

## 24 Elektriika

Električni naboji – Zaznavanje nabojev – Ločevanje nabojev – Magnetni dipoli – Zemlja kot magnet – Električni tok – Elektroliza snovi – Magnetni učinek toka – Električna napetost – Električni upor – Meritve vezij

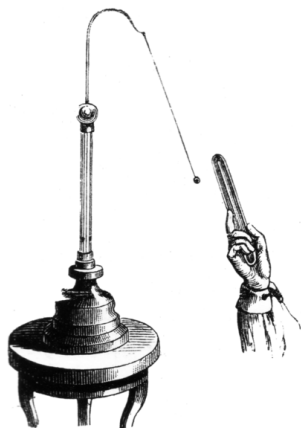
### 24.1 Električni naboji

Naelektritev snovi

Že stari izdelovalci nakita so opazili, da jantar (okamenela smola iglavcev), ko ga čistijo z volneno krpo, privlači lase, ptičja peresca in koščke slame (TALES). Podobno se zgodi pri drgnjenju steklene palice s svilenim robcem. Rečemo, da smo jantar ali steklo *naelektrili* oziroma da sta postala *električna*. Tudi mnogo drugih snovi lahko naelektrimo. Kar vsiljuje se misel, da pri drgnjenju na palico "nekaj pride" ali tam "nastane". Tisto nekaj lahko tudi "obrišemo" ali "izničimo" z vlažno roko; palica se pri tem *razelektri*. Ne naelektrita oziroma razelektrita pa se le palici, ampak tudi krpi, s katerima ju drgnemo.

Dve vrsti naelektritve

Za lažje preučevanje opaženega pojava naredimo več kroglic iz plute ali bezgovega stržena. Prevlečemo jih s kositrno folijo (staniolom) in obesimo na svilene niti. — Ko naelektreno stekleno palico približamo kroglici, jo palica najprej pritegne k sebi, po dotiku pa odbije. Povsem enako se vede kroglica, če uporabimo naelektreno jantarno palico. — Dve kroglici, dotaknjeni z naelektrenim steklom, se med seboj odbijata. Odbijata se tudi, če sta bili dotaknjeni z naelektrenim jantarjem. — Kadar pa je ena dotaknjena s steklom in druga z jantarjem, se privlačita.



**Slika 24.1** Naelektrena steklena palica privlači kroglico iz bezgovega stržena. (Lutken, 1878)

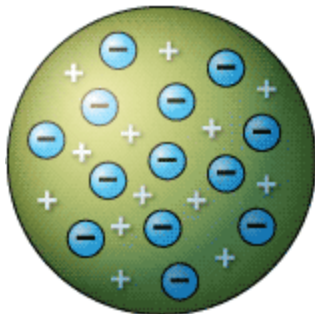
Kaže torej, da se naelektritev prenaša s palice na kroglico ob njenem stiku. Prenašata se tako "steklena" kot "jantarna" naelektritev. Istoimenski naelektritvi, recimo stekleni, se odbijata, raznoimenski pa privlačita. Odmiki kroglic kažejo, da sta tako privlak kot odboj odvisna od medsebojne razdalje kroglic, in sicer z razdaljo pojemata. Vse ostale naelektritve se vedejo bodisi kot steklena ali kot jantarna.

Izničenje naelektritve

Če staknemo raznoimensko naelektreni kroglici, se njuni naelektritvi bolj ali manj izničita, kar pokaže zmanjšan odklon kroglic iz ravnovesne lege. To se zgodi ob neposrednem stiku, pa tudi preko vmesne "prevodne" povezave, na primer bakrene žice, obešene na svileni niti. Prevajajo kovine, ne pa svilena nit in suh zrak. Prvim rečemo *prevodniki*, drugim *izolatorji*. Meja med obema ni ostra. Poseben primer je, ko kroglico povežemo z Zemljo, najpreprosteje kar tako, da jo primemo ali se je dotaknemo z žico; seveda ne smemo imeti izolirnih podplatov. Takrat naelektritev kroglice – steklena ali jantarna – povsem izgine.

Nosilci in naboji

Kako si razlagamo opisane pojave? Zamišljamo si, da so atomi – kakor potica z rozinami – posejani z drobnimi in zelo lahкими delci, *elektroni*. Koliko jih je, je seveda preuranjeno domnevati. Večina elektronov je v notranjosti in nekaj na površini. Elektroni in glavnina atoma – *jedro* – so električno *nabiti* oziroma nosijo električni *naboj*. Naboj jedra samovoljno proglasimo za pozitivnega in naboj elektrona za negativnega. Naboj je – tako kot masa – lastnost nosilca in je nespremenljiv. Naboj jedra je nasprotno enak skupnemu naboju vseh vsebujočih elektronov. Navzven je atom zato *nevtralen*. Istoimenski naboji se odbijajo, nasprotnoimenski privlačijo. Te sile poimenujemo *električne sile* in jih bo treba še podrobno raziskati; za zdaj vemo le, da z razdaljo pojemajo. V prevodnikih so površinski, "prosti" elektroni zlahka gibljivi od atoma do atoma, v izolatorjih pa ne.



**Slika 24.2** Model atoma kot potice z rozinami. Atom sestoji iz pozitivno nabitega jedra, ki vsebuje negativno nabite elektrone. Skupaj jih drži privlačna sila med raznoimenskimi naboji. (Nobel Media)

Ob stiku (drgnjenju) dveh primernih snovi preide majhen delež elektronov z ene na drugo stran. Višek ali primanjkljaj elektronov se kaže kot naelektrenost ene ali druge vrste: jantarna ali steklena. Rečemo, da ima telo neto naboj.

Ali je neto naboj na nalektrenem steklu oziroma jantarju posledica viška ali primanjkljaja elektronov, zaenkrat ne vemo; elektroni so tako lahki, da jim s tehtnico ne pridemo do živega. Vendar to do nadaljnjega ni pretirano pomembno. Neto naboj na prevodniku – pozitiven ali negativen, primanjkljaj ali višek elektronov – je namreč vedno porazdeljen po njegovi površini, ker se istoimenski naboji med seboj pač odbijajo. Med stikanjem prevodnikov stečejo elektroni od gosto naseljenih proti redkeje

naseljenim področjem. To lahko formalno obravnavamo tudi kot gibanje pozitivnih nabojev v nasprotni smeri, ne meneč se za dejansko gibanje snovnih nosilcev.

## 24.2 Zaznavanje nabojev

Elektroskop Viseče staniolne kroglice s svojim odklonom iz ravnovesne lege kažejo prisotnost nabojev. Bolj občutljiva sta dva tanka zlata lističa, viseča drug ob drugem s konca navpične kovinske palice, *elektrode*, in pokrita s steklenim zvonom, da ju ne moti gibanje zraka. Zvon je postavljen na prevodno podlago, je *ozemljen*. To je *elektroskop*.



**Slika 24.3** Elektroskop z zlatima lističema. Če sta lističa naelektrena, to je, če vsebujeta višek ali primanjkljaj elektronov, se odbijata. (Hawkins, 1914)

Ko se z nabito palico – stekleno ali jantarno – dotaknemo elektrode, se prinešeni naboj – najsibo posledica viška ali primanjkljaja elektronov – razširi na oba lističa, ki se zato odklonita drug od drugega. Velikost odklona kaže, koliko je naboja. Z roko se dotaknemo elektrode, njen naboj steče v Zemljo in lističa se povrneta v visečo lego.

Influenca nabojev Elektroskopska lističa se razmakneta tudi takrat, ko nabito palico samo približamo elektrodi, ne da bi se je sploh dotaknili. Ko palico odmaknemo, tudi lističa uplahneta. Razlaga je naslednja. Postavimo, da je palica nabita pozitivno. Njen pozitivni naboj pritegne negativne naboje v elektrodi na vrh in "potisne" pozitivne naboje na dno. Rečemo, da so se v nevtralni elektrodi *influencirali* naboji. Lističa se zato naelektrita pozitivno in se odklonita. Ko palico odmaknemo, se ločeni naboji zaradi privlačevanje spet združijo in nevtralizirajo.

Če se medtem, ko so naboji na elektrodi influencirani, dotaknemo vrha elektrode z roko, steče tamkajšnji negativni naboj v Zemljo in na elektrodi preostane višek pozitivnega naboja. Ko nato odmaknemo palico, ostane elektroda nabita in lističa odmaknjena.

Zdaj tudi razumemo, zakaj nabita palica priteguje koščke papirja in nevtralne staniolne kroglice. Kriva je influenza nabojev. Postavimo, da je palica nabita pozitivno. Na bližnji strani kroglice ali koščka papirja se potem influencirajo negativni naboji in na

nasprotni strani pozitivni. Sila na bližnje naboje je večja kot na oddaljene, zato prevlada privlak.

### 24.3 Ločevanje nabojev

Torni generator

Ugodno bi bilo imeti stroj, ki bi na primernem telesu ustvarjal naboj, pozitivni ali negativni. Najpreprostejša je okrogla steklena plošča, ki jo vrtimo in ki se je dotikata dva drsnika: prvi je usnjena blazina, povezana z Zemljo, in drugi kovinska ščetka, povezana s kovinsko kroglo na izolirnem podstavku. Drgnjenje med krpo in steklom "ustvarja" na obeh naboje: tisti na steklu se prenaša preko ščetke na kovinsko kroglo, oni na krpi pa v Zemljo. Kovinska krogla se, postavimo, nabije pozitivno. Nasprotni, negativni naboj se razširi in porazgubi po širni Zemlji.

Naboj na kovinski krogli ne more nikamor, ker je krogla izolirana od Zemlje. Če se je dotaknemo s prstom, pa ustvarimo povezavo z Zemljo in preko nas steče pozitivni neto naboj v tla. Pri tem nas strese. Močno nabite krogle se ni treba niti dotakniti: ko ji približamo prst, preskoči iskra: to je sled nabojev, ki tečejo skozi zrak.



**Slika 24.4** Drgnjenje roke ob vrtečo se stekleno ploščo ustvarja pozitivne naboje na plošči in negativne v roki. Prvi se prenašajo in kopičijo na kovinskem valju, drugi sproti odtekajo v Zemljo. Ko se izolirana gospodična dotakne valja, se tudi sama naelektri pozitivno. Poljub gospoda ustvari prevodno povezavo z Zemljo, po kateri steče naboj ob "prijetnem" ščemenju. (Bose, 1744)

Kondenzator

Na kroglo ali valj v tornem generatorju ne gre prav dosti, recimo, pozitivnega naboja, ker ta "tišči nazaj" in zavira dotok svežih nabojev. Kaj, ko bi valj obdali z drugim, ozemljenim valjem: potem bi pozitivni naboj na notranjem valju pritegnil negativni naboj iz Zemlje na zunanji valj, ta negativni naboj pa bi "razredčil" zaviralni vpliv pozitivnega naboja. Takšen dvojni valj zlahka izdelamo: litrski steklen kozarec znotraj in zunaj ovijemo s staniolno folijo; zunanjo folijo ozemljimo, notranjo pa preko kovinske palice skozi izolirni zamašek povežemo s ščetko generatorja. To je *kondenzator*, posoda za shranjevanje naboja. Drži več dni. Čim večja je ploščina folije in čim tanjši je kozarec, tem več naboja gre vanj, kar pokaže elektroskop.



**Slika 24.5** Električni kondenzator – naprava za shranjevanje naboja. (Niigata University)

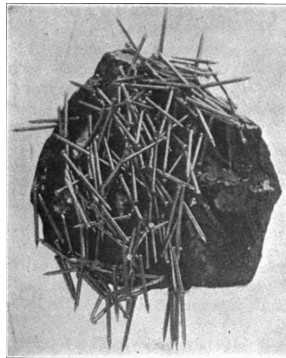
Kovinska palica, ki štrli iz kondenzatorja, mora imeti na vrhu kroglo, da naboj nikjer ni preveč nagneten in da zato ne odteka v okolico. Če tej krogli približamo žebelj ali prst, držoč z drugo roko zunanjo folijo kozarca, bomo doživeli izkušnjo, ki je ne bomo zlahka pozabili!

#### 24.4 Magnetni dipoli

Magnetizem

Kovačem je od nekdaj znano, da kosi nekatere železove rude privlačijo železne žebelje (TALES). Rekli bomo, da so ti kosi *magnetni*. Na vsakem takem kosu, *magnetu*, sta dve odlikovani točki, kjer je privlak posebno močan. To sta *magnetna pola*. Ležita na medsebojno nasprotnih straneh. Najlaže ju najdemo tako, da magnet povaljamo v železnih opilkih. Dober magnet drži toliko, kot je sam težak.

Morda se da pola ločiti? Magnet s kladivom in dletom razbijemo na kose, vendar ima, presenetljivo, vsak kos spet po dva pola. Nikoli ne najdemo kosa, ki bi imel samo en pol.



**Slika 24.6** Magnetni kamen privlači in drži ob sebi železne žebelje. (Annet, 1921)

Namagnetenje

Žebli, ki visijo na magnetu, so tudi sami magnetni: privlačijo druge žebelje. Ko pa jih odtrgamo proč, izgubijo svojo magnetnost. Drugače je z jekleno iglo ali palico: ko jo nekajkrat pogladimo s polom magneta, se namagnetni in magnetnost tudi obdrži. Postane trajen *paličasti magnet* s polom na vsakem koncu. Ni videti, da bi izvorni magnet po glajenju kaj oslabel.

Trajni magneti so kolikor toliko trajni le, če z njimi ravnamo obzirno. Po močnem udarjanju s kladivom ali po segrevanju do rdečega žara povsem izgubijo svoj magnetizem.

Magnetni dipoli Za preučevanje magnetizma izdelamo nekaj jeklenih paličastih magnetov in jih po potrebi obesimo na niti ali položimo na deščice na vodi. Takoj ugotovimo, da obstajajo magnetni poli dveh vrst: eni se med seboj privlačijo in drugi odbijajo. Če izberemo poljuben magnetni pol kot referenco, potem ta nekatere pole privlači – označimo jih z "A", in druge pole odbija – recimo jim "B". Pokaže se, da se enako poimenovani poli med seboj odbijajo in različno poimenovani privlačijo. Sile, recimo jim *magnetne sile*, pojemajo z oddaljenostjo. Pola na istem magnetu sta zmeraj različna.

Kako si razlagamo opisane pojave? Zamišljamo si, da so atomi železa (in morda še nekaterih snovi) majhni magneti, vsak z dvema poloma. Če osi teh *elementarnih magnetov* kažejo v vse smeri, snov navzven ni magnetna. Če so pa – vsaj deloma – usmerjene v isto smer, je snov magnetna. Ko uredim elementarnim magnetom (v magnetu) približamo neurejene (v žeblju), se slednji usmerijo in pritegnejo proti prvim. Namagnetenje je začasno ali trajno. Vsakršno tresenje usmerjenih elementarnih magnetov – s kladivom ali vročino – jih usmeri v vse smeri in magnetizem izgine.

#### 24.5 Zemlja kot magnet

Zemeljski magnetizem

Vsak paličasti magnet, ki je vrtljiv okoli navpične osi in ki ga ne moti bližina drugih magnetov in železja, se – presenetljivo – zavrti v smer sever-jug. Iz tega sklepamo, da je tudi Zemlja orjaški magnet s poloma blizu geografskih polov (GILBERT). Seveda jo izkoristimo za poenoteno določanje polov na drugih magnetih. Tisti pol magneta, ki kaže proti severu, poimenujemo *severni*, N, in drugega *južni*, S. To sta boljši oznaki kot dosedanji oznaki A in B. Vemo že, da se dva pola privlačita, če sta raznoimenska, in odbijata, če sta istoimenska. Zemlja ima zato na severu južni magnetni pol in na jugu severnega. Iz očitnih razlogov pa prvega raje poimenujemo severni *geomagnetni pol* in drugega južni geomagnetni pol.

Magnetni kompas

Obračanje magnetne igle proti severu oziroma jugu ima veliko praktično vrednost. Vrtljiva magnetna igla, zaprta v bakreni ali leseni škatlici, tvori srce magnetnega *kompasa*. Pomorščakom v dobi raziskovanj je bil življenjskega pomena. Zmeraj, tudi v megli in oblačnem vremenu, je verno kazal, kje je sever. Seveda so morali paziti, da v bližini ni bilo motečega železja. Zato so tudi hudo kaznovali vsakogar, ki je stikal naokrog: na jambor so mu pribili roko.



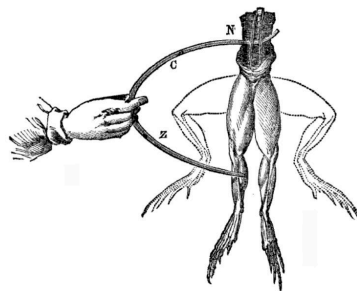
**Slika 24.7** Kompas – magnetna igla, vrtljiva okrog navpične osi. Če je nič ne moti, kaže proti Zemljinem severnem in južnem geomagnetnem polu. Prikazana je replika žepnega kompasa iz dobe parnikov. (Dollond, London)

Kompasova igla ne kaže natanko proti geografskemu severu, temveč je od njega bolj ali manj odmaknjena. Temu odmiku rečemo *magnetna deklinacija*. Odvisna je od kraja meritve in znaša v Ljubljani  $2^\circ$  vzhodno. Deklinacija se spreminja tudi s časom, v Ljubljani okrog  $10^\circ$  na 100 let. Očitno se zemeljska magnetna pola premikata.

## 24.6 Električni tok

Žabji krak

Razelektritev kondenzatorja skozi naše telo povzroči šok: mišice se skrčijo. Morda se skrčijo tudi mrtve, ne samo žive mišice? Poskusimo z žabjim krakom: da, skrči se. Pri izvajanju tovrstnih poskusov pa opazimo naslednje: ko se pri seciranju dotikamo kraka z železnim skalpelom in z bakrenim kavljem ter ju slučajno staknemo, krak nepričakovano trzne! Kako to razumeti? Morda se ob mokrem stiku z mišico (vodno raztopino raznih snovi) kovina naelektri, nekako tako, kot pri suhem stiku stekla in svile. Železo se naelektri drugače kot baker, in ko se stakneta, stečejo naboji naokrog, tudi skozi krak, in ga stresejo. Krak je torej hkrati sproizvajalec in pokazatelj električnega toka (GALVANI).



**Slika 24.8** Žabji krak, ki se ga dotikata železna in bakrena pinceta, trzne, ko pinceti staknemo. (Galvani, 1791)

Električni člen

Zdaj vemo, kako naprej. Eden izmed poskusov je naslednji. V vodno raztopino žveplene kisline  $H_2SO_4$  vtaknemo cinkovo in bakreno palico ter ju zunaj povežemo z bakreno žico. Žica se segreva, ob bakru se izločajo mehurčki plina, ki ga določimo kot vodik  $H_2$ , cinkova palica pa se počasi razkrajja in pod njo se začne na dnu nabirati bel prah, ki ga določimo kot cinkov sulfid  $ZnSO_4$ . Segrevanje žice pojasnimo tako, da skozi njo tečejo prosti elektroni, ki trkajo ob atome in jim večajo živahnost nihanja.

Rečemo, da smo sestavili *električni člen*, ki po žici poganja *električni tok* (VOLTA).

Pozitivni in negativni ioni

Kaj poganja elektrone in v katero smer se gibljejo? — Iz osmозnega tlaka [23.10] vemo, da se molekule žveplene kisline v vodi razcepijo v več delov; postavimo, da je to trojica H, H in SO<sub>4</sub>. — Predpostavimo, da ti deli niso električno nevtralni, ampak nabiti, in jih poimenujmo *ione*: dva vodikova in en sulfidni. Ioni so torej atomi ali molekule, ki imajo višek ali primanjkljaj elektronov. — Sulfidni ioni iz cinkove palice ruvajo (nasprotno naelektrane) cinkove ione in se z njimi združujejo v nevtralen cinkov sulfid, ki pada na dno. Ker so v cinku zunanji elektroni atomov zlahka gibljivi, se zdi verjetno, da so izruvani cinkovi ioni pozitivni. Sulfidni ioni so potemtakem negativni in vodikovi pozitivni. — Višek elektronov, ki ostaja v cinkovi palici po ruvanju, se razbeži po žici do bakrene palice. Tam privlači pozitivne vodikove ione in se z njimi združi v nevtralne molekule vodika, ki uidejo. — Postopek poteka kar naprej: po žici tečejo elektroni od cinka do bakra, po raztopini pa vodikovi in sulfidni ioni vsak v svojo smer. Pretakanje se ustavi najkasneje takrat, ko se porabita ves cink ali žveplena kislina. V praksi pa člen obnemore že dosti prej: vodik se namreč ob bakreni palici ne izloča povsem, ampak se nabira na njej in preprečuje dostop vodikovim ionom. Podobno se dogaja s cinkovim sulfidom na cinkovi palici.

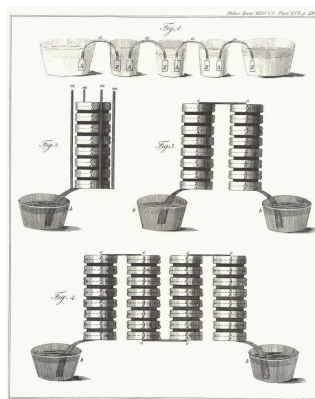
Pozitivna in negativna elektroda

Če odstranimo žico, se na cinkovi palici nabere toliko elektronov, da nastali negativni naboj odbija napade sulfidnih ionov. Razkroj cinka se ustavi. Iz bakrene palice pa vodikovi ioni posrkajo toliko elektronov, da nastali pozitivni naboj preprečuje dotok vodikovih ionov. Tudi izločanje vodika se ustavi. Cinkovo elektrodo z viškom elektronov zato poimenujemo *negativna elektroda*, bakreno elektrodo z manjkom elektronov pa *pozitivna elektroda*. Elektroni tečejo po žici od negativne na pozitivno elektrodo.

Elektrone poganjajo po žici tudi drugačne kombinacije palic in raztopin. Vsak tak električni člen ima dve elektrodi, namočeni v *elektrolit*. Vsi delujejo podobno: na eni elektrodi nastaja višek elektronov, se po žici širi na drugo elektrodo in tam zgineva v elektrolit. Nekateri spretno sestavljeni člani shajajo s "suhim" elektrolitom in ne oddajajo v okolje nič snovi.

Električne baterije

Če zaporedno povežemo več električnih členov, dobimo *električno baterijo* in segrevanje žice je močnejše. Očitno teče po njej večji tok. Neskljenjena baterija pa ima - v primerjavi s posameznim členom - tudi večji presežek oziroma večji primanjkljaj elektronov na elektrodah.



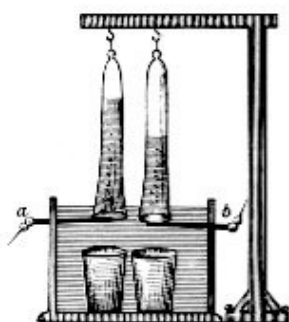
**Slika 24.9** Baterija – vir električnega toka.  
(Volta, 1800)

Pri bateriji, sestavljeni iz več sto (!) členov, sta naboja na nesklenjenih elektrodah dovolj velika, da lahko z njima naelektrimo druga telesa, recimo elektroskop. Tako ugotovimo, da ima steklena palica istoimenski naboj kot pozitivna elektroda baterije. Naboj na stekleni palici je torej pozitiven, to je, nabita palica ima primanjkljaj elektronov. Nabita jantarjeva palica pa ima presežek elektronov.

#### 24.7 Elektroliza snovi

V vodnih raztopinah kislin, baz in soli – elektrolitih – so prosto gibljivi ioni. Če v tak elektrolit vtaknemo dve kovinski ali ogljeni elektrodi, povezani s poloma baterije, pričakujemo zanimive rezultate.

Razcep vode Ko teče električni tok skozi vodo, ki smo ji dodali malo žveplene kisline, se na negativni elektrodi – tisti, ki je povezana z negativnim polom baterije – izločajo mehurčki vodika in na pozitivni mehurčki kisika. Kisikova elektroda mora biti iz platine, ker se sicer oksidira. Na negativni elektrodi torej (kislinski) vodikovi ioni prisvajajo presežne elektrone in uhajajo kot nevtralne molekule vodika. Sulfidni ioni pa iz molekul vode trgajo vodikove ione, ki nadomeščajo tiste, ki jih je zmanjkalo, nastali kisikovi ioni pa na pozitivni elektrodi oddajo elektrone in uidejo kot nevtralne molekule kisika. Količina kisline se ne spremeni, porablja se le voda. Tako na udoben način pridobivamo oba plina, in sicer s cepitvijo vode!



**Slika 24.10** Električni tok skozi vodno raztopino žveplene kisline razcepi vodo na vodik in kisik.  
(Ritter, 1800)

**Etalon naboja** Ko teče električni tok skozi raztopino srebrovega nitrata,  $\text{AgNO}_3$ , se na negativni elektrodi nalaga srebro. Izločanje srebra izkoristimo za kvantitativno definicijo naboja  $e$ . Predpostavimo, da vsi srebrovi ioni nosijo enak naboj; potem je masa izločenega srebra sorazmerna s pretočenim nabojem. Če se izloči 1,12 mg srebra, proglasimo, da se je pretočil naboj 1 *coulomb* (C). Zakaj ne natanko 1 mg, bo razvidno v nadaljevanju. Če imata elektrodi ploščino nekaj kvadratnih centimetrov in sta oddaljeni kakšen decimeter; če znaša koncentracija elektrolita mol na liter; in če je priključena desetčlenska baterija, potem se izloči gram srebra v približno petnajstih minutah. V tem času se torej pretoči okrog  $10^3$  C naboja.

**Jakost toka** Preko pretočenega naboja je kvantificirana tudi *jakost toka*

$$I = \frac{e}{t}. \quad (24.1)$$

Enoto C/s na kratko poimenujemo *amper* (A). To seveda pomeni tudi obratno:  $1 \text{ C} = 1 \text{ As}$ , *ampersekunda*. Ker se naboj ohranja in se nikjer v krogotoku ne kopiči, mora biti jakost toka skozi vsak presek kroga enaka. Pri elektrolizi srebrovega nitrata, ko se izloča gram srebra v petnajstih minutah, teče torej tok z jakostjo približno 1 A.

**Gostota toka** Ni vseeno, skozi kakšen presek teče tok vzdolž tokokroga. Manjši ko je presek, bolj se v njem gnetejo nosilci nabojev in bolj segrevajo okolico. Zato je smiselno definirati *gostoto (električnega) toka* kot

$$j = \frac{I}{S}. \quad (24.2)$$

Poskusi pokažejo, da žica s presekom  $1 \text{ mm}^2$  zdrži tok do 10 A, ne da bi se pretirano segrela. Pri večjih gostotah toka se žica močno segreje in celo stali.

**Elektrolizni zakon** Elektroliza različnih snovi (srebrovega nitrata, bakrovega sulfata in drugih) pokaže, da so z enoto pretočenega naboja  $e$  izločene mase  $m$  sorazmerne s kilomolskimi masami  $M$ , deljenimi z valenco  $Z$  atomov (z ekvivalentnimi masami snovi):

$$\frac{m}{e} = \frac{1}{F} \frac{M}{Z} \quad (24.3)$$

$$F = 96 \cdot 10^6 \text{ C}.$$

To je *elektrolizni zakon* (FARADAY). Nedvoumno sporoča, da nosi vsak ioniziran atom (ion) toliko dodatnih elektronov, kakršna je njegova valenca, oziroma da mu jih prav toliko manjka.

Pravzaprav velja obratno: valenca atoma je odraz tega, koliko dodatnih elektronov sprejema ali oddaja pri interakciji z atomi v okolici. To nadalje pomeni, da pri združevanju atomov v molekule

igrajo osrednjo vlogo njihovi *valenčni elektroni*. Ione je zato smiselno označevati takole:  $H^+$ ,  $O^{2-}$ ,  $SO_4^-$  in podobno.

Osnovni naboj Če se izloči  $N_A$  atomov, znašata  $m = M$  in  $e = N_A Z e_0$ . Vstavitev njunega razmerja v elektrolizni zakon pove:

$$F = N_A e_0. \quad (24.4)$$

S tem se odpre možnost za izračun osnovnega naboja iz kilomolskega števila in obratno. Že znana ocena za kilomolsko število  $N_A \sim 10^{27}$  pove  $e_0 \sim 10^{-19} C$ . En coulomb je torej toliko naboja, kot ga nosi  $\sim 10^{19}$  elektronov.

## 24.8 Magnetni učinek toka

Naelektrenje in sila med električnimi naboji ter namagnetenje in sila med magnetnimi dipoli puščata občutek, da so električni in magnetni pojavi sorodni in morda povezani med seboj. Pri iskanju povezave priskoči na pomoč sreča: ko spustimo električni tok po žici, da bi preučevali njeno segrevanje, se naključno zraven ležeča magnetnica odkloni iz svoje lege (OERSTED)! To nam da izhodišče za nadaljnje raziskave.

Tok vpliva na magnet

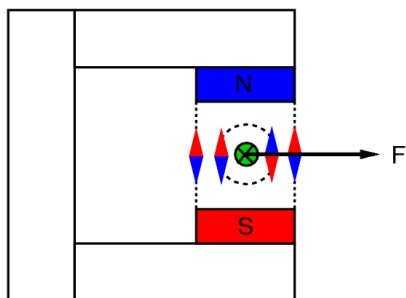
Nad vodoravno magnetnico, ki seveda kaže proti severu, namestimo vodoravno žico v poljubni smeri. Ko skozi spustimo električni tok, se igla odkloni iz svoje smeri in se postavi pravokotno na žico. Če smer toka obrnemo, se igla odkloni enako, le severni in južni pol sta zamenjana. V mislih zgrabimo žico z levo roko tako, da kaže iztegnjeni palec v smer gibanja elektronov. Potem zviti prsti kažejo, kako so usmerjeni severni poli okolišnjih magnetnic. To je "pravilo leve roke".



**Slika 24.11** Magnetna igla v bližini električnega toka se obrne v smer pravokotno na tok. Prikazan je spomenik odkritelju. (Deutches Museum, Muenchen)

Magnet vpliva na tok

Če deluje tok na magnet, mora tudi magnet delovati na tok. Vodoravna žica, obešena kot gugalnica med navpično razmaknjenima poloma podkvastega magneta, se odkloni paralelno vodoravno, ko skozi steče tok. Če zamenjamo smer toka, se gugalnica odkloni v nasprotno smer. Spet v mislih zgrabimo žico z levo roko in zviti prsti pokažejo, kako se postavijo okolišnje magnetnice pod vplivom toka. Pogledamo, na kateri strani žice so magnetnice usmerjene enako, kot bi jih usmeril podkvasti magnet. Sila deluje na žico v nasprotni smeri.



**Slika 24.12** Sila magneta na vodnik. Elektroni tečejo v ravnino risbe. Notranji magnetnici sta narisani tako, kot da bi nanju deloval zgolj vodnik, zunanji pa tako, kot da bi deloval zgolj magnet. Magnetove magnetnice delujejo na tokovne magnetnice s silo  $F$ .

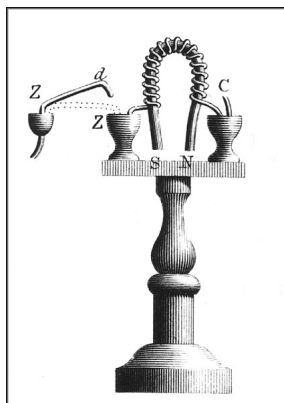
Tok vpliva na tok

Sila deluje tudi med samimi žicami s tokom. Dve navpično obešeni vzporedni žici se privlačita (se stisneta druga k drugi), če po njiju tečeta nasprotno usmerjena tokova, sicer se pa odbijata.

Med magneti in tokovi (gibajočimi se naboji) torej delujejo sile iste vrste kot med samimi magneti in zanje kar obdržimo ime magnetne sile. Očitno so odvisne od jakosti tokov in magnetov, od njihovih oblik in razsežnosti ter od medsebojnih leg. Vse to bomo morali raziskati.

Elektromagnet

Če se tok do okolice vede kot magnet, kaj ne bi moral vplivati tudi na železo ali jeklo? Dolgo žico navijemo na valj; to je *tuljava*. Ko skozi spustimo tok, "postane" tuljava paličast *elektromagnet*: ako ji približamo železni žebelj, ga res potegne k sebi. Primerna železna palica, vstavljena v tuljavo, pa postane močno magnetna. Njen magnetizem izgine, ko izključimo tok. Če namesto palice vstavimo jekleno iglo, se namagnetni in magnetizem obdrži. Tako zlahka delamo magnetne igle.

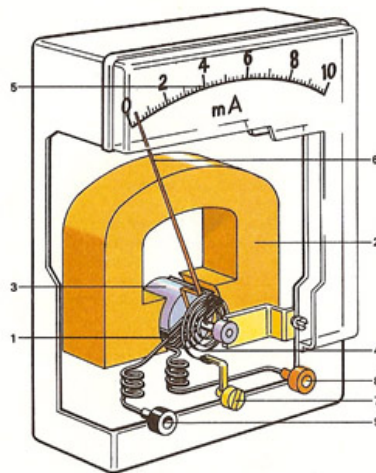


**Slika 24.13** Prvi elektromagnet. Posodice so kontakti z živim srebrom. Leva posodica služi kot stikalo. Magnet je z enočlensko baterijo dvignil pet kilogramov. (Sturgeon, 1824)

Tuljavni ampermeter

Magnetno silo izkoristimo za udobno merjenje toka. Med pola podkvastega magneta namestimo tuljavo. Ko skozi spustimo tok, nanjo delujejo magnetne sile, ki jo poskušajo zavrteti. Nasprotuje jim priključena spiralna vzmet. Zasuk tuljave kaže jakost toka skozi. S primerno oblikovanim magnetom je zasuk kar sorazmeren toku. To je *ampermeter*. Umerimo ga z elektroliznim etalonom: na baterijo priključimo zaporedno zvezano elektrolitsko kad in ampermeter. Skozi oba "porabnika" teče isti tok. Različne tokove dobimo z vključevanjem različnega

števila baterijskih členov. Z umerjenim ampermetrom udobno merimo tokove skozi žice. Z zelo občutljivimi merilniki, ki imajo tuljavo obešeno na tanki žici, sežemo vse do  $10^{-9}$  A.



**Slika 24.14** Ampermeter - merilnik električnega toka. Vrtljiva tuljava (1) je nameščena med poloma magneta (2). Ustavlja jo spiralna vzmet (4). Zasuk tuljave je sorazmeren s tokom po njej. (Anon)

Balistični ampermeter

Kaj če skozi ampermeter spustimo naboj iz naelektrenega telesa v Zemljo? Kako se ampermeter sploh vede ob kratkih sunkih toka? To ugotovimo tako, da skozenj spuščamo pravokotne sunke znane jakosti in trajanja; pomagamo si z uro štoparico kot stikalom. Pokaže se, da je odklon kazalca sorazmeren s pretočenim nabojem  $e = It$ , če je le sunek kratek v primerjavi z nihajnim časom tuljave. S tem postane instrument merilnik naboja, *balistični ampermeter*. Z njim udobno merimo naboje na naelektrenih telesih. Ko razelektrimo "litrski" kondenzator, ki ga je nabil torni generator, izmerimo naboj  $\sim 10^{-6}$  C. Torej celo najbolj nabita telesa vsebujejo izredno majhen neto naboj v primerjavi s tistim, ki ga električni člen v sekundi požene v žico.

## 24.9 Električna napetost

Grelni krog

Med pola baterije povežimo zaporedno ampermeter in dolgo žico, ki jo zaradi priročnosti zvijmo v spiralo. Po ustvarjenem krogu steče stalen tok, ki ga kaže ampermeter. Tok je odvisen od izbrane baterije, žice in celo ampermetra (ki je pravzaprav tudi kos žice): veččlenska baterija poganja večji tok; in skozi daljšo in tanjšo žico (iz iste snovi) teče manjši tok. Žica se pri tem greje; recimo ji kar grelec. Rahlo se greje tudi baterija in neznatno celo ampermeter. Pri dovolj tanki in dolgi grelni žici je segrevanje baterije in ampermetra zanemarljivo v primerjavi s segrevanjem grelca.

**Slika 24.15** Segrevanje vode s tokom. (Joule, 1841)



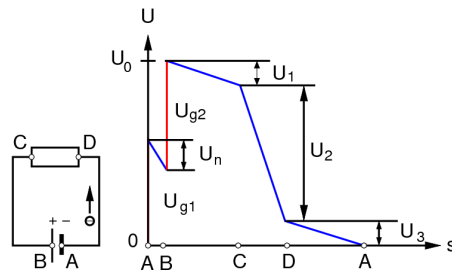
- Električno delo** Koliko toplote oddaja celotni krog, bi lahko v principu ugotovili tako, da bi ga potopili v vodo in merili porast njene temperature. V praksi pa uporabimo krog, kjer močno prevladuje grelec, in potopimo zgolj tega, ter računamo, kot da je potopljeno vse. Pri tem ugotovimo, da je povečanje notranje energije vode, ki ga kaže porast temperature, sorazmerno s pretočenim nabojem, kakor ga izmerita ampermeter in ura (Joule):
- $$cm\Delta T \propto It. \quad (24.5)$$
- Sorazmernostni koeficient pove, koliko energije se sprosti v vodo, to je, koliko *električnega dela* prejmejo nosilci nabojev (elektroni in ioni) od baterije na enoto pretočenega naboja:
- $$A = U_g e. \quad (24.6)$$
- Gonilna napetost** Koeficient  $U_g$  poimenujemo *gonilna napetost* uporabljene baterije. Večja kot je gonilna napetost, več dela vloži v enoto naboja, ko ga požene v tokokrog. Enoto napetosti, J/C, na kratko poimenujemo *volt* (V). Svežemu členu cink-ogljje tako izmerimo napetost 1,5 V ne glede na to, kako sta veliki njegovi elektrodi. Drugi členi imajo podobne napetosti.
- Sestavljanje napetosti** Zvežimo zapored dva člena tako, da poganjata tok v isto smer. Ko se skozi njiju pretoči naboj  $e$ , odda prvi člen delo  $U_{g1}e$  in drugi  $U_{g2}e$ . Oba skupaj oddata delo  $A = (U_{g1} + U_{g2})e$ . Isto delo lahko izrazimo tudi z neznano celotno napetostjo,  $A = U_g e$ . Izenačitev enač pove
- $$U_g = U_{g1} + U_{g2}. \quad (24.7)$$
- Napetosti členov se seštejeta. Če sta člena obrnjena nasproti drug drugemu, se pa odštejeta. Baterija iz  $n$  enakih in enako usmerjenih členov kaže torej  $n$ -krat večjo napetost kot posamezni člen. Takšna baterija nam dobro služi kot etalon in vir znanih napetosti.
- Padci napetosti** Namesto da merimo oddano toploto iz celotnega kroga, jo lahko izmerimo za vsak element posebej: grelec, baterijo in (v principu) ampermeter. Vsota oddanih energij je enaka celotni oddani energiji, vse preračunano na pretočeni naboj. Zdi se, kot da na vsak element, celo baterijo, "odpade" ustrezni del gonilne

napetosti,  $U_k = A_k/e$ . Poimenujmo ga *padec napetosti*. Vsota vseh padcev napetosti vzdolž kroga je potemtakem enaka gonilni napetosti:

$$U_g = \sum U_k. \quad (24.8)$$

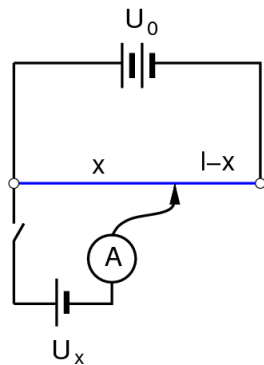
Predstavljamo si, da gibljivi naboji organizirano padajo vzdolž vodnika, prav kakor kamni vzdolž klancev; oboji pri tem trkajo z okolico in jo segrevajo. Negativno elektrodo baterije proglašimo za "dno" klanca, pozitivno elektrodo pa za njegov "vrh". Zato "drsijo" pozitivni naboji po klanecu navzdol in negativni po klanecu navzgor. V elektrolitih se hkrati gibljejo pozitivni in negativni naboji, v kovinah pa le negativni. Vodniki so takorekoč "električno nagnjeni".

Potujoč v mislih od pozitivnega pola baterije vzdolž vodnika, se klanec napetosti stalno znižuje, le na dveh mestih – na vsakem polu baterije – se navpično dvigne. Dviga sta tolikšna, da klanec na koncu spet doseže svojo izhodiščno višino. Skupna višina obeh dvigov, to je gonilna napetost baterije. Višinska razlika klanca nad posameznim odsekom kroga, to pa je lokalni padec napetosti. Naboji na klanecu drsijo – navzdol ali navzgor – zaradi lokalne strmine. Bolj globoka je, več toplote trošijo. Baterija pa v svoji notranjosti poganja pozitivne naboje na vrh in negativne na dno, dokler pač zmore.



**Slika 24.16** Napetost vzdolž tokokroga. Na elektrodah baterije napetost zraste, na upornikih pade. Vsota porastov je enaka vsoti padcev. Gonilne napetosti so rdeče, padci napetosti modri.

**Napetostni most** Vzdolž homogene žice s tokom je padec napetosti linearen. Če ga poznamo, lahko služi kot "merilni trak", ob katerem primerjamo neznanu gonilno napetost. Postopamo takole. Med krajišči žice priključimo referentno baterijo z znano napetostjo. Žica je opremljena z drsnikom. Med drsnik in en konec žice priključimo merjeno baterijo in zaporedno zvezan ampermeter. Ni potrebno, da je kalibriran. Baterija je obrnjena tako, da poganja naboj v nasprotni smeri kot referentna baterija. Drsnik postavimo v lego, ko ampermeter ne kaže nobenega toka. Napetost merjene baterije znaša potem tolikšen delež referentne napetosti, kot znaša drsnikov odklik proti celi žici. Če napetosti referentne baterije ne poznamo dobro, jo najprej umerimo z znano etalonsko baterijo, začasno nameščeno na mestu merjenja.



**Slika 24.17** Merjenje napetosti s kompenzacijo. Referentna baterija ustvarja na merilni žici linearen padec napetosti. Padec napetosti preko ustreznega odseka žice je enak napetosti merjenca. Tedaj skozi galvanometer ni toka.

Električna moč Na časovno enoto prejeto električno delo definira *električno moč*  $P = A/t$ , torej

$$P = UI. \quad (24.9)$$

Z definicijsko enačbo za moč je določena tudi njena enota:  
 $VA = J/C \cdot C/s = W$ .

### 24.10 Električni upor

Električni upor Kako – natanko – pa je jakost toka po grelcu odvisna od napetosti med njegovima priključkoma? Napetost nastavljam z etalonsko baterijo in merimo tok z ampermetrom. Z dovolj dolgo in tanko žico v grelcu poskrbimo, da je segrevanje baterije in ampermetra zanemarljivo: padec napetosti na grelcu je potem kar enak etalonski napetosti. Pokaže se sorazmernost:

$$U = RI. \quad (24.10)$$

To je *zakon upornosti* (OHM). Sorazmernostni koeficient  $R$  poimenujemo *električni upor* grelca in njegovo enoto  $V/A$  okrajšamo v *ohm* ( $\Omega$ ). Spiralna žica iz konstantana (zlitina 55 % bakra in 45 % niklja) z dolžino 10 m in s presekom  $1 \text{ mm}^2$ , priključena na napetost 1,5 V, prepušča tok 0,3 A in ima zato upor  $5 \Omega$ . Recipročno vrednost upora,  $1/R$ , poimenujemo prevodnost.

Specifični upor Električni tok po žici spominja na vodni tok po cevi, polni mivke. Pričakujemo, da dvakrat daljša cev prepušča dvakrat manj toka, in da tudi skozi dvakrat manjši presek teče dvakrat manj toka. Poskus (z znano baterijo in ampermetrom) to potrdi: upor žice je takole odvisen od njene dolžine  $l$ , preseka  $S$  in materiala:

$$R = \xi \frac{l}{S}. \quad (24.11)$$

Snovno konstanto  $\xi$  poimenujemo *specifični upor*. Za konstantan znaša  $0,49 \Omega \text{ mm}^2/\text{m}$  in za baker  $0,018 \Omega \text{ mm}^2/\text{m}$ . Slednji je med vsemi kovinami, z izjemo srebra, najboljši prevodnik. Specifični upor snovi je odvisen od temperature in večinoma z njo narašča. Njegovo recipročno vrednost,  $1/\xi$ , poimenujemo specifična prevodnost.

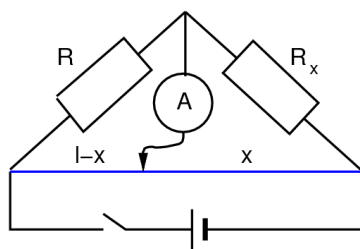
Sestavljanje upornikov Na baterijo lahko priključimo dva grelca z uporoma  $R_1$  in  $R_2$ . Če sta priključena zaporedno, teče skozi nju isti tok, njuna padca napetosti pa se seštevata:  $U = R_1 I + R_2 I = (R_1 + R_2) I$ . To pomeni, da je skupni upor enak

$$R = R_1 + R_2. \quad (24.12)$$

Na vzporedno vezanih upornikih je padec napetosti enak, njuna tokova pa se seštevata:  $I = U/R_1 + U/R_2 = (1/R_1 + 1/R_2) U$ . To pomeni, da je skupni upor enak

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}. \quad (24.13)$$

Uporovni most Merilna žica z drsnikom ni samo napetostni, ampak tudi uporovni most. Z njim izmerimo neznan upor takole. Na žico (priključeno na poljubno baterijo) priključimo vzporedno vejo z dvema zaporednima upornikoma, enim znanim in drugim neznanim. Vmesno točko med upornikoma povežemo preko ampermetra z drsnikom. Ni potrebno, da je ampermeter kalibriran. Drsnik pomaknemo v lego, da tok ne teče. Tedaj je razmerje uporov enako razmerju ustrežajočih odsekov na žici.



**Slika 24.18** Uporovni most – vezje za merjenje upornosti.

Trošena moč Zaradi povezave med napetostjo in tokom je moč, ki se troši v vodniku, izrazljiva tudi kot

$$P = RI^2. \quad (24.14)$$

Vodniki, v katerih teče enak tok, sipajo tem več moči, čim večji upor imajo. Zdaj razumemo, zakaj se baterija in ampermeter v krogu z "močnim" grelcem skoraj nič ne segrevata: skozi vse teče enak tok, a njuna upora sta mnogo manjša kot upor grelca.

### 24.11 Meritve vezij

Vezja, sestavljena iz električnih izvirov, porabnikov in vodnikov, so popolnoma določena, če poznamo tokove in napetosti v njih. Oboje je potrebno meriti.

Upor in vezava ampermetra Ampermeter je upornik, ki kaže tok skozi samega sebe. V tokovno vejo ga vključimo tam, kjer hočemo meriti jakost toka. Žal pri tem v vejo vnesemo dodatni zaporedni upor in zato zmanjšamo prvotni tok. Da motnja ni prevelika, mora biti notranji upor ampermetra čim manjši. Izmerimo ga, na primer, takole.

Na baterijo priključimo zaporedno zvezana upornik in ampermeter. Upornik izberemo tako, da kaže ampermeter

maksimalni odklon. Potem vzporedno k ampermetru vežemo spremenljivi upor in ga večamo, dokler se odklon ne zmanjša na polovico. Upor spremenljivega upornika je tedaj enak notranjemu uporu ampermetra.

Tuljava v tipičnem ampermetru se polno odkloni pri toku 1 mA, pri čemer je na njej padec napetosti 100 mV. Notranji upor torej znaša 100 Ω. Če hočemo meriti večje tokove, naredimo obvod mimo tuljave. Njegov upor mora biti manjši od upora tuljave, da bo mimo nje stekla (izračunljiva) večina toka. Razmerje obeh tokov – skozi tuljavo in mimo nje – je enako obratnemu razmerju uporov. Obvodni upor 0,1 Ω, na primer, spelje mimo tuljave, pri polnem odklonu, 1 A toka.

Upor in vezava  
voltmetra

Zaradi sorazmernosti med tokom in napetostjo lahko ampermeter uporabimo tudi za merjenje napetosti; poznati moramo le njegov notranji upor. Obstoječo skalo toka preračunamo v skalo napetosti. Dobimo *tuljavni voltmeter*.

Voltmeter je upornik, ki kaže napetost na samem sebi, ko skozenj teče tok. Vključimo ga med dve točki na tokovni veji, med katerima hočemo izmeriti napetost. Žal s tem v vejo vnesemo dodatni vzporedni upor in zato zmanjšamo tok ter napetost. Da motnja ni prevelika, mora biti notranji upor voltmetra čim večji. To dosežemo tako, da pred tuljavo vežemo predupornik.

Notranji upor izmerimo podobno kot pri ampermetru. Na baterijo priključimo voltmeter. Baterijo izberemo tako, da je odklon kazalca primerno velik. Potem zaporedno k voltmetru priključimo spremenljivi upornik in ga večamo, dokler se odklon ne zmanjša na polovico. Upor spremenljivega upornika je tedaj enak notranjemu uporu voltmetra.

Tuljava v tipičnem voltmetru je enaka kot tuljava v tipičnem ampermetru. Z njo torej merimo do 100 mV in ima upornost 100 Ω. Če hočemo meriti večje napetosti, moramo pred tuljavo priključiti predupornik. Njegov upor mora biti večji od upora tuljave, da nase prevzame večinski delež napetosti. Razmerje obeh napetosti – na preduporu in tuljavi – je enako razmerju obeh uporov. Predupor 10 kΩ, na primer, prevzame nase, pri polnem odklonu, 10 V napetosti.

Upor in uporaba  
baterije

Baterija sicer potiska tok po krogu, vendar se mu, ko teče skozi njo, tudi sama upira. Predstavljamo si, da je sestavljena iz vira gonilne napetosti  $U_g$  in iz zaporedno vezanega notranjega upora  $R_N$ . Ko na elektrodi priključimo zunanji upor  $R$ , steče tok  $I$  in velja

$$U_g = (R_N + R)I. \quad (24.15)$$

Če je  $R_N$  veliko manjši od  $R$ , ga lahko zanemarimo. Tedaj je gonilna napetost baterije res kar enaka padcu napetosti na zunanjem uporniku. V nasprotnem primeru pa se gonilna

napetost porazdeli na oba upornika. Med priključkoma baterije potem vlada "terminalska" napetost  $U_0 = (U_g - R_N I) = RI$ . Večji ko je tok, manjša je ta napetost. Baterija je tem boljša, čim manjši notranji upor ima.

Gonilne značilnosti baterije določimo takole. Na baterijo priključimo dve vzporedni veji: v eni je voltmeter in v drugi zaporedno zvezana ampermeter in spremenljivi upor.

Spreminjamo upor in beležimo tok in terminalsko napetost. Potem narišemo graf  $U_0(I)$  in iz njega določimo gonilno napetost, maksimalni tok in notranji upor. Kot palec velik člen cink-ogljje ima gonilno napetost 1,5 V in notranji upor 0,5  $\Omega$ . Če ga kratko staknemo, teče skozenj tok 3 A.

S prečrpanim nabojem se gonilna napetost manjša in notranji upor povečuje. Ustrezno upada tudi terminalska napetost. Rečemo, da se baterija "izprazni". Že omenjeni člen tehta 50 gramov in lahko pretoči naboj 1 Ah, preden obnemore. To pomeni, da poganja tok 1 A celo uro, ali tok 0,1 A celih 10 ur. Energija, ki jo pri tem člen odda, je približno takšna, kot če bi padal z višine 10 km. Enako težek kos premoga vsebuje stokrat več sežigne toplote.  $\square$