^2} : cm^2 = \frac{düün}{cm^2},$$

mis ongi rõhu nimetuseks CGS-mõõtühikute süsteemis. Seega hoog kaob ja tema asemele ilmub rõhuenergia ekvivalentsel määral.

Eelmisest valemist saame lihtsa vahendi voolukiiruse määramiseks. Tõepoolest:

$$v^2 = \frac{2p_2}{\varrho}, \text{ millest } v = \sqrt{\frac{2p_2}{\varrho}}.$$

Tihedus ϱ on harilikult teada, dünaamilist rõhku p_2 aga saame otseselt määrata Prandtl'i toru abil.

Kui näiteks õhuvoolu asetatud vesimanomeeter annab p_2 jaoks 10 mm, s. o. 1 $\frac{g}{cm^2}$ ehk 980 $\frac{düüni}{cm^2}$, siis $v = \sqrt{\frac{2 \cdot 980}{0{,}0013}} \approx$

$\approx 1200 \frac{cm}{sek} = 12 \frac{m}{sek}$.

Määra tuule dünaamiline rõhk, kui tuulekiirus on 25 $\frac{m}{sek}$!

135. Bernoulli lause. Asetame eelmises §-s saadud valemisse $p = p_1 + p_2$ dünaamilise rõhu asemele temale vastava suuruse $\left(\frac{\varrho v^2}{2}\right)$, siis saame:

$$p = p_1 + \frac{\varrho v^2}{2}.$$

Varemini (§ 132) nägime, et statsionaarse voolu puhul voolab sama aja jooksul voolu igast ristilõikest sama palju vedelikku läbi, s. o. me saame voolu iga ristilõike kohta V jaoks sama väärtuse. Boyle-Mariotte'i seaduse järgi on antud gaasihulga rõhumise (p) korrutis ruumalaga (V) jäävas temperatuuris jääv, s. o. pV = konst. Et statsionaarse voolu puhul V on jääv, siis peab olema jääv ka p. Järelikult ka

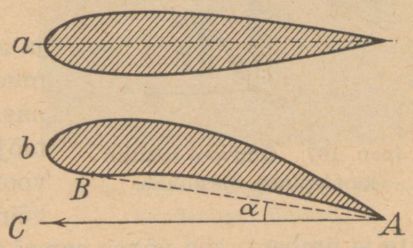
$$p = p_1 + \frac{\varrho v^2}{2} = \text{konst.},$$

s. o. õhu (üldse vedeliku) voolus on kogurõhk, samuti temaga võrdne staatilise ja dünaamilise rõhu summa konstantne.

Saadud lause staatilise ja dünaamilise rõhu konstantsusest voolus kannab Bernoulli lause nime. Selle tuletamisel me toetusime eeldusele, et vool on statsionaarne ja laminaarne (ilma sisehõõrdumiseta) ning vedelik (gaas) mitte kokkusurutav. Tõepoolest rahuldavad reaalsed vedelikud neid nõudeid ainult ligikaudselt. Peale selle oli veel eelduseks, et vool toimub rõhtsalt, s. o. voolava aine kaugus merepinnast ei muutu, mis võimaldab jätta arvestamata raskustungi mõju.

Bernoulli lausest järgneb, et dünaamilise rõhu suurenedes (kiiruse kasvades) väheneb staatiline rõhk ja ümberpöördult. Kui voolu kiirus $v = 0$, siis kaob dünaamiline rõhk ja kogurõhk võrdub sel juhul staatilise rõhuga.

136. Lennuki kandepinnasse mõjuvad tungid. Lennuki ehk aeroplaani all mõeldakse õhusõidukit, mis püsib õhus ainult edasiliikumisel tekkinud tungide tõttu, kuna aerostaat (õhupall, tsepeliin) püsib õhus Archimedese seaduse põhjal toimuva üleslükke mõjul. Lennuki paneb liikuma mootor, kuna õhus hoiavad teda kandepindade kiirel liikumisel tekkinud tungid. Vaatleme neid lähemalt.



Joon. 166. Lennuki kandepinna läbilõige.

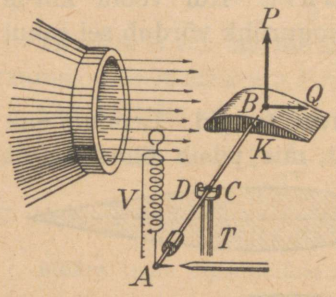
Väiksema takistuse ja ühes sellega suurema kiiruse saavutamiseks omavad lennuki kandepinnad voolujoonelise keha kuju, nagu näha 166. joon. antud läbilõikest (*a*). Seejuures on kandepinna tagumine osa veidi allapoole painutatud, nii et tekib väike nõgusus (*b*).

Nurka, mille moodustab kandepinna profiili alumine serv, lihtsamalt kõõl *AB*, lennusuunaga *AC*, nimetatakse kandepinna kohtumisnurgaks (α). Kohtumisnurga suurusest oleneb kandepindade üleslüke kui ka takistus lennul.

Lennukisse mõjub kogu lennuki raskus ülalt alla ja õhu üleslüke Archimedese seaduse põhjal alt üles. Need kaks tungi

mõjuvad lennukisse alati, olgu ta paigal või liikvel. Õhu nn. staatiline üleslüke on aga, nagu iga teisegi keha puhul, lennuki raskusega võrreldes seevõrra väike, et praktiliselt ta ei tule arvesse. Millest tekib siis tung, mis tasakaalustab lennuki raskuse? Selgituseks teeme järgmise katse.

Tasakaalustame kandepinna mudeli K rõhttelje CD ümber vabalt pöörduval võrdõlgsel kangil AB. Kangi otsaga A ühendame vedrukaalu V. Kui asetame kandepinnamudeli tugevasse õhuvoolu, siis tekib kohe üleslüke P, mis tõstab mudeli üles. Tahame, et mudel püsiks paigal, peame vedrukaalu abil otsas A tekitama tungi, mis võrdub üleslükkega punktis B, sest kang on võrdõlgne. Sedaviisi on võimalik vedrukaalu abil otseselt mõõta kandepinna üleslükke suurust.



Joon. 167. Õhuvool tekitab kandepinna üleslükke.

Et mudel saab liikuda ainult üles ja alla, siis õhutakistus, mis püüab mudelit liikuma panna voolu suunas, tasakaalustub toe T vastumõjuga. On aga mudel liikuv ka voolu suunas (selleks peab tugi T võima vabalt pöörduda vertikaaltelje ümber), siis võime samal viisil vedrukaalu abil ära mõõta ka õhuvoolu mõjul tekkinud õhutakistuse suuruse (Q), mis püüab mudelit liikuma panna voolu suunas.

Õhuvoolu mõjul tekkinud üleslüket nimetatakse dünaamiliseks üleslükkeks. Seda ei tule ära segada Archimedese seaduse põhjal mõjuva staatilise üleslükkega, millest oli kõnet aerostaadi tasakaalustamisel õhus. Dünaamiline üleslüke (P) ja õhutakistus (Q) on kaks komponenti, milledest oleneb lennuki tasakaal õhus.

Muudame eelmises katses kandepinna kohtumisnurki õhuvoolus ja mõõdame neile vastavad üleslükketungid kui ka takistused. Katsetulemused näitavad, et üleslüke kui ka õhutakistus üldiselt kohtumisnurga suurenedes suurenevad. Muidugi olenevad nii üleslüke kui

ka õhutakistus peale kohtumisnurga veel kandepinna kujust, suurusest, õhu tihedusest ja lennukiirusest.

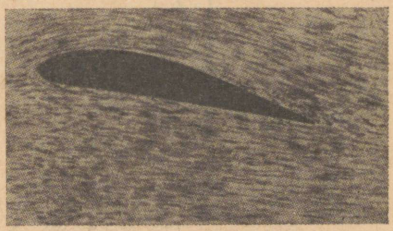
Matemaatiliselt väljenduvad üleslükke P ja õhutakistuse Q suurused järgmiselt:

$$P = c_{ü} S \frac{\varrho}{2} v^2 \text{ ja}$$

$$Q = c_t S \frac{\varrho}{2} v^2,$$

kus $c_{ü}$ ja c_t on vastavalt üleslükke ja takistuse koefitsiendid, S — kandepinna pindala, ϱ — õhutihedus ja v — lennukiirus.

Õhus liikuva kandepinna ümber voolava õhu voolujoonte kuju katseliselt uurides selgub, et kandepinna peal asetuvad voolujooned tihedamalt, seega on õhuvoolu kiirus seal suurem, kandepinna all aga hõredamalt, järelikult on voolukiirus seal väiksem. Seetõttu kandepinna peal valitseb alarõhk, all aga ülerõhk võrreldes atmosfäärirõhuga.



Joon. 168. Voolujooned liikuva kandepinna ümber.

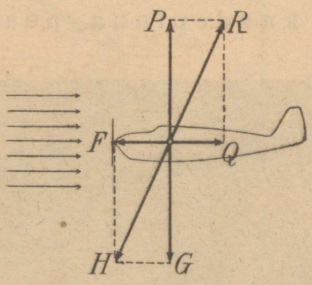
Üle- ja alarõhku kandepinna liikumisel võib määrata ka vesimanomeetriga § 134 näidatud viisil, kui kandepinna mudel on varustatud vastavate küljekanalitega, mis on ühendatud avaustega mudeli alumisel ja ülemisel pinnal.

Alarõhk kandepinna peal ja ülerõhk kandepinna all mõjuvad samas suunas, nimelt kandepinda üleslükkavalt, ja nende summa moodustabki dünaamilise üleslükke ehk tõstetungi, mis tasakaalustab lennuki raskuse.

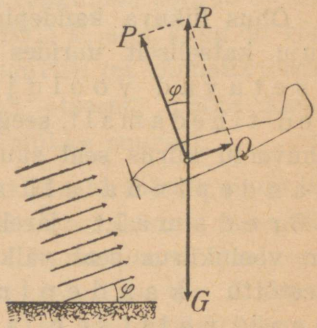
137. Tasakaal lennul. Vaatleme juhtu, kus lennuk liigub rõhtsalt jääva kiirusega. Et kiirendus on null, siis peavad lennukisse rakendatud tungid olema tasakaalus ja ta liigub ühtlaselt inertsi mõjul. Olgu kogu lennuki raskus G, mootori tõmme F ja nende resultant H (169. joon.). Edasi olgu lennuki liiku-

misest tekkinud õhu dünaamiline üleslüke (tõstetung) P ja õhu takistus Q ning nende resultant R. Et kõigi lennukisse mõjuvate tungide resultant peab võrduma nulliga, siis seetõttu H ja R peavad olema suuruselt võrdsed ning vastassuunalised. Sellest järgneb (tõesta seda geomeetriliselt!), et $F = Q$ ja $P = G$, s. o. ühtlasel rõhtsal lennul võrdub mootori tõmme õhu takistusega ja dünaamiline üleslüke lennuki raskusega.

Liuglennu puhul, näiteks lennuki maandumisel, mootor ei tööta ja mootori tõmme $F = 0$. Sel juhul lennuki ühtlasel alla-



Joon. 169. Tasakaal ühtlasel rõhtlennul.



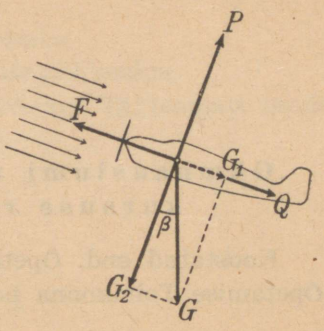
Joon. 170. Tasakaal liuglennul.

liugumisel dünaamilise üleslükke P ning õhutakistuse Q resultant R peab olema suunatud vertikaalselt üles ning võrduma lennuki raskusega (170. joon.).

Nagu joonisest nähtub, võrdub sel juhul liugumisnurk φ P ja R vahel oleva nurgaga ning $\tan \varphi = \frac{Q}{P} = \varepsilon$. Saadud arvu ε nimetatakse liugumiskoefitsiendiks (arvuks.) Mida väiksem on liugumiskoefitsient, seda väiksem on liugumisnurk φ ja seda kaugemale saab lennuk edasi lennata, kui mootor lakkab töötamast, mis on väga tähtis hädamaandumise korral. Seega on liugumiskoefitsient ε oluliseks tunnuseks lennuki võimete hindamisel.

Lennuki tõusu puhul lisandub eelmistele tungidele õhutakistuse suunas mõjuv raskuse komponent $G_1 = G \sin \beta$, mille tasakaalustamiseks peab vastavalt suurenema mootori tõmme F (171. joon.).

138. Lennuki liikumapanek. Lennuki jõuallikaks on mootor. Mootori juures on tähtis, et ta võimsus võrreldes raskusega oleks võimalikult suur. Seda hinnatakse mootori raskuse kilogrammide arvuga, mis tuleb võimsuse 1 HJ kohta. Saksamaa lennukitel on see läbisegi 1 kg 1 HJ kohta, üksikjuhtudel tunduvalt väiksemgi (kuni 0,5 kg). Seega 20 kg-ne mootor võib anda võimsuse 20 HJ ja enamgi. Selliste mootorite ehitamisel kasutatakse erilisi metallisulameid, mis suure kerguse juures on siiski väga tugevad, nagu duralumiinium.



Joon. 171. Tasakaal lennuki tõusu puhul.

Mootor paneb liikuma propelleri, mille ristilõikeil on sama kuju kui lennuki kandepinnalgi. Seega propelleri pöörlemisel tekib propelleri ees alarõhk ja taga ülerõhk, millede resultant moodustabki propelleri tõmbe.

Lennuki juhtimine toimub tüüride süsteemi abil, mis võimaldavad pöörata lennukit kolme vastastikku risti oleva telje ümber.

Gümnaasiumi magnetismi- ja elektrikursuse raudvaraküsimused.

Koostatud end. Õpetajate Koja Füüsika ja Kosmograafia Õpetamise Toimkonna poolt.

Magnetism.

1. Magnetipooluste vastastikune mõju. Kompass ja magnetnõela deklinatsioon.
2. Magnetiväli ja magneti tungjooned.
3. Maa magnetismi elemendid (inklinatsioon, deklinatsioon).

Elekter.

1. Elektriseeritud kehade vastastikune mõju.
2. Juhid ja isolaatorid (metallid, inimese keha, soolalahused; õhk, siid, parafiin).
3. Elektrivoolu toimed — magnetiline, keemiline ja soojuslik — ning nende toimete rakendusi (elektromagnet, mõõduriistad, akumulaator, valgustus, kaitsmed).
4. Takistuse olenevus juhtme pikkusest, ristilõikest ja ainesest.
5. Side voolu tugevuse, pinge ja takistuse vahel (Ohmi seadus). Valem: $I = \frac{u}{R}$.
6. Elektriühikud: amper, volt, oom.
7. Elektriline mahtuvus.
8. Mõne galvaani elemendi ehitus ja pinge.
9. Eritakistus.
10. Ampermeetri ja voltmeetri asetamine vooluahelasse.
11. Joule'i seadus ($Q = 0{,}24\, I^2Rt$).

12. Voolu töö ja võimsus. Valem: $W = A \cdot P$ (vattides).

13. Polarisatsiooninähtus ja selle kasutamine akumulaatoris (tinaakumulaatori püsiv pinge 2 volti).

14. Elektromagneti pooluste määramine.

15. Elektrimootor. Ankru pöörlemise põhjendus.

16. Induktsioonvoolu tekkimine. Dünamo. Tähtsamate osade kirjeldus ja voolu tekkimise põhjendus.

17. Alaline ja vahelduvvool.

18. Eneseinduktsiooni nähtus.

19. Transformaator.

20. Katood- ja röntgenikiired.

21. α-, β- ja γ-kiired.

22. Elektromagnetilised lained ja nende püüdjad.

23. Elektrontoru.

Sisukord.

Lk.

Eessõna 3

Magnetism . . . . . 5— 15

Elekter . . . . . 16—152

Elektrostaatika 16

Elektriväli ja elektrilaeng 16

Pinge 26

Elektrimahtuvus ja kondensaator 32

Elektrodünaamika 39

Elektrivool. Elektrivoolu põhinähtused 39

Voolu tugevus ja takistus. Ohmi seadus 42

Pinge langus. Ohmi seadus juhtme üksikute osade kohta 52

Voolusoojus. Voolu võimsus 60

Elektrienergia 67

Termoelekter 69

Elektrolüüs 71

Elektrolüüsi rakendusi 77

Polarisatsioonivool 79

Elektromagnetism 84

Voolu ja magnetivälja vastastikune toime 89

Elektrimõõduriistad 90

Elektromagnetiline induktsioon 93

Generaatorid ja mootorid 99

Vahelduvvool 107

Elektrivool hõrendatud gaasides 117

Õhu ionisatsioon 126

Radioaktiivsus 129

Elektrivõnkumised ja elektromagnetilised lained. Raadiotelegraaf ja -telefon 135

Elektrontoru 147

Raadio 150

Voolamisnähtused ja lendamine . . . . . 153—173

Gümnaasiumi magnetismi- ja elektrikursuse raudvaraküsimused 174

HIND RM. 3.25